

**UNIVERSIDAD DE GRANADA**

**DEPARTAMENTO DE URBANÍSTICA Y O.T.**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ELÉCTRICO EN EL ALUMBRADO DE  
TÚNELES EN AUTOVÍAS DE ALTA CAPACIDAD MEDIANTE ACTUACIONES  
SOBRE EL ENTORNO. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA NORMATIVA VIGENTE**

**Tesis Doctoral**

Doctorando:

Juan Carlos López López

Directores:

Alejandro L. Grindlay Moreno

Antonio M. Peña García

El doctorando JUAN CARLOS LÓPEZ LÓPEZ ... y los directores de la tesis ALEJANDRO LUIS GRINDLAY MORENO Y ANTONIO MANUEL PEÑA GARCÍA .... Garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por el doctorando bajo la dirección de los directores de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

GRANADA A 25 DE SEPTIEMBRE DE 2015

Director/es de la Tesis

Doctorando



Fdo. ALEJANDRO GRINDLAY

Fdo.:

/ Antonio Manuel  
Peña García

Fdo.:

JUAN CARLOS LÓPEZ LÓPEZ.

Editorial: Universidad de Granada. Tesis Doctorales

Autor: Juan Carlos López López

ISBN: 9788491253235

URI: <http://hdl.handle.net/10481/41120>

*A María Piedad, Pablo y Lucía*



## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera agradecer en primer lugar a mis tutores de Tesis, los profesores de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, de la Universidad de Granada: D. Alejandro Luis Grindlay Moreno y D. Antonio Manuel Peña García, por su comprensión, paciencia y guía en este largo tiempo que nos ha ocupado llevar a buen puerto el trabajo que a continuación se presenta.

Gracias de verdad a ambos.

Quiero agradecer a mi empresa CEMOSA, los medios, bibliografía y documentación con los que he podido contar para el final de este trabajo.

Gracias.

Agradecer también a mi familia, a mi padre siempre dispuesto a ayudar en lo que sabe, sin importarle la hora ni el día, a mi madre por su apoyo incondicional en todo lo que hago y en especial a mi suegro, ejemplo de superación, de emprendimiento, de valentía, persona excepcional que me inspira con sus obras y sus palabras. Gracias papás, hermano, suegros, cuñado/as, sobrino/as y amigos.

No quiero olvidar a mis hijos Pablo y Lucía, a esos que siempre están conmigo, me alegran, me divierten, me animan y me dan las fuerzas necesarias para levantarme cada día y seguir mirando con esperanza hacia el futuro.

Gracias hijos.

Por último quiero mencionar muy especialmente a mi esposa, María Piedad Ramírez Valverde, sin cuyo amor, apoyo, aliento, luz, guía, respaldo, consejos, ánimo y ayuda este trabajo no hubiera salido.

Por ello, gracias amor.

A todos, gracias.

---

---

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	5
ÍNDICE GENERAL.....	6
RESUMEN.....	11
1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1. Conceptos generales sobre túneles. ....	13
1.2. Evolución histórica del túnel. ....	13
1.3. El túnel como elemento clave en la obra civil.....	20
1.4. Seguridad en túneles y análisis crítico de la normativa vigente .....	23
1.5. Iluminación de túneles. ....	34
1.5.1. Normativa sobre iluminación en túneles .....	36
1.5.2. Zonificación lumínica en túneles .....	38
1.5.3. Equipos de alumbrado en túneles.....	46
1.6. Principales problemáticas asociadas a los túneles en autovías de última generación. ....	48
2. INTEGRACIÓN PAISAJÍSTICA DE PORTALES DE TÚNELES EN AUTOVÍAS. ....	55
2.1. Criterios de Integración y diseño.....	57
3. CONSUMO ENERGÉTICO DEL ALUMBRADO DE TÚNELES EN AUTOVÍAS.....	70
4. OBJETIVOS DE LA TESIS.....	73
5. RESULTADOS.....	74
5.1. Caracterización y valoración paisajística, energética y económica de los emboquilles de los túneles: propuesta de índice.....	76
5.1.1. Definición de variables de valoración. Aplicación a portales en la autovía A7. ....	76

5.1.2. Propuesta de un parámetro cuantitativo para la evaluación de portales de túneles en autovías de alta capacidad: Vector sostenibilidad.....	88
5.1.3. Comparativa y aplicación del vector sostenibilidad a los túneles de un tramo de la autovía de alta capacidad A7.....	91
5.2. Forestación de portales de túneles con vegetación trepadora para minimizar el consumo energético de las instalaciones de alumbrado.....	94
5.2.1. Selección de especies vegetales.....	95
5.2.2. Efecto de la revegetación sobre el consumo energético en túneles .....	104
6. CONCLUSIONES.....	107
7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	111
8. BIBLIOGRAFÍA. ....	111
Páginas web:.....	117
APÉNDICES.....	117
APÉNDICE 1: DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS TÚNELES ELEGIDOS.....	119
APÉNDICE 2: VARIABLES UTILIZADAS EN LA CARACTERIZACIÓN SOSTENIBILIDAD-INTEGRACIÓN .....	146
APÉNDICE 3: RADIOMETRÍA, FOTOMETRÍA Y COLORIMETRÍA.....	148
APÉNDICE 4: FICHAS TÉCNICAS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA.....	160
APÉNDICE 5: PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN (1):.....	182
APÉNDICE 6: PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN (2):.....	193

FIGURAS:

Figura 1. Esquema de los diferentes métodos constructivos de túneles. Fuente: Alonso (2002).....	18
Figura 2. Vista en perspectiva de una moderna tuneladora. Fuente: Alonso (2002) ....	20
Figura 3. Túneles en R.C.E. y distribución según su longitud en la A-7.....	23
Figura 4. Niveles de luminancia requeridos en un túnel de tráfico unidireccional. ....	38

---

---

Figura 5. Representación esquemática del nivel de iluminación en las distintas zonas de entrada .....	42
Figura 6. Curva de reducción de la luminancia. Fuente: García Fernández s.f. ....	46
Figura 7. Curva de adaptación visual del ojo humano (condiciones fotópicas a escotópicas).....	50
Figura 8. Fenómeno de la inducción. Fuente: García Fernández s.f. ....	51
Figura 9. Factores de sobrecarga mental en el interior de un túnel.....	52
Figura 10. Propuesta de túnel con paredes oscurecidas.....	54
Figura 11. Boceto de integración boca de túnel. Fuente: Español, y otros (2008).....	58
Figura 12. Prolongación exterior de la bóveda del túnel. Fuente: Español, y otros (2008) .....	60
Figura 13. Falso Túnel. Fuente: Español, y otros (2008) .....	61
Figura 14. Trazado de la A-7 a su paso por el municipio de Albuñol (Granada). Fuente: Elaboración propia (2014) .....	62
Figura 15. Integración túnel, orografía. Fuente: Estany y Serra (2010) .....	63
Figura 16. Modelo de restauración en el portal del túnel. Fuente: Estany y Serra (2010) .....	64
Figura 17. Diferentes diseños de emboquilles. Fuente: Estany y Serra (2010).....	65
Figura 18. Mimetización estructura entorno. Fuente: Estany y Serra (2010).....	67
Figura 19. Restitución de túneles en la A5 italiana entre Aosta y el túnel de Montblanc. ....	67
Figura 20. Tratamientos de estabilización de los taludes laterales. Ejemplo en Austria y Francia. Fuente: Estany y Serra (2010).....	68
Figura 21. Espacios y elementos que afean el aspecto del emboquille.....	69
Figura 22 Túnel carretero paralelo a la costa mediterránea en el sureste de España...	72
Figura 23. Número de túneles en la R.C.E., por provincias y con L >1.000 metros. Relación con A-7. ....	75
Figura 24. Localización geográfica de los túneles en la A-7. Fuente: Google (2015) .....	78

---

---

Figura 25. Portal (22.1) y (22.2) del túnel de Cerrosol en Málaga. ....	81
Figura 26. Portales con mayor artificialidad (16.1-16.2) del túnel San Pedro de Alcántara en Málaga y (26.1-26.2) del túnel de Gualchos en Granada. ....	82
Figura 27. Portal (25.1) y (25.2) del túnel de Lorca en Murcia.....	82
Figura 28. Portal (8.1) y (8.2) del túnel de Acebuchal en Granada. ....	84
Figura 29. Portal (7.1), (9.2) (11.2) y (11.1) del túnel de la Fuentecilla, Carchuna y la Guapa (Granada). ....	85
Figura 30. Portal (6.1) y (6.2) del túnel de Ramoncillos en Granada. Fuente: Elaboración Propia.....	87
Figura 31. Relación Consumo Energético-Coste de Emboquille. ....	92
Figura 32. Relación entre Valoración Paisajística y Coste de Emboquille. Fuente: Elaboración Propia.....	93
Figura 33. Representación tridimensional para las variables conocidas. ....	94
Figura 34. Hedera hélix. Fuente: Bettini y Arrigo (2009).....	96
Figura 35. Carpobrotus edulis. Fuente: Bettini y Arrigo (2009) ....	97
Figura 36. Jasminum nudiflorum. Fuente: Bettini y Arrigo (2009).....	98
Figura 37. Macfadyena unguis-cati. Fuente: Bettini y Arrigo (2009) ....	99
Figura 38. Conjunto de especies plantadas para determinar su contribución a la L <sub>20</sub> . 101	
Figura 39. Siembra paralela de las cuatro especies elegidas. Simulación del portal de entrada al túnel. ....	102
Figura 40 Túnel viario paralelo a la costa mediterránea en el sureste de España.....	104

#### ESQUEMAS:

Esquema 1. Diagrama de flujo del diseño paisajístico del emboquille de túneles. ....	77
--	----

#### ECUACIONES:

Ecuación 1. Cálculo de la $L_{20}$ .....	40
Ecuación 2. Nivel de luminancia .....	40
Ecuación 3. Curva de iluminación en las distintas zonas de entrada .....	42
Ecuación 4. Cálculo de la $L_{20}$ .....	72
Ecuación 5. Relación entre coeficientes en la expresión de la $L_{20}$ .....	72
Ecuación 6. Vector sostenibilidad.....	89
Ecuación 7. Módulo del vector sostenibilidad .....	89
Ecuación 8. Ángulos Directores del vector sostenibilidad .....	90
Ecuación 9. Flujo luminoso .....	105
Ecuación 10. Flujo luminoso en la primera mitad de la zona umbral .....	105

## RESUMEN

El túnel es un elemento clave en la ingeniería civil, especialmente en las vías de alta capacidad. La necesidad de superar las barreras naturales en las infraestructuras viarias, ha impulsado su desarrollo, que ha sido paralelo al de las técnicas y procesos constructivos, ganando en longitud y profundidad.

La presente Tesis Doctoral se centra en aspectos de gran relevancia en estas infraestructuras singulares, como son su adecuada integración paisajística y la reducción del elevado consumo energético de sus instalaciones de iluminación. Como se demostrará más adelante, ambos aspectos se encuentran relacionados.

Tras un primer recorrido por los conceptos generales de los túneles y su evolución histórica, se ha llevado a cabo un estudio y un análisis crítico de la normativa para valorar los criterios de seguridad que rige actualmente la construcción de los túneles europeos.

Entre dichos requerimientos de seguridad, destaca la iluminación y las importantes repercusiones económicas y medioambientales derivadas de su elevado consumo energético. En este sentido, se presentan y analizan los requisitos lumínicos en túneles de autovías de alta capacidad, destacándose las causas de que dicho consumo sea tan alto. Entre ellas destaca la lentitud de adaptación visual del ojo humano al pasar de ambientes luminosos a otros más tenues, razón por la que los niveles de iluminación y, por tanto, su consumo energético, han de ser muy elevados a fin de que los conductores no pierdan capacidad visual.

Para disminuir estos requisitos lumínicos, se propone una novedosa metodología de forestación de portales de túneles basada en la introducción de especies trepadoras. Para ello se procede al estudio y selección de especies vegetales apropiadas y se analiza el efecto de la revegetación sobre el consumo energético de los túneles.

Una vez definida esta estrategia para la disminución del consumo energético, se ha procedido a la caracterización y valoración paisajística, energética y económica de los túneles de la Autovía A-7. Realizándose la comparación de consumos energéticos y costes económicos de la obra civil de emboquilles y el establecimiento de una metodología de análisis, a través de la definición de una serie de variables, que han permitido la comparación entre los distintos parámetros.

Del análisis comparativo se propone un parámetro, que se ha denominado, vector sostenibilidad que aúna las variables principales estudiadas en el portal del túnel. A partir de dicho vector, se pueden predecir las características óptimas de los portales de

entrada a los túneles de autovías de alta capacidad y conseguir la disminución de los consumos energéticos.

Además de los importantes resultados a nivel de consumos energéticos, se ha observado que dichas actuaciones vegetativas repercuten positivamente en la integración paisajística de los túneles en el territorio, aspecto éste que, debido a la singularidad de las mismas, exhibe una especial importancia.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Conceptos generales sobre túneles.**

El túnel arranca originalmente de la necesidad de superar un obstáculo natural, generalmente un macizo montañoso. Pero además de las montañas existen otras barreras que se pueden salvar mediante túneles como los cursos de agua, fluviales o marinos, y las zonas urbanas densamente edificadas en las que a menudo se incorporan túneles.

Entre los usos más frecuentes pueden enumerarse los túneles para vehículos, para redes de ferrocarril, o de Metros, para uso peatonal, para abastecimiento de agua, saneamiento, galerías de servicio, para almacenamiento de residuos, etc.

Si bien el túnel en sentido estricto se caracteriza por su marcado carácter lineal, es importante destacar el mismo en un sentido amplio, no sólo como obra lineal sino como espacio subterráneo que incluye desde la caverna, la cueva natural hasta amplios recintos subterráneos transitables dentro de lo que podría englobarse como urbanismo y espacio subterráneo; en suma, el túnel como obra de tránsito y también como hábitat.

Desde los primeros comienzos en Babilonia, la ingeniería civil subterránea, tal y como la entendemos actualmente, ha ido evolucionando lentamente hasta épocas muy recientes, en las que se ha producido una verdadera revolución (Juncá, 1991), como se verá seguidamente. En este trabajo se abordará principalmente el estudio de los túneles de autovías de última generación.

### **1.2. Evolución histórica del túnel.**

Desde los albores de la humanidad, lo subterráneo ha estado estrechamente ligado a las actividades del hombre. En principio utilizó las cavidades naturales para darse cobijo y buscar protección contra los agentes exteriores. Más adelante descubrió que el interior de la tierra contenía materiales que, tratados convenientemente, podían ayudarle en sus tareas cotidianas, iniciándose de esta forma la actividad minera que ha perdurado hasta nuestros días.

El arte de los túneles se funde en sus orígenes con el arte de la minería. la mina más antigua que se conoce en el mundo se localiza en el cerro de Bomvu, en Swazilandia, y

---

---

data del año 40.000 a.C.; en ella el hombre de Neandertal minaba hematites, piedra de sangre, muy apreciada para ritos mortuorios; las herramientas no eran otras que piedras afiladas y sus manos desnudas.

En la historia de los túneles se han destacado algunos hitos. Así, siguiendo a Juncá (1991), el primero se realiza allá donde la historia se difumina con el mito, y fue el que la leyenda dice mandara construir Semiramis bajo el Éufrates para comunicar el Palacio y el Templo de Belos en la Babilonia del 2200 a.C.. A este formidable trabajo se refieren entre otros los historiadores Diodoro de Sicilia, Herodoto y Estrabon. En realidad, se trataba de un falso túnel, por cuanto no se perforó en galería sino mediante zanja a cielo abierto y posteriormente recubierta, para lo cual se desviaron las aguas del Éufrates aprovechando el período de estiaje.

El siguiente túnel construido bajo el cauce de un río se perforó cuatro mil años después de aquel de Babilonia, obra de los Brunel padre e hijo quienes tras veinte años de lucha denodada y arrojo lograron dominar las furiosas aguas del río Támesis que se resistía a ver perforado su lecho.

A lo largo de la historia y en el seno de distintas culturas se han proyectado y construido túneles con distintos motivos. Así, tanto en el antiguo Egipto, como en las culturas orientales, el túnel ha tenido un marcado carácter religioso. Mientras que en zonas como las Tierras de Canaan (siglo X a.C.) el propósito no es místico o religioso sino ingenieril, hidráulico. Tenían como fin el abastecimiento a las ciudades y la captación de aguas. ¿Por qué bajo tierra?. Por varios motivos. El más poderoso de ellos, sin duda, evitar que un bien tan preciado como el agua (muy escaso por aquellas regiones) se evaporara como consecuencia de las altas temperaturas que se alcanzaban.

El primer método de perforación de galerías mineras y, con posterioridad, de túneles es la técnica del fuego, consistente en provocar un incendio en el frente de ataque para luego sofocarlo bruscamente con agua fría produciendo un brusco gradiente térmico que da lugar al resquebrajamiento de la roca; pero esta técnica también provoca, como no es difícil imaginar, una atmósfera viciada, irrespirable, generando gases a menudo venenosos, convirtiendo el trabajo del minero en una trampa mortal.

Pero siguiendo con los principales hitos de la historia de los túneles merece especial referencia el de la Isla de Samos, de un kilómetro de longitud y primero del que se tiene noticia del ingeniero que lo construyó, Eupalinos de Megara, hijo de Naustrofo. Esta obra construida hacia el 530 a.C., servía para el abastecimiento de agua a la capital de la isla. Estuvo en funcionamiento durante un milenio y fue considerada como una de las tres maravillas del Mundo Heleno.

Asimismo, para el propósito de este trabajo, merece especial atención el desarrollo de la ingeniería civil durante el Imperio Romano, con la construcción de las calzadas y sus túneles, como el de Pausilippo, cerca de Nápoles, con sus 1500 m de longitud. Además los romanos construyeron otros túneles con muy diversos propósitos: galerías mineras, túneles para abastecimiento de agua, para alcantarillado, para el drenaje de lagos volcánicos (emisario de Fucino con 5500 m de longitud), sin olvidar los túneles de propósito militar y las catacumbas.

En la Edad Media, los túneles pierden esa potencia como obras vigorosas de ingeniería civil y derivan en galerías y pasadizos en castillos y fortalezas, como obras menores. Durante este período, la minería se robustece y consolida, fundamentalmente en Centroeuropa, surgiendo al filo del Renacimiento la obra maestra de la minería, *De Re Metallica* de Georgius Agrícola publicada en el S. XVI. Dicha obra recoge con minuciosidad en su texto y en sus grabados las prácticas y técnicas mineras, siendo un libro básico de consulta durante los dos siglos siguientes a su publicación.

El Renacimiento marca el resurgir de la técnica en general, como la de los túneles en particular, tras el letargo de la época medieval. Leonardo da Vinci concibe niveles subterráneos en sus proyectos de ciudades y piensa en la posibilidad de perforar túneles allá donde los canales se encuentran con barreras montañosas.

En nuestro país, el primer túnel de esta época es la Mina de Daroca en la provincia de Teruel. Cuenta con 600 m de longitud, 6 m de anchura y una altura variable entre los 7 y 8 m. Fue construido entre 1555 y 1570 por Pierres Bedel para reconducir y desviar las aguas torrenciales que venían castigando la villa aragonesa

Pero es en el siglo XVIII cuando surge la denominada “Era de los Canales” y dentro de ella los túneles comienzan a adquirir protagonismo dado su rígido trazado: destacando el túnel de Malpas, cerca de Beziers en el Canal de Midi para la unión del Atlántico y el Mediterráneo, obra portentosa que impulsa Colbert bajo el reinado del rey Luis XIV siendo el primer túnel para canal. Este túnel, de 155 m de longitud, 6,5 m de altura y 8 de anchura, fue perforado por Pierre-Paul Riquet, empleando la pólvora por primera vez. Así comienza la Era de los túneles para canales: tras él muchos túneles se construirán en las siguientes décadas destacando los túneles ingleses para canal, muchos de ellos obra del gran ingeniero llamado James Brindley.

La experiencia adquirida con la construcción de túneles para los canales resultaría valiosísima en el período siguiente, ya superado en el corazón de Europa el umbral de la Revolución Industrial, en la conocida como “Era de los Ferrocarriles”.

Así, en el desarrollo de los ferrocarriles durante el siglo XIX y su ajustado trazado, los túneles tuvieron gran auge. En la historia de los túneles de ferrocarril se acumulan grandes hazañas en una denonada lucha del hombre por dominar el arte de perforar la

---

---

tierra; incorporando progresivamente maquinaria y procedimientos constructivos a partir de los cuales el esfuerzo manual va cediendo en pro de una incipiente mecanización.

El transporte por carriles existía ya en el siglo XVI, cuya infraestructura estaba construida de madera y se utilizaba para mover por ella vagones en las minas. Los avances técnicos en la Revolución Industrial del siglo XIX favorecen la aparición de los ferrocarriles. En 1803 en Surrey, Inglaterra, se abrió el primer ferrocarril tirado por caballos del mundo. Así, los raíles de hierro se extendieron al transporte de mercancías y viajeros. En 1825 se inauguró el primer tren traccionado por una locomotora de vapor creada por Stephenson.

En aquella época el primer túnel de ferrocarril fue el de Terre-Noir en Francia, de la línea Roanne-Andrieux, camino de carriles traccionado y construido por caballos, en 1826, con 1.476 m de longitud, 5 m de altura y cerca de 3 m de anchura.

Los ferrocarriles de vapor, que comenzaron en Gran Bretaña, se multiplicaron de forma importante entre los años 1830 y 1845. El ferrocarril de Liverpool a Manchester, obra de Isambard Kingdom Brunel fue el primero; dicha línea atravesaba la montaña por dos túneles, uno de 4,8 km y otro de 1,6 km.

Durante esta período también tiene lugar la gesta de la perforación del primer túnel bajo el Támesis entre Rotherhithe y Wapping, el primero que se construye en terreno blando y con enorme presencia de agua y en el que por primera vez se aplica la técnica del escudo que patentase Marc Brunel. Cuando la Reina Victoria inaugura el túnel en marzo de 1843 habían transcurrido casi veinte años de denodada lucha contra las inundaciones del Támesis (en cinco ocasiones), contra la quiebra financiera, contra ese gran agujero del que casi todos recelaban pero que los Brunel superaron enfrentándose a todas las dificultades con arrojo y valentía sin límites.

Ya en la segunda mitad del siglo XIX se produce un avance impresionante con la construcción de los grandes túneles alpinos de ferrocarril. Los nombres de Mont Cenis, San Gotardo y Simplón constituyen la triada en la titánica lucha por perforar los Alpes y que marca el punto de mayor tensión en la historia de los túneles: baste recordar que la longitud respectiva de estas galerías es de 12,6 km, 15,2 km y 19,7 km. Los medios disponibles eran todavía modestos, si bien la incorporación de máquinas taladradoras accionadas por aire comprimido, obra de Sommeiller, marca un salto cualitativo en los rendimientos alcanzados.

También en Estados Unidos se van imponiendo los túneles en la segunda mitad del siglo XIX. Cabe citar dos túneles bajo el río de Chicago abiertos en 1869 y 1871, que sirvieron como la única vía de escape para los habitantes de la ciudad durante el feroz

incendio que redujo la ciudad a cenizas en ese año, sólo cuatro meses después de inaugurarse el túnel de la calle La Salle.

El túnel Hoosac marca también sin duda un hito a nivel de avances tecnológicos, como es la utilización por primera vez de la nitroglicerina, y el túnel de Saint Clair construido, a finales del XIX bajo el río que le da nombre entre EE.UU y Canadá, mediante un escudo de 6,45 m de diámetro.

Posteriormente la electricidad y la potencia eléctrica propició la aparición de los ferrocarriles subterráneos, y el metro. Por otra parte, las centrales de energía dieron lugar a los túneles para enfriamiento de agua y para conducción de cables. La máquina de combustión interna, no sólo extendió la potencia de la ingeniería sino que dio lugar al motor de explosión, lo que condujo al desarrollo de las carreteras y por tanto a la demanda de un número creciente de túneles para vehículos a motor, no sólo perforados bajo montañas sino también bajo colinas menores o incluso bajo los cauces de los ríos.

Así, siguiendo a Serrano (1998), la historia reciente del túnel o ingeniería subterránea se inicia en el siglo XIX con la mencionada construcción del primer túnel subacuático de esta etapa contemporánea bajo el río Támesis, en Londres en 1818, y que dará lugar al primer método de construcción: *El Método Inglés*. Este recibe su nombre por haber sido aplicado en túneles a través del tipo de terreno que usualmente se localiza en Inglaterra, como son las arcillas y areniscas. Siguiendo el ejemplo establecido en la construcción del primer túnel bajo el Támesis, su principal característica es proceder el avance de la perforación a sección completa del túnel, en una sola operación.

Paralelamente a estos desarrollos, Nobel descubre la dinamita, lo que va a permitir la construcción de un gran número de túneles gracias al sistema de explosión controlada a partir de 1863, año de la patente.

Una segunda etapa, como se ha indicado, vendrá determinada por el apogeo del ferrocarril, cuyo estricto trazado obligaba en numerosas ocasiones a atravesar macizos montañosos, con graves problemas debido a las fuertes presiones del terreno y a la aparición de grandes caudales de agua en muchas ocasiones. Esta etapa, que se extiende hasta mediados del siglo XX, obligó a los ingenieros civiles a aguzar el ingenio para poder salvar con éxito esta serie de dificultades y está en el origen de la escuela centroeuropea de ingeniería subterránea, a la que debemos el desarrollo y puesta a punto de las modernas filosofías y métodos, basados en conseguir la máxima colaboración del terreno en la estabilidad conjunta del binomio estructura-terreno (Serrano, 1998).

Es en esta época cuando se desarrollan el resto de métodos tradicionales en la construcción de túneles:

---

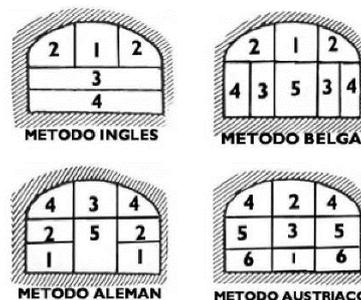
---

*El Método Belga:* se basa en los principios que permitieron la construcción, en 1828 del túnel de Charleroi en el Canal que enlaza Bruselas y Charleroi.

*El Método Alemán:* este sistema fue utilizado por primera vez en 1803 para construir el túnel en el Canal de San Quintín, y desarrollado por Wiebeking en 1814, siguiendo el sistema de núcleo central, también empleado en la construcción de las amplias bóvedas de cerveza de Baviera.

*El Método Alemán Modificado:* se aplica en el caso en que durante la operación de perforación del túnel, a través de un terreno bastante firme, surja la aparición de agua, lo que origina una alteración en el Método Clásico Alemán en cuanto a las etapas sucesivas de ataque del frente.

*El Método Austriaco:* los austriacos desarrollaron un plan de trabajo basado en la utilización de puntales de madera formando un sistema de entibación, procedimiento aplicado en las minas de Friburgo y que fue aplicado por primera vez por Meisner en la construcción del túnel de Oberau, en el ferrocarril entre Leipzig y Dresden, en Sajonia en el año 1837. En 1839 Keissler lo empleó en el túnel de Gumpoldskirch, cerca de Viena-Neustadt.



**Figura 1. Esquema de los diferentes métodos constructivos de túneles. Fuente:Alonso (2002)**

Finalmente, según Serrano (1998), se puede hablar de una tercera etapa que tiene como origen la construcción del túnel de Seikan, que une las islas de Honshu y Hokaido bajo el estrecho de Tsugaru, en Japón, inaugurado en 1988. El gran mérito de esta importante obra (53 km de longitud y calados de agua de 140 metros), aparte de los grandes progresos técnicos que entrañó su construcción, radica en que la ingeniería experimentó un avance definitivo respecto a estas grandes obras subterráneas bajo el agua. En esta etapa hay que incluir, asimismo, el gran desarrollo que han tenido las máquinas tuneladoras integrales (TBM), con capacidad para soportar altas presiones en el frente de trabajo, lo que ha permitido acometer obras de muy difícil ejecución si no hubieran existido estas máquinas, como por ejemplo el túnel del canal de la Mancha (entre 1987 y 1991), al enlace del Gran-Belt en Dinamarca y al túnel bajo la bahía de Tokio o, ya en nuestro país diversos tramos del metro de Madrid y Barcelona.

Siguiendo a Alonso (2002), la tuneladora se inventó en los años 50 cuando J.S.Robbins creó en 1953 una máquina perforadora giratoria de cuchillas para excavar túneles en minas. En la década siguiente añadió a esa máquina cubetas rodantes para recoger el producto de la excavación y una cinta transportadora de extracción del túnel, y con ella se construyó un gran túnel de drenaje de aguas en Toronto. Posteriormente se recuperó el invento cuando en Chicago, se convocó un concurso para la construcción de un sistema de drenaje y almacenamiento de aguas de lluvia antes de su vertido.

Asimismo, la ingeniería de túneles ha progresado de forma muy significativa durante el siglo XX y lo que llevamos de XXI. Entre los principales factores que han contribuido decisivamente a este avance se encuentran, según el trabajo del profesor Alonso (2002), los siguientes:

- En relación con la excavación, las mejoras en las técnicas de voladura, tanto en la fase de barrenado como en los tipos de explosivos, el uso cada vez más eficiente de la energía, sea eléctrica o por aire comprimido; así como la introducción de nuevos equipamientos y maquinaria, dependiendo de las características del terreno (tema del que nos ocuparemos más en profundidad en los siguientes puntos), como son las máquinas tuneladoras (TBM), las rozadoras o tuneladoras de ataque puntual, escudos, etc ha sido determinante.
- En relación con el sostenimiento, los avances en materia de revestimientos, principalmente en hormigón y acero moldeado, en mejora del terreno mediante inyecciones a presión así como el perfeccionamiento de máquinas tuneladoras a sección completa.
- En relación con las características del entorno de trabajo, cabe resaltar las notables mejoras en sistemas de ventilación e iluminación, un control más eficaz del agua subterránea mediante equipos de bombeo o a través de sobrepresión ambiental.
- En relación con los métodos de diseño y construcción de entre los diversos métodos que anteriormente se apuntaron, cabe destacar el Nuevo Método Austriaco de construcción de Túneles (NATM). Si bien este método se encuadraría dentro de los sistemas de sostenimiento de túneles, su alcance, trascendencia y repercusión a nivel mundial permite afirmar que el NATM supone una destacada contribución a la ingeniería de túneles.



**Figura 2. Vista en perspectiva de una moderna tuneladora. Fuente: Alonso (2002)**

En los últimos años, siguiendo a Puertas (2010), como respuesta al crecimiento de la población y a sus necesidades en cuanto a movilidad se refiere, se ha dado un proceso de agotamiento gradual de las infraestructuras de transporte que, junto con la limitación de la posibilidad de ocupación en superficie por el aumento de la sensibilización ambiental y de supresión de barreras físicas tanto para el desplazamiento de la población como para la expansión geográfica de los núcleos poblacionales ha llevado a la consecuencia lógica del aprovechamiento del espacio subterráneo como espacio apto para la realización de estas actividades que se venían realizando en superficie.

Dicho aprovechamiento del espacio subterráneo, ha motivado un aumento en la construcción de túneles en nuestro país, sobre todo en los últimos años, motivando grandes avances tecnológicos, tanto en la maquinaria de construcción propiamente dicha, como en los materiales empleados para el sostenimiento de los túneles.

Lamentablemente, todos estos avances tecnológicos no se han visto acompañados por un avance paralelo y en el mismo camino, de la integración ambiental de los túneles al territorio y por un sostenido consumo energético de los mismos, siendo si cabe este último punto, el más importante a destacar en este trabajo de investigación que desarrollamos y con mucha probabilidad motivo de nuevas futuras vías de investigación.

### **1.3. El túnel como elemento clave en la obra civil.**

El desarrollo viario ha sido, en cuanto a trazado, más flexible que el ferroviario, por lo que los tramos en túnel de las carreteras han sido inferiores a los de las líneas de tren. La variable que regía tradicionalmente dicho trazado era la altitud óptima para realizar los pasos por las montañas, y venía dictada por la tecnología de construcción de túneles de cada época, como afirma Aguiló (2012), “era preciso minimizar la longitud de túnel resultante, aunque la topografía local de los accesos pudiera forzar esa

longitud al alza". Además, los túneles han sido elementos relevantes para reducir el efecto barrera de estas infraestructuras y aumentar su permeabilidad transversal (Coronado Tordesillas 2002, 2007)

Sin embargo, la mejora progresiva de las carreteras transformándose en autovías, para conferirles mayores velocidades y niveles de seguridad y confort, han impuesto mayores limitaciones los trazados, dando lugar a la proliferación de túneles viarios de cada vez mayor longitud. Paralelamente, la innovación de la alta velocidad ferroviaria con sus rigurosísimos trazados, exigirá la construcción de un gran número de túneles de gran longitud (Aguiló 2010).

Así, actualmente los últimos planes y programas de carreteras han contribuido a aumentar de forma considerable la longitud de la red de gran capacidad del país y sus túneles, fundamentalmente con la construcción de nuevas autovías y a la mejora sustancial del conjunto de la Red de Interés General del Estado y de las autonomías. Según Herce (2013), durante el periodo 1985-2000 cuatro países "realizaron una inversión en autopistas y autovías nunca habidas hasta entonces" gracias a las ayudas europeas, "y a la cabeza de todos, España, que pasó de una red de 1930 km de autopistas, autovías y carreteras desdobladas en 1980 a 13975 km en la actualidad situándose a la cabeza de toda Europa, tanto en longitud absoluta como en dotación por habitante".

Las características geográficas de nuestro país, los parámetros geométricos de los trazados actuales y el objetivo de minimizar el impacto medioambiental han llevado a aumentar considerablemente el patrimonio de nuestros túneles. Patrimonio que alcanza la cifra de unos 4.760 túneles, con una longitud del orden de 2.600 kilómetros.

En la Red de Carreteras dependiente del Estado existen más de 500 túneles, que deben ser atendidos y gestionados de manera que se pueda garantizar una aceptable seguridad del tráfico frente a fenómenos diversos como, entre otros, incendios, accidentes de vehículos y especialmente los que transportan mercancías peligrosas.

Por otra parte, en la red ferroviaria se contabilizan unos 2.400 túneles, mientras que existen otros 1.800 de funcionalidad hidráulica. Todo ello sin contar con las distintas redes de metro y otras infraestructuras.

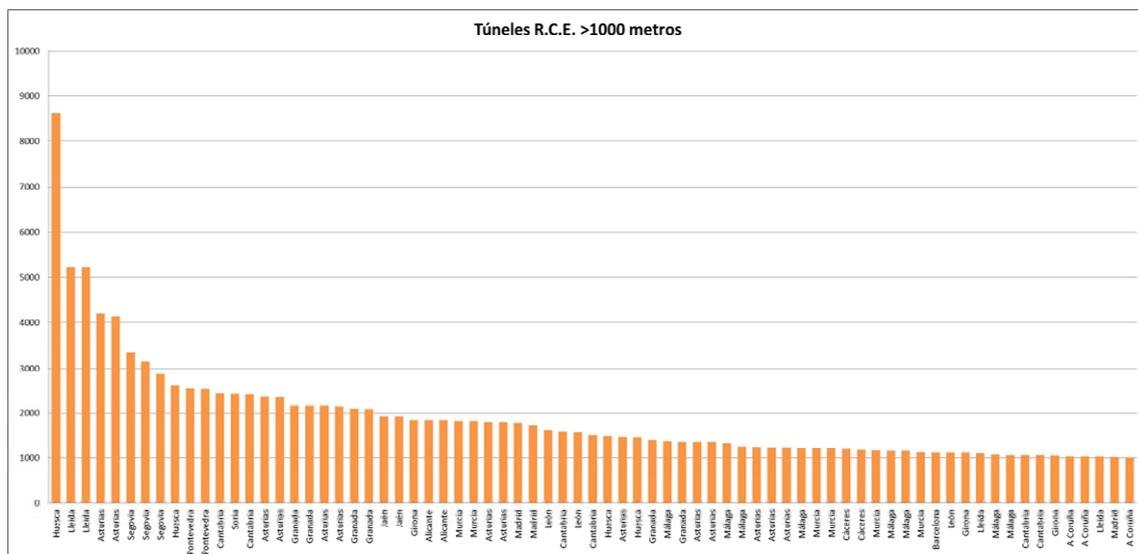
En España existe un gran número de túneles, 513 en la red del Estado con una longitud total de algo más de 300 km de los que 73 tienen una longitud superior a los 1.000 m.

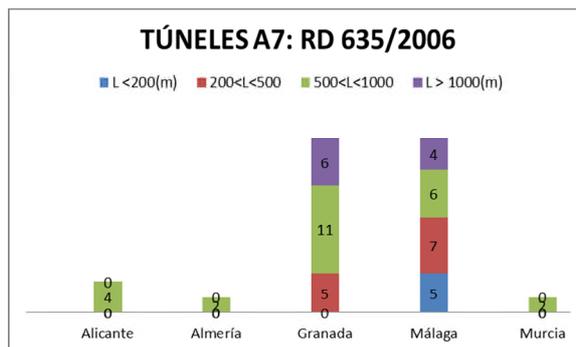
Cabe destacar que el de mayor longitud en este momento es el túnel de Somport, en la provincia de Huesca (N-330), con una longitud total de 8.608 m, formado por un tubo bidireccional. Además también existe un importante número en la red de las Comunidades Autónomas, estando a la cabeza Cataluña con aproximadamente 100

túneles con una longitud total de unos 52 km. También hay una presencia importante de estas infraestructuras en el País Vasco, destacando en la Autovía A-1 los túneles de Arlabán, Gallástegui, San Marcial, Lezarri e Ikastaundi con longitudes respectivas de 3.370 m, 2.370 m, 1.400 m, 1.200 m y 1.200 m. El total de túneles en el tronco de la autovía A-1 es de 11 con una longitud total de 12.230 m más 4 túneles sencillos en el enlace de Máltzaga cuya longitud varía entre 100 y 200 m. Por otra parte cabe destacar las recientes obras de la Variante Sur Metropolitana de Bilbao que incluyen la construcción de 5 túneles bitubo con una longitud total superior a 11 x 2 km. Por último se deben mencionar los túneles de La Laja, con una longitud de 1.250 m en Gran Canaria, el túnel de Soller, con una longitud de 3.023 m en Baleares, el túnel de Belate en Navarra con una longitud de 2.900 m y el túnel de Bielsa con 3.070 m en Aragón, además de los innumerables túneles urbanos donde hay que destacar los de la calle 30 en Madrid (Ministerio de Fomento, 2015).

A continuación se adjunta la relación de los túneles de la Red de Carreteras del Estado con más de 1.000 m de longitud y la distribución de longitudes en la A-7 atendiendo al R.D. 635/2006 (donde las instalaciones y equipamientos de seguridad van en función de la longitud). Posteriormente nos centraremos en los túneles de la A-7, eje que tomaremos como muestra para nuestra investigación.

Respecto a este singular eje viario de alta capacidad, que vino a desarrollar el corredor mediterráneo tradicionalmente articulado por la carretera N-340, es preciso señalar que fue construido en numerosos tramos a lo largo de varias décadas. Los tramos de Alicante, Silla y Marbella entraron en servicio en los ochenta, de Alicante hasta Almería y cerca de Algeciras en los noventa, y el resto en la década del dos mil (Aguiló 2012), a excepción de los tramos de la provincia de Granada, que serán concluidos en la presente década.





**Figura 3. Túneles en R.C.E. y distribución según su longitud en la A-7.**  
Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Fomento (2015)

#### 1.4. Seguridad en túneles y análisis crítico de la normativa vigente

Las cada vez mayores exigencias para los parámetros de seguridad que las distintas administraciones van imponiendo a la hora de definir las infraestructuras a cielo abierto, se están aplicando de forma similar en la racionalización de las medidas a poner en juego para conseguir la seguridad en el interior de los túneles.

Los túneles de carretera son elementos que por sus singulares características dentro de la red viaria merecen una atención especial. No es porque en ellos se produzcan más accidentes que en otros puntos del trazado de las carreteras, sino porque cualquier incidencia grave que les afecte puede provocar alarma social, dadas las circunstancias concurrentes y específicas del lugar en que se produce, las dificultades de rescate o evacuación, el dramatismo provocado por el confinamiento o el trastorno que para el sistema de transportes puede suponer el cierre temporal de un tramo viario, en ocasiones con alternativas difíciles o inexistentes.

Es por ello que la seguridad en los túneles de carretera se ha convertido en un tema de interés creciente para las distintas administraciones y organismos públicos, a nivel nacional e internacional, desde 1999 la seguridad en los túneles de carretera ha sido objeto de creciente interés como consecuencia del dramático accidente del túnel de Mont Blanc y Tauern. Numerosas iniciativas tuvieron lugar a nivel nacional y europeo, fruto de las cuales son las regulaciones presentes.

Las instituciones europeas, estimuladas por esos accidentes que tuvieron lugar años pasados en diversos túneles del continente, decidieron la adopción de medidas tendentes al establecimiento de requisitos que garantizaran adecuadas condiciones de seguridad en los túneles de la Red Transeuropea de carreteras. Fruto de esa iniciativa fue la aprobación de la Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la Red Transeuropea de Carreteras.

La transposición al ordenamiento jurídico español de la citada norma europea, tuvo como consecuencia la aprobación del R.D. 635/2006 de 26 de Mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado fijando las exigencias de seguridad mínimas aplicables a los túneles de más de 500 metros de la Red Transeuropea.

Por todo ello, hay que ocuparse del estudio de la seguridad en túneles desde los campos de los que antes hemos llamado obra civil, instalaciones, conservación y explotación, pero no consideradas como capítulos distintos de un mismo libro, sino en una concepción integral y única (López Guarga, 2010).

Como ya se ha dicho anteriormente, actualmente existen en la Red de Carreteras del Estado 513 túneles, de los que 238 pertenecen a la Red Transeuropea. Realizado el inventario y la inspección de todos los túneles de la Red de Carreteras del Estado, 228 túneles ya cumplen con todos los requisitos de seguridad establecidos en la normativa (Real Decreto 635/2006, Ministerio de Fomento, 2006), mientras que 285 requieren actuaciones que precisan la elaboración de un proyecto previo, y son los que se incluyen en el Plan para la adecuación de los túneles de la Red de Carreteras del Estado que queda integrado en el PEIT, Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (2005-2020) (Ministerio de Fomento, 2005). De estos 285 túneles, 109 pertenecen a la Red Transeuropea.

Estas medidas deben tener en cuenta un amplio abanico de disciplinas, siguiendo a López Guarga (2010), que van desde la geometría y trazado, hasta medidas para disminuir la claustrofobia, pasando por la iluminación, ventilación, señalización, infraestructuras de seguridad, circuito cerrado de televisión, radiocomunicaciones, detección automática de incidentes, telefonía, detección de incendios, drenajes, etc. Lo que supone, en definitiva, una completa mejora de las condiciones espaciales de estos recintos.

Cabe pensar para ello en la intervención de comisiones interministeriales en las que deberían intervenir, junto con los organismos titulares de estas infraestructuras, los servicios de tráfico, de protección civil, sanidad, Administración Local, etc. Para elaborar y llevar a cabo los planes de mejora, intervención y evacuación en emergencias producidas por accidentes de todo tipo.

En cualquier caso, la heterogeneidad de los túneles que componen este patrimonio viene a exigir la disposición de inventarios minuciosos de todos los túneles, tal como se está llevando a cabo en las distintas Administraciones, y que pongan de manifiesto sus características y fundamentalmente sus dificultades y carencias, para poder realizar una clasificación adecuada en cuanto a su localización, tipo de carretera, longitud, volúmenes de tráfico, tipo de sostenimiento, existencia o no de revestimiento,

impermeabilización, tipo de iluminación, tipo de ventilación o inexistencia de ella, analizadores de monóxido de carbono – opacímetros, equipamientos de detección de incendios, lucha contra el fuego y contra el humo producido en caso de incendio, existencia de vigilancia televisada, postes S.O.S., pulsadores de alarma, medidas para la evacuación de vertidos contaminantes, detección automática de incidencias, gestión centralizada, planes de intervención y evacuación, etc. Esta base de datos e inventario está permitiendo la racionalización de la explotación de los distintos tipos de túneles y la posibilidad de elaborar un catálogo mínimo de operaciones a realizar para un mantenimiento y conservación adecuados a las condiciones de uso y seguridad que deben presentar frente a los posibles riesgos. Hay que tener presente que todo túnel de longitud mayor de 350 metros supone un riesgo relevante en caso de incendio por el elevado número de personas que pueden verse implicadas (López Guarga, 2010).

Una vez realizado este trabajo de puesta al día del inventario del patrimonio existente, sería conveniente armonizar los criterios de concepción y diseño: pendientes máximas, geometría, gálibos, equipamientos y mínimos a emplear, recomendaciones de explotación, planes de evacuación, etc. El acierto en el proyecto de un túnel y de sus equipamientos condiciona básicamente el acierto en su explotación funcional y segura, y en la estética y confort que percibirá el usuario.

La explotación supone el conjunto de servicios que han de ponerse a disposición de los usuarios de la obra y que tendrá un nivel de costes en consonancia con su importancia, contando siempre con el nivel correspondiente a una exigencia de seguridad mínima a considerar.

La conservación comporta dos vertientes diferenciadas; la preventiva y la correctiva. La primera, supone realizar el mantenimiento de las estructuras y equipos de forma más adecuada al objetivo de mantenerlos en condiciones de funcionamiento acordes con las prestaciones que se les exigen. Mientras que la segunda, supone unas obras de mayor envergadura que pueden ir desde la sustitución de elementos deteriorados o averiados hasta reparaciones de gran magnitud en la obra civil.

Ambas vertientes son necesarias para mantener las condiciones de funcionalidad, estética, confort y seguridad previstas en el diseño del proyecto o las que se pretendan implantar como necesaria mejora de aquéllas.

Las principales actuaciones que se plantean para la actualización de los sistemas de seguridad en túneles son: salidas de emergencia, sistemas de detección y extinción de incendios, adecuación de la estructura y alumbrado (López Guarga, 2010). Será sobre este último punto, sobre el que se incida en este estudio.

Las actuaciones incluidas en el Plan actual suponen una inversión del orden de 357 Millones de euros, aunque tras la pasada crisis y con criterios de austeridad habrá que

---

---

realizar una revisión más profunda del cumplimiento del Decreto 635/2006 (Ministerio de Fomento, 2006). y de la Directiva, identificando los problemas claves, definiendo las prioridades para implementar las medidas de seguridad necesarias, eligiendo medidas alternativas complementarias y armonizando una metodología de análisis de riesgo detallada y bien definida, en consonancia con las normas de buena práctica disponibles.

Adicionalmente, dentro de la propia Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) existen Comités de expertos dedicados al análisis de la operación de túneles de carreteras, cuya finalidad es el estudio y discusión de aquellos aspectos relacionados con la seguridad de dichos túneles, identificando, desarrollando y difundiendo las mejores prácticas de gestión de la seguridad en túneles. Una de las tareas de dicho grupo es la mejora de las verificaciones de seguridad, diseños y procedimientos que permitan garantizar los niveles necesarios de seguridad.

En estos Comités, hay grupos de trabajo que han realizado diferentes estudios e informes descriptivos de las diferentes prácticas de seguridad en varios países a nivel mundial. Uno de los objetivos de dichos estudios es el de evaluar la posibilidad de definir un marco global que tome en cuenta todos los aspectos relevantes relacionados con la seguridad funcional de un modo integrado.

La regulación actual requiere la realización de evaluaciones de riesgos, basados en análisis de riesgos probabilísticos o determinísticos, basados en escenarios, o una combinación de ambos. Sin embargo, no parece tener en cuenta la naturaleza y arquitectura de los propios elementos y sistemas (eléctricos, electrónicos, hidráulicos, neumáticos, etc.) encargados de garantizar la seguridad.

Asimismo, también es común, en este tipo de infraestructuras (VVAA, 2010), el empleo de componentes eléctricos/electrónicos para la realización de funciones de seguridad, en la mayor parte de las industrias o sectores de aplicación, se trata de sistemas, cuyo fallo podría tener un impacto en la seguridad de las personas, el ambiente y/o la propiedad, de igual forma los sistemas basados en computadores (también denominados sistemas de electrónica programable) que se han empleado habitualmente para realizar funciones no seguras, pero que actualmente su uso para este tipo de funciones está totalmente generalizado.

Existen un conjunto de estándares y normativas genéricas de seguridad, entre las que destaca la IEC 61508 y su trasposición a la legislación nacional UNE-EN 61508, que proporciona una guía para todas las actividades relacionadas con el ciclo de vida de la seguridad en aquellos sistemas compuestos por componentes eléctricos y/o electrónicos y/o electrónicos programables (sistemas E/E/PE) empleados para la realización de funciones de seguridad, donde la misma depende del funcionamiento

correcto de un sistema eléctrico (E), electrónico (E) y electrónico programable (PE) (abreviado: sistema E/E/PE).

En el sector de las infraestructuras viarias no se ha definido ninguna normativa específica en lo referente a la seguridad funcional hasta la fecha por lo que no existe una metodología suficientemente sistemática y unificada que prescriba las actividades necesarias para asegurar la seguridad funcional de los sistemas E/E/PE empleados para realizar funciones de seguridad. No obstante, en el entorno de los túneles, se está tratando con auténticos Sistemas Instrumentados de Seguridad (SIS) que afectan a la seguridad de las personas y de la propia infraestructura y como tales deben ser tratados.

Concretamente, los sistemas de detección de incendios, ventilación y los sistemas de cierre de barreras están compuestos actualmente por sistemas E/E/PE, a nivel de sensores, sistemas lógicos y actuadores.

Sobre la ventilación e incendios, diferentes autores (VVAA, 2010) consideran que las instalaciones deben de poder evacuar de forma segura y rápida los humos y gases que se producen tras un incendio de un vehículo en el interior de un túnel, todo ello encaminado a lograr la protección y huida de las personas que en ese momento puedan permanecer en el interior del mismo, el rescate de los que hubieren quedado y la posibilidad de permitir la llegada de los equipos de extinción al lugar del fuego, con el fin de fijar unos niveles de riesgo socialmente aceptables, lo que permitirá establecer las bases necesarias para la redacción de los oportunos modelos.

Definir correctamente el caso a estudiar con esos modelos debe ser un primer paso de cuidadoso análisis, pues se podrá lograr reducir incertidumbres en los problemas que con ellos pueden resolverse, debiendo tener en cuenta que los geométricos, tipos de combustión, materiales, situación de ventiladores en el momento del incendio...etc. son los que producirán mayores sensibilidades en la aplicación de esos modelos, por lo que deberán hacerse estudios precisos para que esos datos de entrada sean correctos.

La repercusión económica, de todos estos sistemas y modelos, en el coste total del metro de túnel debe de ser considerada, teniendo en cuenta que el sistema de ventilación obliga a secciones estructurales distintas y, por lo tanto, con sostenimientos y revestimientos de diferentes costes.

Lo que sí parece claro es que el futuro en los sistemas E/E/PE, encargados de la seguridad de los túneles, discurrirán por estos caminos, pero es necesario una metodología y normativa clara y de aplicación obligatoria para todos los túneles.

Los túneles presentan problemas diferenciados en lo que a su seguridad se refiere según su antigüedad. La necesidad de apoyarse en la experiencia de lo acontecido

---

---

incluso en los túneles que podríamos llamar históricos, sí permitirá diseños adecuados para poder satisfacer las exigencias de calidad requeridas como los niveles de seguridad adecuados (López Guarga, 2010), e incluso la adaptación de los túneles ya construidos a los diferentes niveles de seguridad que demande la técnica tunelera actual.

En este sentido, cabe recoger aquí los diversos congresos realizados desde 1994, con el fin de divulgar, analizar y proponer la experiencia adquirida en lo que a seguridad en túneles se refiere. De esta forma, en las primeras Jornadas de Gijón (VVAA, 1994) fueron importantes las reflexiones con relación a si los túneles deben revestirse o no con hormigón en masa, asunto que fue objeto de amplio debate, en caso de fuego el revestimiento sería una protección muy importante de la estructura resistente, incluido el propio terreno, lo que hace aconsejable la puesta en obra de un revestimiento en los túneles, y que constituye una práctica bastante habitual en los países más desarrollados de nuestro entorno, y muy frecuente en el nuestro, sobre todo en los casos de túneles con un elevado nivel de servicio. Cabe señalar que en un túnel largo siempre se debería proceder a su revestimiento interior ya que al mejorar su aspecto estético y circular el usuario por una obra bien terminada y conservada, guiado por una señalización adecuada, se reduce notablemente la sensación de claustrofobia que normalmente se produce.

El II Simposio de Jaca (VVAA, 1998), tras los cuatro años desde las primeras Jornadas, el número de túneles de nueva construcción había aumentado, como consecuencia del desarrollo de los distintos planes de infraestructuras. España estaba lanzada en su ambicioso plan de autovías y en la mejora sustancial tanto de la Red de Carreteras del Estado como de la perteneciente a las Comunidades Autónomas, con la ejecución el Plan Director de Infraestructuras 1993-2007, que además impulsa la construcción de una Red ferroviaria de alta velocidad, que va a requerir la construcción de numerosos túneles. Por otra parte la sociedad exige la mejora de los estándares de uso en todos los aspectos, siendo el más importante el de la seguridad.

Por ello en este Simposio se trató de analizar toda la problemática inducida por la explotación, conservación y reparación de túneles en servicio, quedando expresamente excluida la excavación de nuevos túneles, pero no la reforma y reacondicionamiento de los ya existentes. Se trató de cubrir un campo muy amplio que afectaba muy directamente a todas las personas y entidades implicadas en la gestión de túneles, influyendo en cuestiones tales como la gestión y seguridad del tráfico (especialmente el de mercancías peligrosas), la seguridad frente a incendios, la contaminación ambiental, la reglamentación de la iluminación, la señalización estática y dinámica, y la detección automática de incidentes. Todo esto quedó encuadrado en el gran marco que suponía la construcción del túnel hispano-francés de Somport (de

8.608 m de longitud), que en aquel entonces ya había culminado su perforación y estaban a punto de finalizar los trabajos de ingeniería civil y en fase muy avanzada de redacción el proyecto de instalaciones y equipamientos.

El III Simposio celebrado en Pamplona (VVAA, 2003), trataba de dar a conocer las novedades en el campo de la seguridad y la atención al usuario, aspectos que cada día se hacían más necesarios en cualquier tipo de túnel, máxime tras los desgraciados accidentes acaecidos en los de Montblanc, Tauern y San Gotardo. El futuro para los túneles viarios ya estaba definido y pasaba por la aplicación de las nuevas tecnologías, abordándose además la eficacia que los sistemas de seguridad instalados en un túnel tienen para la prevención, detección y evacuación, si fuese necesaria, de los usuarios. En concreto la iluminación, ventilación, señalización, infraestructuras de seguridad, circuitos cerrados de televisión (CCTV), radiocomunicaciones, Detección Automática de Incidentes (DAI), telefonía, detección de incendios, drenajes, la propia información al usuario, etc. estos fueron tema de reflexión y de debate en su momento, que hoy no lo son, ya que son sistemas regulados de obligado cumplimiento en función de la categoría del túnel (Real Decreto 635/2006, Ministerio de Fomento, 2006)

En este III Simposio, fue se resaltó, el amplio y documentado contenido en todo el espectro de las últimas investigaciones y desarrollos tecnológicos en el diseño y explotación de los túneles, y la eficacia de las nuevas tecnologías aplicadas a la seguridad. Por otro lado, los trágicos accidentes ocurridos en Mont Blanc, Tauern y San Gotardo, supusieron un revulsivo en la cultura del túnel, dando lugar a una revisión en profundidad de los conocimientos adquiridos e impulsando el desarrollo de nuevas normativas y proyectos de investigación relacionados con la seguridad de la obra subterránea, en especial aquellos que tienen como objetivo la prevención de sucesos críticos. También se abordó el tema de la explotación como factor determinante para mantener un nivel elevado de seguridad. Los nuevos equipamientos e instalaciones están introduciendo una creciente complejidad en la gestión del tráfico, que requiere para su manejo el conocimiento de los principios básicos que regulan su funcionalidad.

En otro sentido se vieron los avances en seguridad relacionados con la geometría, la estabilidad de las estructuras frente al fuego, las infraestructuras para la evacuación y auxilio de las personas, las instalaciones de detección y control de riesgos, el desarrollo de sistemas expertos de apoyo a la decisión para la gestión de crisis, y las técnicas de información a los usuarios. Se hace patente la necesidad de considerar la seguridad como un proceso integral que va desde el diseño de la obra hasta las medidas para orientar a los usuarios sobre su utilización, pasando por su construcción, puesta en funcionamiento y explotación, considerando la importancia del factor humano.

En el IV Simposio desarrollado en Andorra (VVAA, 2005), se debatió, entre otros asuntos, las directrices establecidas en el Libro Blanco de la Comisión Europea, y la

---

---

Directiva Comunitaria sobre Seguridad en Túneles (2004/54/CE), aprobada en abril de 2004, con el fin de armonizar las normas mínimas de seguridad y establecer las condiciones que garantizasen un alto nivel de seguridad para los usuarios de los túneles, especialmente los de la red transeuropea. Si bien, para alcanzar un alto grado de seguridad en los túneles es fundamental dotarlos de los más avanzados sistemas de equipamiento e instalaciones, todo ello abordado en la Directiva que establece dieciséis parámetros que se han de tener en cuenta a la hora de definir los proyectos. E igualmente la utilización de un Sistema Inteligente de Transporte y el establecimiento de una Documentación de Seguridad que describirá las medidas preventivas y la salvaguarda necesarias para garantizar la seguridad de los usuarios, y antes de la puesta en servicio del túnel deberá asegurarse la organización, los recursos humanos y materiales, y las instrucciones que aporte el gestor para garantizar su funcionamiento y mantenimiento.

El aprovechamiento de la experiencia adquirida a lo largo de la explotación, así como la realización de simulacros periódicos, permitirán reacciones rápidas y eficaces ante situaciones de emergencia que, por otra parte, deberán quedar recogidas en la redacción de un Plan de Intervención y Seguridad.

Las conclusiones del IV Simposio, en esta ocasión fueron presentadas por D. Emilio Leo Ferrando el cual resaltó los siguientes aspectos: *“Se ha constatado la creciente utilización de las nuevas tecnologías y de los sistemas inteligentes para incrementar la seguridad y la necesidad de disponer de un método determinista que permita la cuantificación de la seguridad en túneles”*. Es de destacar en este sentido la investigación de la comunidad científica para aplicar el método de cálculo estructural basado en los estados límites y coeficientes de seguridad a las instalaciones de ventilación.

De igual modo los métodos de análisis cuantitativos de riesgos se están manifestando de gran utilidad para evaluar las consecuencias ante las diferentes estrategias de explotación (paso de mercancías peligrosas o no, etc.) y facilitar la toma de decisiones. A partir de las experiencias europeas se ha avanzado en alcanzar un verdadero sistema de gestión de la seguridad. Estos aspectos, recogidos en la Directiva Comunitaria 2004/54/CE, se centran: en la implicación de todos los actores y la definición clara de sus responsabilidades, en la elaboración de un documento único de seguridad, en la exigencia de unas medidas y equipamientos mínimos, en la necesidad de disponer de una metodología de análisis de riesgos detallada y bien definida, en el establecimiento de procedimientos para verificar la seguridad antes de la puesta en servicio y durante la explotación y en la obligación de adquirir experiencia de los accidentes e incendios y de los ejercicios periódicos.

También se atendió a los diferentes materiales constituyentes de la obra civil en lo que atañe a la seguridad. Tradicionalmente el hormigón estructural se ha manifestado como un buen material frente al fuego, comportamiento que se puede mejorar con la aplicación de nuevos materiales en los revestimientos.

Así mismo se expusieron los avances tecnológicos en las instalaciones de seguridad (sistemas de diluvio, cobertura radioeléctrica, sistemas de radar avanzado para control de la velocidad, sistemas de detección precoz de incendios e incidentes) haciendo énfasis en la necesidad de integrar todos estos subsistemas en el sistema de gestión técnica centralizada, para la mayor eficacia de los mismos. En los casos de explotación centralizada de varios túneles se ha visto que una homogeneización de los equipamientos de seguridad y control garantiza una mejora en el mantenimiento y en la eficacia de la gestión.

Se recordó la importancia de la coordinación entre los trabajos de obra civil y de instalaciones, y la necesidad de comprobar, con ensayos de diferentes niveles la respuesta del conjunto de la obra, el estado de funcionamiento en situación de normalidad y de emergencia. Igualmente es de vital importancia la utilización de simuladores de diferentes escenarios de incidentes y emergencias, y la realización de simulacros previos a la apertura y durante la vida de la obra que verifiquen la integración de la ingeniería humana en el sistema túnel. Por otro lado los sistemas de gestión de incidencias son valiosos para la obtención de experiencias y la generación de conocimiento.

Otro aspecto, importante que se señaló, fue el hecho de que el túnel forma parte de la red de carreteras, por tanto cualquier incidente en el interior o en sus proximidades requiere la puesta en marcha de planes de gestión de tráfico que contemplen esta singularidad. Con el objetivo de informar a los conductores sobre las normas básicas de seguridad para circular por los túneles basadas en el análisis del estado de estas infraestructuras, la Comisión Europea ha apoyado el Programa de Evaluación de Túneles (EuroTAP) desarrollado por los principales clubes de automovilistas y viajeros.

Y por último, fueron interesantes los resultados de varios estudios experimentales sobre el comportamiento en túneles, que muestran, entre otras cosas, la sobrecarga mental que ejercen estas infraestructuras en los conductores.

Con la aprobación de la Directiva Comunitaria sobre Seguridad en túneles, y su trasposición con el Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, es cuando ya se hace obligatorio para los túneles en proyecto, en construcción y en servicio el cumplimiento de unas medidas que suponen una nueva cultura en la ingeniería de los túneles y exigen una relevante inversión al propietario de la infraestructura para lograr su adaptación al

horizonte del 2020 (Ministerio de Fomento 2005). Con los datos actuales, comentados anteriormente, algo más del 45 % de los túneles ubicados en la red principal del estado, están adaptados, cumpliendo los requisitos mínimos del Decreto 635/2006, por lo que el trabajo pendiente es aún importante.

Por ello en el V Simposio celebrado en Bilbao (VVAA, 2010), se analizaron algunos túneles para comprobar la metodología, singularidad y problemática a la hora de la adaptación de algunos túneles al (Real Decreto 635/2006, Ministerio de Fomento, 2006), debiendo ser muy exigente en los condicionantes que establece la normativa para la aprobación de los proyectos, del manual de explotación y para la autorización de la puesta en servicio de un túnel así como para sus modificaciones, siendo obligatoria la realización de simulacros periódicos. Otro aspecto importante, que se trató fue acotar las responsabilidades de los distintos intervinientes en todo el proceso de la vida de un túnel, desde su concepción hasta los momentos de la puesta en servicio y en explotación, principalmente en lo que al Responsable de Seguridad, Director de Explotación y Organismos de Inspección del túnel se refiere.

Por último se hace preciso también establecer un foro de discusión en relación al Análisis de Riesgo previsto en el citado Real Decreto y a su Metodología, en consonancia con las normas de buena práctica disponibles. Este Análisis de Riesgo deberá tener en cuenta todos los factores que afecten a la seguridad. Desde la publicación del Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado, prácticamente la totalidad de ellos se han adaptado a los requisitos establecidos en el mismo. Ello ha permitido acumular una experiencia importante sobre su seguridad y en especial, sobre la eficacia de las medidas establecidas. Dado que los criterios de seguridad y eficiencia, especificadas en la Orden FOM. 3317/2010 (Ministerio de Fomento 2010), referente a las instrucciones sobre las medidas específicas para la mejora de la eficiencia en la ejecución de las obras públicas de infraestructuras ferroviarias y de carreteras, por lo que también es necesario que el equipamiento de los túneles se adapte a estos criterios. Se trata, por tanto, de conseguir los objetivos de seguridad con las instalaciones y los medios que resulten más eficientes, teniendo en cuenta que el Real Decreto 635/2006 se aprobó en un momento en el que la situación económica era muy diferente de la actual.

Considerando asimismo que las tecnologías utilizadas en las instalaciones de seguridad de los túneles están en continuo desarrollo, resulta conveniente dotar de una mayor flexibilidad al establecimiento de las medidas que sean precisas para alcanzar el nivel de seguridad deseable en cada caso, manteniendo dentro de lo posible el criterio de uniformidad entre túneles similares.

En este sentido la reciente Orden circular 36/2015, sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles (Ministerio de Fomento 2015),

---

establece criterios (energéticos, técnicos, económicos, etc), cuya aplicación en la iluminación de túneles resultará eficaz, tal y como establece la Orden circular:

- Describiendo los elementos que componen una instalación, sus posibles alternativas y servir de ayuda en la elección de la solución a emplear, con la finalidad de conseguir la optimización de la misma, tanto desde el punto de vista de la inversión como de su posterior explotación.
- Estableciendo con qué criterios deben redactarse los proyectos de las instalaciones de iluminación y su contenido.
- Fijar las buenas prácticas sobre cómo deben ejecutarse las obras
- Establecer el método y los procedimientos para llevar a cabo el mantenimiento y explotación de las instalaciones, de forma que su gestión se realice de forma eficiente.
- Fijar los criterios de evaluación sobre lo que se debe hacer con las instalaciones existentes.

Por otra parte, en relación con el ámbito de aplicación, el Real Decreto 635/2006 consideró adecuado incluir todos los túneles de la Red de Carreteras del Estado, pertenecieran o no a la red transeuropea, con la finalidad de mantener la uniformidad en la Red, recogiendo así una de las consideraciones de la Directiva 2004/54/CE, que indica que *“Debe alentarse a los Estados miembros a que pongan en práctica niveles de seguridad comparables para los túneles de carretera situados en su territorio que no forman parte de la red transeuropea de carreteras y que, por lo tanto, no entran en el ámbito de aplicación de la presente Directiva.”*

Sin embargo, de manera análoga a lo que ha ocurrido en otros países europeos, se considera ahora, por razones de priorización que es más práctico que el Real Decreto sólo sea de aplicación a los túneles de una longitud superior a 500 m, de forma que los requisitos mínimos de seguridad de los túneles de menor longitud pasen a regularse en una norma de rango inferior.

Además, en este tiempo de aplicación del Real Decreto 635/2006, se han detectado algunos aspectos del mismo que requieren ser eliminados, aclarados o matizados, tales como los conceptos de túnel de la Red de Carreteras del Estado, túnel con riesgo de congestión o el concepto de grupo de túneles.

Por todo ello, se podría plantear, y así se ha entendido por parte de diversos compañeros y técnicos (LLopis, com. pers.) la modificación del Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, cambiando la redacción de algunos de sus artículos. En particular, respecto a la diferenciación de la longitud de los túneles en cuanto a sus

---

---

requerimientos de seguridad, para longitudes superiores a 500 m, o entre 200 y 500, así como la consideración de tramos con riesgo de congestión, la no exigencia de pavimento de hormigón en túneles de longitud superior a 1000 m, las necesidades de ventilación artificial, o la eliminación del concepto de grupo de túneles entre otros. No obstante, por ahora no se ha producido la revisión de dicha normativa.

Una forma de solucionar los problemas de seguridad, pasaría por concienciar a los mismos sobre los riesgos dentro del túnel para que lo contemplen como un lugar especial de circulación, ponerles en contacto experiencial con técnicas de extinción de fuegos, de control y de reducción de situaciones peligrosas y de escape, así como de pautas adecuadas de comportamientos concretos para incrementar la supervivencia. Los usuarios son receptivos a estas acciones (Blasco, Cornejo y Ferri-Anglada 2010) y a incorporar todo aquello que perciben importante para su seguridad. Además, como la probabilidad de los eventos negativos es muy baja se puede tener la sensación de exagerar en cuanto a su gestión. Pero cobra sentido cuando las consecuencias de tales eventos son potencialmente muy importantes. No hay más recompensa que la normalidad continuada. Por otra parte, seguridad y operatividad parecen inversamente relacionadas. La máxima seguridad es la paralización del sistema. Esos son los equilibrios críticos a gestionar.

### **1.5. Iluminación de túneles.**

Una inadecuada visibilidad de la vía, bien por defecto o bien por exceso de luz, es en general una de las principales causas de los accidentes en carretera. Las consecuencias negativas de esta mala visibilidad son aún más acusadas en los túneles, por lo que una instalación de alumbrado que proporcione una adecuada distribución luminosa sobre la vía será de vital importancia en estas infraestructuras. Este hecho no se ve paliado por la iluminación de los faros de los vehículos, ya que estos no proporcionan suficiente luz para circular por túneles con seguridad y confort. Además, hay que tener en cuenta que las consecuencias de un accidente de circulación suelen ser más graves en un túnel que en una carretera a cielo abierto (Blasco, Cornejo y Ferri-Anglada 2010).

Por tanto, antes de presentar los resultados y conclusiones de esta memoria, procede analizar en profundidad las instalaciones de alumbrado en túneles y la manera en la que proporcionan una adecuada visibilidad para una conducción segura en este tipo de infraestructuras.

El objetivo fundamental de las instalaciones de alumbrado en túneles consiste en permitir a los conductores la detección de vehículos y obstáculos permitiendo

reaccionar de modo efectivo y en tiempo adecuado sin producir maniobras bruscas e imprevisibles. El alumbrado de los túneles también proporciona un efecto de guiado para que los conductores no se salgan de la vía y contribuye a reducir el autodeslumbramiento originado por los faros de otros vehículos y por los del propio al aumentar la luminancia de fondo del campo visual, aún a costa de una reducción del contraste.

Una de las principales peculiaridades del alumbrado de túneles es la necesidad de proporcionar niveles de iluminación más altos durante las horas de luz natural que durante las horas nocturnas. Como se explicará más adelante, este hecho se debe al excesivo tiempo de adaptación visual del ojo humano al pasar de niveles de iluminación muy elevados como los que se dan en el exterior del túnel durante el día (visión fotópica) a otros considerablemente más bajos en el interior del túnel aún con los faros del vehículo encendidos (visión mesópica o, en túneles muy mal iluminados, escotópica).

Por esta razón, la instalación de alumbrado de un túnel es una de las más caras de cuantas se realizan en alumbrado exterior, tanto desde el punto de vista económico como desde el medioambiental. Los elevados niveles de iluminación exteriores debidos a la luz solar, que pueden llegar hasta 100.000 lux, han de ser compensados con elevados niveles de iluminación, al menos en la primera parte del túnel debido a la lentitud con la que se adapta nuestro sistema visual de la luz a la oscuridad.

Pese a esta necesidad de elevados niveles de iluminación durante el día, una instalación de alumbrado en túneles ha de ser energéticamente eficiente y a un coste razonable tanto en construcción como en cuanto a explotación y mantenimiento y, por supuesto, en consumo.

La necesidad de estos elevados niveles de iluminación da como resultado instalaciones que requieren una importante inversión en número de puntos de luz y un enorme consumo eléctrico. No se debe olvidar que una parte del alumbrado de un túnel está encendido las 8.760 horas del año, o lo que es lo mismo, casi el 50% de la vida útil de las lámparas de sodio de alta presión y casi el 33% de la vida media de las mismas. Además, los costes de explotación y de mantenimiento, debido este último a la sustitución de las fuentes de luz por agotamiento y pérdida de flujo luminoso con el paso del tiempo, son también muy considerables.

Pese a esta necesidad de elevados niveles de iluminación durante el día, una instalación de alumbrado en túneles ha de ser energéticamente eficiente y tener un coste razonable tanto en construcción como en explotación y mantenimiento.

### **1.5.1. Normativa sobre iluminación en túneles**

A la vista de los argumentos anteriores, es lógico que este tipo de iluminación esté exhaustivamente regulada por normas y documentos de referencia tanto nacionales como internacionales.

Así, en el año 1.999, la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento elaboró las hasta ahora vigentes “Recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles (Ministerio de Fomento 1999)”. Desde entonces han sido el marco de referencia, para el proyecto y ejecución de las instalaciones de iluminación en la Red de Carreteras del Estado.

- CIE 88:2004 Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores.
- Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, Sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de Carreteras del Estado.
- UNE-CR 14380:2007 IN Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles. Vigente. Fecha de edición 2007-09-26.
- Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07. Aprobado por Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre.
- CIE 189: 201 O Criterios de calidad de los cálculos de iluminación de túneles.

Como ocurre con todas las normas, debido a los avances técnicos que van apareciendo a lo largo del tiempo es necesario actualizarlas; y estas Recomendaciones no son ajenas a ese requerimiento.

Por una parte, han aparecido nuevas tecnologías de fuentes de luz como los diodos emisores de luz (LED), con una serie de ventajas muy importantes con respecto a otras fuentes de luz que se estaban utilizando actualmente, lo que requiere su consideración y regulación.

Por otra parte, el incremento del precio de la energía que se ha producido en los últimos años y la situación económica actual, han dado lugar a que el Gobierno de España haya promovido una serie de normas encaminadas al ahorro y la eficiencia energética, entre las que cabe resaltar:

-Reglamento de Eficiencia Energética en instalaciones de Alumbrado Exterior e Instrucciones Técnicas Complementarias (Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre de 2008).

-Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible Además, en el periodo transcurrido se ha elaborado nueva normativa a la que es necesario adaptarse:

- Reglamento electrotécnico para baja tensión (Real Decreto 84/2002)

Pero, además de estas normativas de corte energético, los organismos reguladores no pueden perder de vista el objetivo primordial de la seguridad de los usuarios de los túneles, por lo que otras normas de carácter más general como el Real Decreto 635/2006 (Requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado), también abordan con profusión tanto la iluminación en túneles como su señalización y balizamiento, elementos en los que la luz y la percepción visual juegan un papel preponderante.

En este sentido, en el año 2004 la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) elaboró el informe técnico "CIE 88:2004. Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores", que establece nuevos criterios a tener en cuenta en el alumbrado de túneles, que pretenden conseguir la máxima eficiencia energética y ahorrar consumo en la medida de lo posible. Este documento de referencia a nivel internacional ha sido el modelo para las normativas nacionales en materia de iluminación en túneles como la norma española UNE-CR 14380 IN: Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles.

Por todo ello, la Dirección General de Carreteras ha estimado que había llegado el momento oportuno para proceder a la actualización de las Recomendaciones citadas anteriormente, si bien en este caso se ha considerado conveniente llevarla a cabo en dos documentos diferentes, uno para carreteras a cielo abierto y otro para túneles, ya que de esta forma se facilita su aplicación y además se sigue la tendencia que existe mayoritariamente en los países de nuestro entorno Orden Circular 36/2015, sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles (Ministerio de Fomento 2015).

Aunque, como mencionábamos, el contenido de la CIE 88:2004 se reproduce en la inmensa mayoría de las normativas nacionales, hay que hacer notar ciertas diferencias fundamentales entre este documento (que no tiene rango de norma) y la norma de la Dirección General de Carreteras de 1999. En este sentido, la más importante es el establecimiento del tiempo de reacción para el cálculo de la distancia de parada que, en el documento CIE es 1s mientras que para la Dirección General de Carreteras es de 2s.

Esta diferencia tiene como consecuencia el establecimiento de distintas longitudes para las zonas en las que se dividen los túneles desde el punto de vista de la iluminación y que pasamos a detallar a continuación.

---

---

### 1.5.2. Zonificación lumínica en túneles

Debido al mencionado problema de la adaptación visual, hemos visto que los túneles necesitan elevados niveles de iluminación durante el día, lo cual redundaría en un extraordinario impacto económico, energético y medioambiental. Por tanto, procede diseñar instalaciones que permitan un descenso gradual de dichos niveles sin comprometer la seguridad dentro del túnel. Este descenso viene determinado por el propio proceso de adaptación visual del ojo humano al pasar de ambientes muy luminosos (visión fotópica) a otros más tenues (visión mesópica o escotópica) y resulta en el establecimiento de cinco zonas lumínicas en túneles largos.

Así pues, según el documento CIE 88:2004, podemos dividir los túneles en varias zonas según los requerimientos lumínicos: zona de acceso, zona de umbral, zona de transición, zona interior y zona de salida.

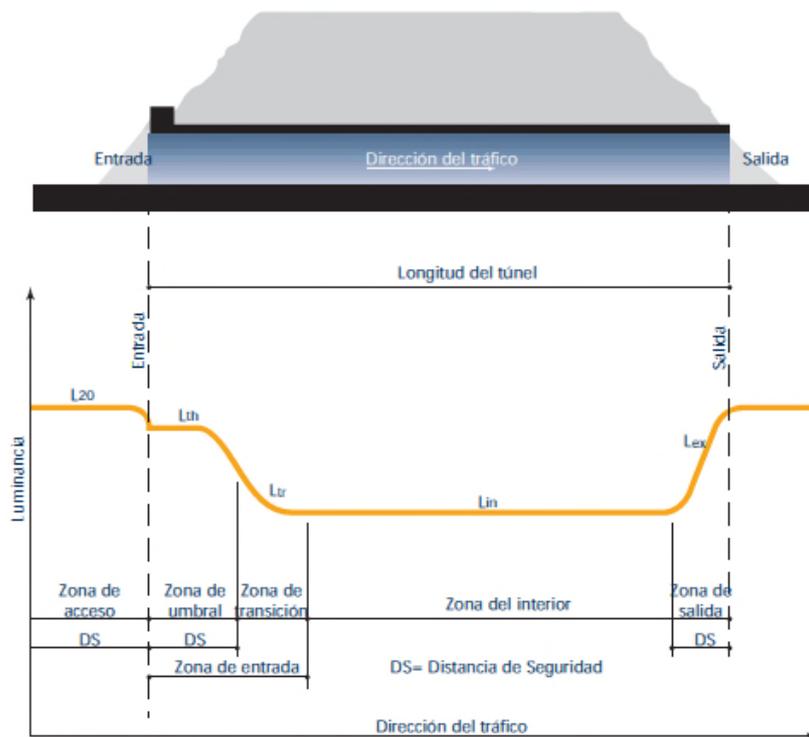


Figura 4. Niveles de luminancia requeridos en un túnel de tráfico unidireccional.

Fuente: García Fernández s.f.

**Luminancia en la zona de acceso:** es la zona de acceso es la parte de la carretera a cielo abierto, situada inmediatamente anterior a la entrada o portal del túnel, que cubre la distancia a la que un conductor que se aproxima debe ser capaz de ver en el interior del túnel. La longitud de la zona de acceso es igual a la distancia de seguridad (DS), tal y como se ha indicado en la Fig. 4.

El valor de luminancia necesario al comienzo de la zona de umbral tiene que basarse en el valor de la luminancia en la zona de acceso  $L_{20}$  a una separación delante del túnel igual a la distancia de seguridad (DS). Bajo idénticas condiciones de luz diurnas, los túneles con distintas zonas de aproximación y alrededores (distinta orografía, entorno, etc.) tendrán valores considerablemente diferentes de luminancia en la zona de acceso  $L_{20}$ .

Para diseñar y proyectar la instalación de alumbrado de un túnel se necesita conocer el valor máximo de  $L_{20}$  que tiene lugar con una frecuencia suficiente durante todo el año, a una separación delante del túnel igual a la distancia de seguridad (DS).

Como en la mayoría de los casos este valor  $L_{20}$  depende de las condiciones estacionales y del tiempo meteorológico, se utilizan dos métodos empíricos simplificados para la evaluación de  $L_{20}$ . A continuación exponemos dos métodos para calcular la luminancia en la zona de acceso.

Existe un **primer método de aproximación** que da solamente una indicación aproximada, y únicamente debe utilizarse cuando no exista información suficientemente detallada acerca de los alrededores inmediatos de la boca de entrada del túnel. Este método consiste en la elección de la luminancia de la zona de acceso mediante la Tabla 8 expresada en  $K_{cd}/m^2$  ( $103 \text{ cd}/m^2$ ).

LUMINANCIA MEDIA DE LA ZONA DE ACCESO  $L_{20}$  ( $K_{cd}/m^2$ )

TIPOS DE VÍAS	PORCENTAJE DE CIELO (%) EN LOS CAMPOS DE VISIÓN CÓNICOS A 20°															
	35%				25%				10%				0%			
	NORMAL		NIEVE		NORMAL		NIEVE		NORMAL		NIEVE		NORMAL		NIEVE	
	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A
Situación de brillo en el campo de visión	(1)		(1)		(1)		(1)		(2)		(3)		(2)		(3)	
Distancia de seguridad 60 m	(4)		(4)		4	5	4	5	2,5	3,5	3	3,5	1,5	3	1,5	4
Distancia de seguridad 100 a 160 m	4	6	4	6	4	6	4	6	3	4,5	3	5	2,5	5	2,5	5

**Tabla 1. Niveles de luminancia requeridos en un túnel de tráfico unidireccional.**

Fuente: García Fernández s.f.

Para el método exacto, la luminancia de la zona de acceso  $L_{20}$  es la luminancia media contenida en un campo cónico de visión que subtende un ángulo del 20%, con el vértice en la posición del ojo del conductor, situado a una distancia anterior al túnel igual a la distancia de parada, y orientado el cono hacia el portal de túnel sobre un punto situado a una altura de 1/4 de la boca del túnel.

El **cálculo exacto**, para la determinación de la luminancia de la zona de acceso  $L_{20}$ , tiene una gran transcendencia, ya que es la que predetermina el nivel a obtener

$$L_{20} \approx \gamma L_S + \rho L_R + m L_M + b L_B$$

mediante el alumbrado en la zona umbral. Dicha luminancia de la zona de acceso depende de las condiciones atmosféricas del lugar donde está situado el túnel. El cálculo de la luminancia de la zona de acceso  $L_{20}$  se obtiene a partir de un croquis de los alrededores de la zona del túnel y se utiliza la fórmula de la Ecuación 1.

Ecuación 1. Cálculo de la  $L_{20}$ 

Driving direction (North Hem.)	$L_c$ (kcd/m <sup>2</sup> )	$L_r$ (kcd/m <sup>2</sup> )	$L_e$ (kcd/m <sup>2</sup> )			
			Concretes	Buildings	Snow	Meadow
N	8	8	3	8	15	2
E-W	12	4	2	6	10 (V) 15 (H)	2
S	16	5	1	4	5 (V) 15 (H)	2

Tabla 2. Contribución de la  $L_{20}$  a un campo cónico de 20°. Fuente: CIE Publ. 88

**Iluminación en la zona umbral:** Tal y como se representa en la Fig. 4, la entrada del túnel consta de la zona de umbral, la cual es la más próxima a la boca del mismo.

La zona de umbral es la primera parte del túnel ubicada directamente después del portal, comenzando, por tanto, en la boca del mismo.

El nivel de luminancia  $L_{th}$  (luminancia media en servicio de la superficie de la calzada con mantenimiento de la instalación), que debe ser proporcionado por el alumbrado durante el día al comienzo de la zona de umbral, es un porcentaje de la luminancia de la zona de acceso  $L_{20}$ , de forma que se verifica la Ecuación 2.

$$L_{th} = k L_{20}$$

Ecuación 2. Nivel de luminancia

SISTEMA DE ALUMBRADO	CONTRAFLUJO			SIMÉTRICO		
Clase de alumbrado	Distancia de Seguridad (DS)			Distancia de Seguridad (DS)		
	60 m	100 m	160 m	60 m	100 m	160 m
1	10	15	30	15	20	35
2	15	20	40	20	25	40
3	20	30	45	25	35	45
4	25	35	50	30	40	50
5	30	40	55	35	50	65
6	35	45	60	40	55	80
7	40	50	70	50	60	100

**Tabla 3. Valores de  $k \cdot 10^3$  para la zona de umbral**

SUMA DE FACTORES DE PONDERACIÓN	FACTOR DE PONDERACIÓN
0-3	1
4-5	2
6-7	3
8-9	4
10-11	5
12-13	6
14-15	7

**Tabla 4. Clases de alumbrado para túneles largos**

El factor  $k$  se establece (Tabla 3). teniendo en cuenta el sistema de alumbrado adoptado (contraflujo o simétrico), la distancia de seguridad (DS) y la clase de alumbrado definido en la (Tabla 4) en función de los factores de ponderación (intensidad y composición del tráfico, guiado visual y confort en la conducción de vehículos).

La longitud de la zona de umbral debe ser como mínimo igual a la distancia de seguridad (DS). En la primera mitad de dicha distancia (DS), la luminancia en la calzada será igual a  $L_{th}$ , es decir, el valor al comienzo de la zona de umbral.

A partir de la mitad de la distancia de seguridad (DS), la luminancia de la calzada puede disminuir gradual y linealmente hasta un valor, al final de la zona de umbral, igual a  $0,4 L_{th}$  (Fig. 5). La reducción gradual en la segunda mitad de la zona de umbral puede realizarse de forma escalonada, de manera que la relación entre escalones no exceda de la relación 3:1 y la luminancia no caiga por debajo de los valores correspondientes a la disminución gradual lineal.

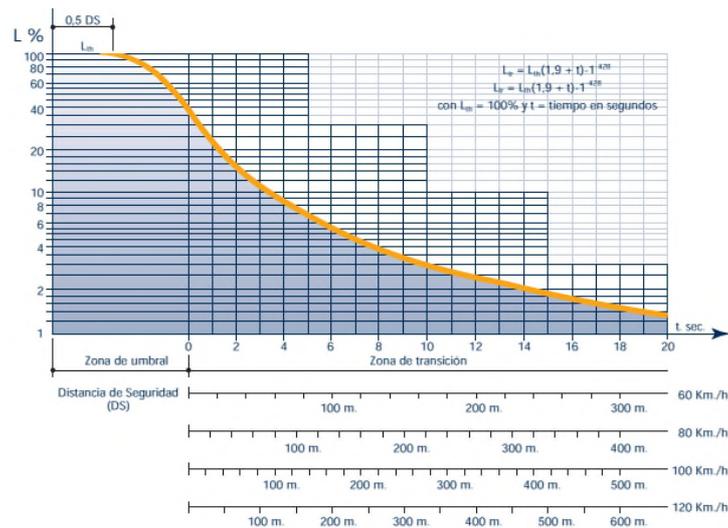


Figura 5. Representación esquemática del nivel de iluminación en las distintas zonas de entrada

La **luminancia media de las paredes** en la zona de umbral, hasta una altura de 2 m., debe ser similar a la luminancia media de la superficie de la calzada.

La **zona de transición** es la parte del túnel que sigue a la zona de umbral, tal y como se indica en la Fig.4 . Por tanto, comienza al final de la zona de umbral y termina al inicio de la zona del interior.

De conformidad con la Fig. 5, la longitud de la zona de transición es la distancia que debe recorrer un vehículo para pasar, adoptándose visualmente, desde el nivel de luminancia del final de la zona de umbral, hasta el valor de la luminancia en el comienzo de la zona del interior. En consecuencia, para cada velocidad del vehículo la reducción permisible de la luminancia en la zona de transición  $L_{tr}$ , es función de la distancia recorrida en la mencionada zona.

La luminancia media en servicio de la calzada con mantenimiento de la instalación de la zona de transición  $L_{tr}$  disminuye gradualmente, desde la luminancia de la zona de umbral hasta la luminancia de la zona del interior. En cualquier posición en la zona de transición, la luminancia de la superficie de la calzada debe ser igual o exceder a la luminancia establecida en la Fig. 5.

La curva de la Fig. 5 es el resultado de numerosas pruebas experimentales en función de la adaptación del ojo desde altos niveles de luminancia a valores muy bajos que han dado lugar a una aproximación matemática que responde a la Ecuación 3.

$$L_{tr} = L_{th} (1.9 + t)^{-1.428}$$

Ecuación 3. Curva de iluminación en las distintas zonas de entrada

**Iluminación de la zona del interior:** la zona del interior es la parte del túnel que sigue directamente a la zona de transición. Su longitud viene dada por la distancia existente entre el final de la zona de transición y el comienzo de la zona de salida. Los niveles de la luminancia  $L_{in}$  de la zona del interior del túnel, que son constantes a lo largo de dicha zona, puesto que ha finalizado la adaptación del ojo desde los altos valores luminosos del exterior, se establecen en la Tabla 5 en función de la distancia de seguridad (DS) y de la clase de alumbrado definido en la Tabla 4.

Hasta una altura de 2 m., las paredes del túnel deben tener una luminancia media similar a la luminancia media en servicio de la calzada con mantenimiento de la instalación  $L_{in}$ . El nivel de luminancia en la zona del interior del túnel debe permitir alcanzar los siguientes objetivos:

- Visibilidad de cualquier obstáculo eventual sobre la calzada a una distancia como mínimo igual a la distancia de seguridad, teniendo en cuenta la opacidad de la atmósfera del túnel debido a los gases de escape de los vehículos.
- Guiado sin ambigüedades de los vehículos.
- Buena calidad del ambiente luminoso, cuyo efecto psicológico es importante sobre todo en los túneles muy largos.

Se debe señalar que los niveles de la zona del interior se consiguen en toda la longitud del túnel, igualmente en las denominadas zonas de refuerzo del alumbrado (zona de entrada y, en su caso, de salida), donde a esta iluminación se le denomina alumbrado base.

SISTEMA DE ALUMBRADO	DISTANCIA DE SEGURIDAD (DS)		
	60 m	100 m	160 m
1	0,5	2	3
2	1	2	4
3	2	3	5
4	2	3	6
5	2	4	6
6	3	5	8
7	3	6	10

Tabla 5. Iluminancias en  $cd/m^2$  en la zona del interior

**Iluminación de la zona de salida:** la zona de salida es la parte del túnel en la que, durante el día, la visión del conductor está influida predominantemente por la elevada luminancia exterior del túnel. La zona de salida comienza al final de la zona del interior y termina en la boca de salida del túnel.

---

---

En la zona de salida del túnel debe establecerse un nivel de luminancia  $L_{ex}$  en la calzada, para iluminar directamente los vehículos, de forma que los más pequeños resulten visibles en la zona de salida del túnel, dado que sin reforzamiento del alumbrado por encima de los niveles de la zona del interior  $L_{in}$ , permanecerían ocultos detrás de los vehículos grandes, debido al deslumbramiento originado por la luz diurna de salida del túnel.

Asimismo, dicha luminancia media en servicio de la calzada con mantenimiento de la instalación  $L_{ex}$  de la zona de salida del túnel, posibilita a los conductores de los vehículos que están saliendo del mismo tener suficiente visión, a través de los espejos retrovisores, de la parte posterior o trasera del vehículo, particularmente cuando la distancia entre vehículos sea corta (intensidad de tráfico elevada).

Todo ello, aún teniendo en cuenta que pasar de una luminancia interior  $L_{in}$  débil a una luminancia en el exterior del túnel elevada, la adopción del ojo del conductor es muy rápida y en general no plantea problemas para el usuario.

Sin embargo, en los túneles largos unidireccionales cuya clase de alumbrado sea 6 y 7, de acuerdo con lo dispuesto en la (Tabla 4), la luminancia en la zona de salida  $L_{ex}$  deberá aumentar linealmente a lo largo de una longitud como mínimo igual a la distancia de seguridad (DS), a partir de la luminancia de la zona del interior, a un nivel 5 veces superior al de la zona del interior ( $L_{ex} = 5 L_{in}$ ) a una distancia de 20 m., antes de llegar a la boca o portal de salida del túnel. El aumento lineal de la luminancia podrá realizarse escalonadamente de forma que la relación entre escalones no exceda de la relación 3:1 en una longitud, como mínimo, igual a la distancia de seguridad (DS).

En los casos de túneles unidireccionales cuyas clases de alumbrado sean 1 a 5 ambas inclusive, la zona de salida tendrá la misma luminancia que la zona del interior del túnel ( $L_{ex} = L_{in}$ ), no requiriéndose alumbrado adicional sobre el previsto en la zona del interior. No obstante, con independencia de la clase de alumbrado que corresponda al túnel, en ciertos casos particulares de túneles unidireccionales, donde existan serios riesgos de molestia y deslumbramiento a la salida, debido por ejemplo a la orientación del túnel o a las incomodidades ocasionadas por la salida y ocaso del Sol, deberá reforzarse el alumbrado de la zona de salida del túnel en las condiciones establecidas para los de clase de alumbrado 6 y 7.

Antes de establecer la iluminación necesaria en la **entrada del túnel o zona de acceso** (García Fernández s.f.), debemos determinar el nivel medio de luminancia en la zona de acceso o luminancia externa de adaptación. Esta magnitud se calcula a partir de las luminancias de los elementos del campo visual del observador como puedan ser el cielo, los edificios, las montañas, los árboles, la carretera, etc. y su valor oscila entre 3000 y 10000 cd/m<sup>2</sup>.

---

En zonas llanas y descubiertas donde el cielo ocupa la mayor parte del campo visual podemos tomar un valor máximo de 8000 cd/m<sup>2</sup>. Mientras en las zonas montañosas o edificadas donde cobran mayor importancia las luminancias de los edificios, las montañas, la carretera o los árboles se adopta un valor de 10000 cd/m<sup>2</sup>.

Sin embargo, estos valores orientativos no excluyen de un cálculo más riguroso de la luminancia de la zona de acceso siguiendo las recomendaciones y normas vigentes (CIE Publ. 1988).

Para proporcionar al conductor una información visual adecuada en la entrada del túnel, la iluminación debe ser por lo menos un 10% de la luminancia de la zona de acceso en un tramo de longitud aproximadamente igual a la distancia de frenado del vehículo (entre 40 y 80 m para velocidades comprendidas entre 50 y 100 km/h). Como aún así la luminancia necesaria es muy alta y supone un consumo importante de energía, se pueden intentar rebajar aplicando medidas especiales.

La primera de ellas es rebajar el límite de velocidad en el túnel y hacer que los vehículos usen sus propias luces. De esta manera se facilita el proceso de adaptación y se reduce la distancia de frenado y por tanto la longitud de la **zona de umbral**. Asimismo, conviene emplear materiales no reflectantes oscuros en calzada y fachadas en la zona de acceso para rebajar la luminosidad y otros claros con propiedades reflectantes de la zona de umbral para maximizarla. También es conveniente evitar que la luz directa del Sol actúe como fondo de la entrada del túnel. A tal efecto conviene cuidar la orientación geográfica, maximizar el tamaño de la entrada, plantar árboles y arbustos (objeto del siguiente capítulo) que den sombra sobre la calzada, usar paralúmenes, etc. En estos últimos casos hay que tener cuidado en regiones frías porque en invierno pueden favorecer la aparición de hielo en la calzada además de otros problemas. Por último, es posible crear una zona iluminada con farolas antes de la entrada para favorecer la orientación visual y atraer la mirada del conductor hacia el túnel.

Como al llegar al final de la zona de umbral el nivel de luminancia es todavía demasiado alto, se impone la necesidad de reducirlo hasta los niveles de la zona central. Para evitar los problemas de adaptación, esta disminución se efectúa de forma gradual según un gradiente de reducción o en su defecto una curva escalonada con relaciones de 3:1 entre luminancias. Estas curvas, obtenidas empíricamente, dependen de la velocidad de los vehículos y la diferencia entre las luminancias de las zonas umbral e interior.

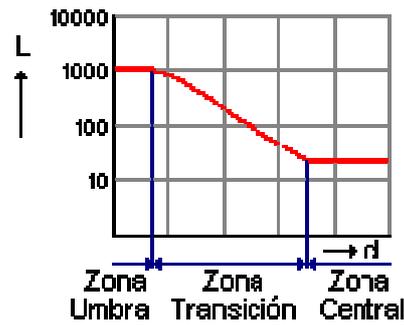


Figura 6. Curva de reducción de la luminancia. Fuente: García Fernández s.f.

En la **sección central** de los túneles el nivel de luminancia se mantiene constante en valores bajos que rondan entre 5 y 20  $\text{cd/m}^2$  según la velocidad máxima permitida y la densidad de tráfico existente. Es conveniente, además, que las paredes tengan una luminancia por lo menos igual a la de la calzada para mejorar la iluminación en el interior del túnel.

**En la salida** las condiciones de iluminación son menos críticas pues la visión se adapta muy deprisa al pasar de ambientes oscuros a claros. Los vehículos u otros obstáculos se distinguen con facilidad porque sus siluetas se recortan claramente sobre el fondo luminoso que forma la salida. Esto se acentúa, además, si las paredes tienen una reflectancia alta. En estas condiciones, la iluminación sirve más como referencia y basta en la mayoría de los casos con unas 20  $\text{cd/m}^2$  para obtener buenos resultados.

En ausencia de luz diurna, **iluminación nocturna**, iluminar un túnel resulta mucho más sencillo. Basta con reducir el nivel de luminancia en el interior del túnel hasta el valor de la iluminación de la carretera donde se encuentra o si esta no está iluminada que la relación entre las luminancias interior y exterior no pase de 3 a 1 para evitar problemas de adaptación. En este último caso se recomienda un valor aproximado entre 2 y 5  $\text{cd/m}^2$ . Hay que tener en cuenta que aunque no se presente el efecto del agujero negro en la entrada sí se puede dar en la salida. Por ello es recomendable iluminar la carretera a partir de la salida durante un mínimo de 200 m para ayudar a la adaptación visual.

### 1.5.3. Equipos de alumbrado en túneles

Los equipos de alumbrado en túneles emplean fuentes de luz que se caracterizan por una elevada eficacia luminosa y larga vida útil. Por este motivo, tradicionalmente se han utilizado lámparas de vapor de sodio a baja presión que, debido a su pobre reproducción cromática y excesivo tamaño fueron sustituidas por lámparas de sodio a alta presión, que son las más empleadas actualmente. En los últimos tiempos se ha considerado el empleo de luminarias tipo LED, pero sus prestaciones fotométricas y su

elevado precio permiten su uso únicamente en la zona interior del túnel, siendo inviables por el momento en la zona umbral, que es la de mayor consumo energético.

La distribución de las luminarias es muy importante y varía según la zona del túnel considerada; ha de garantizar una distribución uniforme de la luz sobre la calzada, el control del deslumbramiento, el nivel de luminancia, etc. Pero además, los túneles presentan una dificultad añadida, el efecto del parpadeo o flicker (García Fernández s.f.), el cual se produce por la aparición sucesiva de zonas claras y oscuras ante el conductor que puede llegar a sentir una sensación de molestia e incluso mareo debido a una baja uniformidad de las luminancias en el túnel. Este efecto de parpadeo se produce por cambios periódicos de los niveles de luminancia (unos reflejos, unas lámparas...) en el campo visual según unas frecuencias críticas (entre 2,5 y 15 ciclos/segundo) que provocan incomodidad y mareos y se evita colocando las luminarias adecuadas con una separación adecuada.

Como las condiciones de iluminación en el exterior varían con la climatología y con las horas del día es conveniente instalar un sistema de regulación automática de la iluminación interior. Esta se hace gradualmente, con variaciones entre los estados inicial y final inferiores a 3 a 1. Para simplificar, se distingue entre tres niveles de iluminación: diurno, nocturno y crepuscular para los días nublados (García Fernández s.f.).

Es necesario disponer, además, de un sistema de alumbrado de emergencia que garantice unos niveles mínimos de iluminación en caso de apagón. En este sentido hay que garantizar por lo menos el funcionamiento de una de cada tres luminarias.

Para mantener en buenas condiciones el sistema de iluminación del túnel y conservar unos niveles óptimos es necesario realizar una serie de operaciones periódicamente como la sustitución de las lámparas o la limpieza de las luminarias, paredes y calzada. Además de contar con un sistema de ventilación eficaz que evacue los humos, gases de escape y partículas en suspensión que dispersan la luz. Asimismo, para maximizar la iluminación en el interior del túnel conviene que el techo, las paredes y la calzada sean de materiales con alta reflectancia pero sin brillos, fáciles de limpiar y resistentes a las agresiones.

Tal y como veremos en el punto 3. *“Consumo energético del alumbrado de túneles en autovías de alta capacidad”* El tratamiento de las zonas de emboquille de los túneles de carretera es un tema de máximo interés desde un punto de vista de la integración paisajística, el ahorro energético en el alumbrado eléctrico y, en definitiva, del medio ambiente sostenible (Peña-García, López, y Grindlay, 2015). Siendo importante analizar el binomio "ahorro energético - integración paisajística", ya que el enorme consumo de energía debido a la iluminación eléctrica de los túneles largos por

carretera, su impacto financiero, ambiental y la tecnología de iluminación hacen de este tema una de las prioridades de los túneles del futuro. De hecho, este impacto no se refiere sólo al consumo de energía, sino también al de materiales eléctricos y su reciclaje (mayor consumo, más luminarias para instalar). Aunque el tratamiento del medio ambiental del túnel y la vegetación con las especies precisas pueden disminuir dicho consumo, la integración de estas especies en el paisaje es también un tema de especial relevancia, siendo necesaria en los tiempos actuales su estudio y consideración.

### **1.6. Principales problemáticas asociadas a los túneles en autovías de última generación.**

A tenor de la información precedente, queda claro que la ingeniería de túneles es una materia multidisciplinar. Desde la concepción y nacimiento de los primeros túneles, hasta su desarrollo en nuestros días, parece ponerse mayor énfasis en la seguridad de los usuarios, pero también se puede observar que pocos han sido los avances en lo que a sostenibilidad energética del túnel se refiere.

En este sentido, cabe destacar los trabajos sobre aprovechamiento de la luz solar para disminuir el consumo eléctrico de la iluminación de los túneles llevados a cabo por los profesores Peña García, Gil Martín y Hernández Montes, de la Universidad de Granada (España). En paralelo, se ha abierto otra línea de investigación encaminada a la disminución de las necesidades lumínicas de los túneles, compatible con las estrategias de aprovechamiento de la luz solar, dentro de la cual se encuadra la presente Tesis Doctoral. A continuación se esbozan brevemente ambas líneas de trabajo para desarrollar en profundidad la segunda en el apartado “Resultados”.

En cuanto a la primera línea de trabajo, en los últimos tiempos han despertado gran interés los intentos de aprovechar la luz solar en la zona umbral de los túneles, con ahorros teóricos cercanos al 40%. Entre las técnicas propuestas para tal fin, destacan dos:

1. Desplazamiento parcial o total de la zona umbral fuera del túnel mediante estructuras de transición lumínica para aprovechar la luz solar. Esta estrategia puede llevarse a cabo con estructuras semitransparentes de tipo tensado (Peña-García y otros, 2010; Gil-Martín y otros, 2011; Peña-García y otros., 2011; Peña-García y otros, 2012), con pérgolas (Peña-García y Gil-Martín, 2013; Gil-Martín y otros, 2015; Peña-García y otros, 2015) o con otros tipos de estructuras (García-Garay y otros, 2012; García-Garay, 2015). En todos los casos se consigue un ahorro real pese a la desventaja de alargar el túnel, pues este

gasto es rápidamente amortizable a expensas del ahorro energético. El desarrollo de la Ecuación ESTS (Energy Saving under Tension Structures) en 2011 (Peña-García y otros, 2011) permitió además deducir teóricamente qué tipo de estructura de desplazamiento de zona umbral proporcionará mayores ahorros energéticos en cada túnel concreto.

2. Instalación de tuberías conductoras de luz (lumiductos) capaces de captar y distribuir la luz solar dentro del túnel. En este caso no se alarga el túnel, sino que se introduce la luz dentro del mismo. El estudio de la aplicación de los lumiductos a los túneles de carretera, en el que el equipo solicitante es pionero, arroja significativos ahorros energéticos en maquetas a escala (Gil-Martín y otros, 2014) y ha despertado un vivo interés entre investigadores de todo el mundo.

Con respecto a las estrategias para la disminución de los requisitos lumínicos, en la actualidad se trabaja en la completa vegetación de los alrededores del portal con determinadas especies vegetales (López y otros, 2014; Peña-García y otros, 2015) ya que, como se apuntaba en la introducción, la luminancia requerida dentro de un túnel depende de la exterior que, a su vez, está fuertemente influenciada por la reflectancia de los alrededores del propio túnel.

Por todo ello es importante analizar los problemas con consecuencias energéticas que representan los túneles para los vehículos en condiciones de día o de noche (García-Fernández, s.f.; Peña-García, López, y Grindlay, 2015), que además del mantenimiento necesario o las características de los equipos de alumbrado a instalar, destaca, por su especial interés, los consumos energéticos que se nos están manifestando en la actualidad.

Cuando nos aproximamos a un túnel de día, la primera dificultad que encontramos es con **la adaptación visual**, que requiere un consumo energético de la instalación de alumbrado mucho mayor durante el día que durante la noche. Como se ha mencionado anteriormente, esto se debe a la lentitud del proceso de adaptación visual cuando el ojo humano pasa de ambientes muy luminosos (las denominadas condiciones fotópicas) a ambientes menos luminosos (condiciones escotópicas) tal y como se muestra en la Fig. 7.

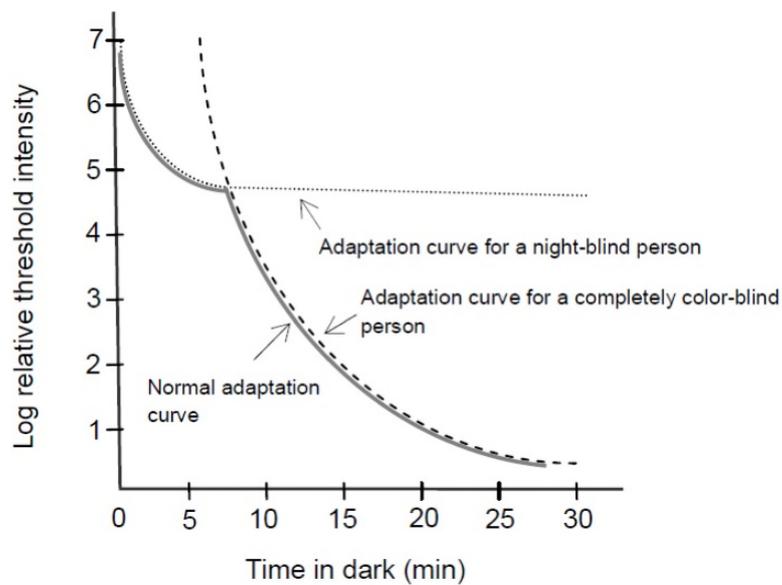


Figura 7. Curva de adaptación visual del ojo humano (condiciones fotópicas a escotópicas).

El análisis de la Fig. 7 muestra que un conductor que, procedente de un exterior con elevada luminancia (la luminancia es una magnitud que cuantifica la cantidad de luz en una dirección determinada), penetre en un túnel pobremente iluminado (paso de una luminancia aproximada de 4000 cd/m<sup>2</sup> a otra del orden de 5 cd/m<sup>2</sup>), tardaría varios minutos en adaptarse a las nuevas condiciones lumínicas. Durante este tiempo tendría una paupérrima percepción visual de la vía pese a los faros de su vehículo, lo cual resulta inaceptable si consideramos que la velocidad de circulación típica en túnel oscila entre los 22 y los 28 m/s.

Además, al problema de la adaptación visual hay que sumar otros no menos importantes y también dependientes de la iluminación del túnel, como es **el efecto agujero negro**, donde la entrada se nos presenta como una mancha oscura en cuyo interior no podemos distinguir nada. Este problema, que se presenta cuando estamos a una distancia considerable del túnel, se debe a que la luminancia ambiental en el exterior es mucho mayor que la de la entrada. Esto es lo que se denomina el fenómeno de la **inducción**.

La inducción (García Fernández s.f.) se produce cuando no es posible distinguir un objeto de otros a su alrededor por mucho tiempo que se mire. Esto se debe a que su luminancia es muy inferior a la del campo de distribución de luminancias del resto de objetos del campo visual. Dicho de forma sencilla, es un problema de contrastes de luminancias entre un cuerpo y el resto del campo visual.

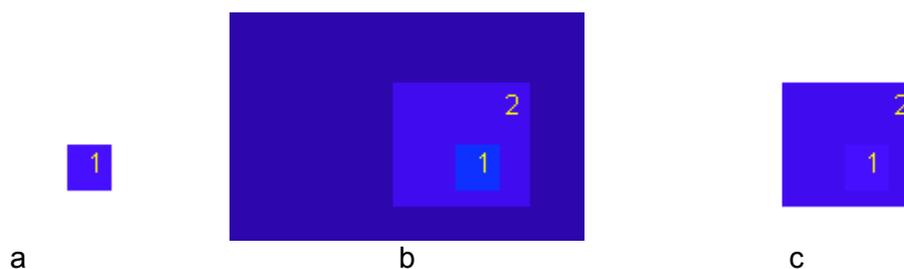


Figura 8. Fenómeno de la inducción. Fuente: García Fernández s.f.

Observemos la Fig. 8, en ella vemos un cuadrado azul con el número 1 sobre un fondo blanco. Podemos distinguirlo fácilmente porque el contraste es muy grande. En la figura b, nuestro cuadrado se halla dentro de otro, el número 2, sobre un fondo azul oscuro y si nos fijamos podemos distinguirlos aunque sean de colores similares. Pero en la figura c, uno y dos están sobre un fondo blanco. A simple vista, cuesta distinguir un poco a uno porque el contraste entre dos y el fondo blanco predomina sobre el que hay entre los cuadrados 1 y 2.

Esto es lo que pasa en los túneles. Cualquier objeto situado en su interior tiene una luminancia muy baja comparada con la de otros objetos que ocupan el campo visual (el cielo, las montañas, la carretera, etc.) pero similar a la de la entrada. Esto hace que si nos encontramos cerca, y por tanto veamos grande la entrada, los podamos diferenciar; pero si estamos lejos, y vemos la entrada pequeña, nos sea imposible distinguirlos.

Se trata, por lo tanto, de un problema de diferencia de niveles de luminancia entre el exterior (3000-8000 cd/m<sup>2</sup>) y el interior del túnel (5-10 cd/m<sup>2</sup>). Podríamos pensar que manteniendo un valor de luminancia próximo al exterior en toda su longitud habríamos resuelto el problema, pero esta solución es antieconómica. Lo que se hace en túneles largos, con densidad de tráfico elevada o cualquier otra circunstancia que dificulte la visión, es reducir progresivamente el nivel de luminancia desde la entrada hasta la zona central. En la salida no hay que preocuparse de esto pues al pasar de niveles bajos a altos ésta es muy rápida.

También es cierto que existen problemas no resueltos relacionados con los usuarios, como defienden diversos autores (Blasco y otros, 2010) reconociendo que los túneles ejercen efectos sobre el comportamiento de los usuarios, la percepción espacial, la noción del tiempo, la previsión del recorrido posterior y la adaptación peculiar del comportamiento, además de las experiencias emocionales negativas.

Efectivamente, siguiendo a Blasco, Cornejo, y Ferri Anglada (2010) los túneles ejercen claros efectos sobre los usuarios desde diferentes puntos de vista y debido precisamente a su cualidad de espacios cerrados más o menos largos por los que circular. Algunos son debidos al túnel por sí mismo, otros son causados por el tráfico en su interior. Su intensidad varía de un usuario a otro, pero son claramente

detectables y con una explicación psicológica ya conocida. Se han realizado diversos estudios y experimentaciones que señalan los efectos más notables hallados, tales como:

**Sobrecarga mental** debida a la tensión perceptiva entre la atracción foveal relacionada con la percepción del punto de fuga del fondo del túnel, en el que coinciden todas las líneas de fuga, y el rastreo lateral a cargo de la visión periférica para mantenerse a la distancia correcta del hastial, controlando la deriva. Posiblemente por ello se han detectado muchas más “lagunas” atencionales, sin causa aparente, dentro de los túneles que fuera de ellos, en clara correspondencia con el modelo de carga mental y calidad del desempeño en la conducción.

Eventualmente la aparición de “vección lineal”, que se traduce en una clara sensación de **atracción hacia el hastial**, cuando la velocidad diferencial entre éste y el conductor supera los 2 radianes/seg. En encuestas realizadas (Blasco y otros, 2010) el 24% de los conductores encuestados declararon que los accidentes más frecuentes en los túneles eran contra paredes y bordillos. Una ligera distracción o fallo de procesamiento significa un choque con el hastial y el desencadenamiento de una situación subsiguiente que suele ser mucho más complicada en el interior del túnel que en el exterior (sólo hay que ver lo que muestra el video titulado “Tunnel Crash Compliation”, publicado en Youtube.com, como ejemplo ilustrativo).



**Figura 9. Factores de sobrecarga mental en el interior de un túnel.**

**Fuente: Blasco, Cornejo, y Ferri Anglada (2010)**

Se ha podido comprobar que diferentes túneles con diferentes tipos de hastiales inducen sobrecargas equivalentes en los conductores. Así, el efecto del rastreo periférico es similar, pese a variaciones de la textura y color de los hastiales.

Con todo ello y también por otras causas más relacionadas con la personalidad del conductor y con la práctica en conducción por túneles, declararon que las emociones dentro del túnel se relacionan con un incremento de la ansiedad, con sensaciones de agobio por indicios de claustrofobia, impulso de salir cuanto antes, así como la

disminución de las capacidades perceptivas y cognitivas, que llevan a una deficiente toma de decisiones y a una conducción “disociada”.

En la misma línea, la velocidad dentro de los túneles cae, en promedio, un 10% con respecto tramos equivalentes al aire libre. Por otra parte, el 73,4% de los conductores encuestados declaran circular a menos velocidad dentro de los túneles, que al aire libre, y el 82,7% piensa que los demás conductores también reducen la velocidad espontáneamente. Además muchos de ellos (61,9%) opinan que guardan más las distancias de seguridad dentro de los túneles. Incluso así, se detecta cierta incapacidad para asumir incrementos de demanda cognitiva producidos por el sistema de tráfico en el túnel, que se compensan con simplificaciones del comportamiento tales como un notable decremento del uso del retrovisor.

Se ha podido comprobar (Blasco y otros, 2010) que los accidentes en los túneles, aparecen sobre-representados en las entradas y en las salidas, según declaraciones de los encuestados. Posiblemente por todo ello, un porcentaje no desdeñable de conductores encuestados ha declarado tener problemas para percibir los elementos de socorro dentro de los túneles, pese a que puedan estar correctamente ubicados y señalizados.

En relación a las dinámicas de tráfico en el túnel, en cada momento, partiendo de la base del estado de sobrecarga producido por la infraestructura, generan demandas que pueden ser más difíciles de asumir que al aire libre (Blasco y otros, 2010). Así, las maniobras propias y de los demás adquieren un nuevo nivel de riesgo a considerar. Dado que la seguridad es sistémica y que por el túnel van a circular diversos vehículos que van a interactuar entre ellos, se pueden producir diferentes situaciones que deriven en colisiones de mayores o menores consecuencias. Aquí hay que recordar que un accidente no es igual a sus consecuencias, de tal forma que las maniobras propias dentro del túnel generan mucha más sobrecarga mental que fuera del túnel. El adelantamiento es la más notable, siendo la maniobra que más sobrecarga genera dentro y fuera del túnel. Pero las aproximaciones por detrás a otros vehículos y los cruces (cuando son posibles) son muy diferentes en el interior y en el exterior de los túneles. Por el contrario, ser adelantado dentro del túnel genera menos carga mental que fuera del túnel, básicamente a causa del mucho menor uso del retrovisor que se hace en el túnel a causa de la sobrecarga genérica producida por el propio túnel.

Algunas, de las soluciones propuestas a los problemas planteados, vienen de la mano de estos autores relacionados con este tema, (Blasco y otros., 2010), que proponen “hacer desaparecer el túnel”. En realidad, las paredes del túnel no forman parte de los elementos que conciernen a la conducción, como no lo son los paisajes ni los objetos fuera de la vía. Es decir, descarguemos al conductor del rastreo periférico y facilitando al máximo su percepción de los indicadores de dirección sobre una calzada muy bien

---

---

iluminada y de las señalizaciones iluminadas sobre un fondo oscuro, el túnel se convertiría en algo muy similar a la conducción nocturna, pero con la gran ventaja de una calzada muy perceptible, las paredes desaparecerían y ya no habría referentes laterales. No obstante se mantiene la necesidad de una buena iluminación de la calzada.

Esto se realizaría con un oscurecimiento total de los hastiales, evitando incluso las posibles reflexiones lumínicas, e iluminando la calzada con luz rasante que vuelque toda la luz sobre el asfalto y deje en contraluz a los hastiales. Un túnel así diseñado no sería un recinto oscuro, pero tendría la cualidad de hacer descender la carga mental del usuario y recobrar su normal capacidad de procesamiento de la información, volviendo, por ejemplo, a un uso adecuado de los retrovisores. Las emociones negativas, vinculadas a algunas formas de claustrofobia posiblemente desaparecerían. Las inseguridades provocadas en muchos conductores por la conducción nocturna se evitarían por la absoluta claridad de la ruta a seguir, incluso sin uso del propio alumbrado. No aparecerían fenómenos de hemeralopia (disminución de la capacidad de visión cuando la luz es muy intensa) ya que la buena iluminación del firme generaría niveles de luminosidad suficientes. La figura adjunta propone un túnel con paredes oscurecidas.



**Figura 10. Propuesta de túnel con paredes oscurecidas**  
**Fuente: Blasco, Cornejo, y Ferri Anglada (2010)**

Desde el punto de vista de la eficiencia energética, es muy probable que sea mucho más económico iluminar el firme en forma rasante que iluminar toda la galería (Blasco, Cornejo, y Ferri Anglada, 2010), como parece lógico si se tiene en cuenta la superficie implicada.

Una especial mención requiere, de nuevo en este apartado, la revisión de la normativa vigente (Real Decreto 635/2006, Ministerio de Fomento, 2006), comentada en el apartado, “Seguridad en túneles y análisis crítico de la normativa vigente” ya que la

experiencia acumulada desde su implantación, ha demostrado que es una norma de máximos respecto a las necesidades reales del túnel en materia de seguridad, bien es cierto que el marco económico y financiero no es el que existía cuando se concibió la normativa, motivo por el cual, en el apartado anterior, ha sido criticada la normativa actual y refrendada por autores como (Llopis, com. pers. 2012). Por otro lado, accidentes ocurridos en condiciones de trazabilidad y tráfico diferentes no son equiparables a trazados de segunda generación, como son los recientes y actualmente construidos.

Por todo ello, parece lógico unir la sostenibilidad energética del túnel, con la integración del mismo en el territorio, integración, que por otro lado es necesario cuantificarla desde todos los aspectos que puedan influir en el usuario, como los anteriormente expuestos, con el fin de conseguir una infraestructura sostenible, segura e integrada, con el mayor rigor posible en el territorio que se atraviesa.

Sobre el problema asociado con la sostenibilidad energética, actualmente no resuelto, se pretende hacer una primera aproximación en el punto tercero del presente trabajo: *“Consumo energético del alumbrado de túneles en autovías de alta capacidad”*.

Y por último la integración paisajística de los emboquilles de túneles en el territorio y su relación con la sostenibilidad energética será tratado en el siguiente punto del trabajo con el título *“Integración paisajística de portales de túneles en autovías de alta capacidad”*.

Siendo estos apartados relevantes para futuras investigaciones y estableciendo el camino de la sostenibilidad real para la explotación de los túneles existentes y de los futuros.

## **2. INTEGRACIÓN PAISAJÍSTICA DE PORTALES DE TÚNELES EN AUTOVÍAS.**

Uno de los aspectos críticos en la construcción de los túneles de carretera, y su posterior mantenimiento, es su integración en el medio ambiente y en el paisaje. Esta importancia no sólo se refiere propiamente al paisaje, sino también, como posteriormente se verá, al trabajo y funcionalidad del mismo túnel, por ejemplo en la cuestión de la demanda de energía para su iluminación eléctrica.

Sin embargo, la integración paisajística, no es una tarea fácil. No pueden darse reglas específicas o normas de cómo podrían ser estas transiciones, ni como deberían resolverse los entornos o portales que Estany y Serra, (2010), definen como *“la frontera del túnel”*.

La zona por encima y alrededor de la llamada puerta del portal es, quizás, la zona más identificable de los túneles, la que le aporta visibilidad e identificación. Es la zona que puede apreciarse en una perspectiva amplia al aproximarse desde el exterior y, por tanto, la que más se presta a una valoración estética, por su propia configuración y por ser el elemento de transición entre el túnel y el entorno, de cara a integrarse de algún modo en el paisaje. Por su elevada visibilidad, la resolución satisfactoria de estos entornos de frontera son el reflejo del nivel de integración no solo de la propia estructura sino, extensivamente, de todo el trazado de una vía (Español, y otros 2008).

Naturalmente, de acuerdo a Estany y Serra, (2010) hay una regla fundamental que debería abordarse en todos los casos, que debe ser la integración de la boca del túnel en la orografía que la contiene y en el paisaje que la enmarca.

Este concepto de integración es en sí muy amplio y difícil de materializar, podríamos definirlo como el esfuerzo máximo a realizar por profesionales de distintas disciplinas: geólogos, biólogos, ingenieros, paisajistas,... para minimizar la afección de esta nueva cicatriz en el paisaje. En este sentido, la introducción de especies vegetales es considerada una solución muy relevante dado su impacto tanto en la dimensión paisajística, como en el propio consumo energético de los túneles como veremos a continuación.

Para este concepto de integración es importante reconocer los trabajos existentes, pudiendo completarlos y abriendo nuevas perspectivas para el futuro. Respecto a las cualidades paisajísticas en la integración de los túneles de carreteras, estas han de ser concretadas si se quiere un desarrollo técnico positivo de la relación existente entre la vía y el paisaje, dado que, según Español y otros. (2008) si estas cualidades no se atienden debidamente con una visión sistemática, positiva y propositiva, y se abandonan a un discurso vago, bien intencionado pero sin un cuerpo técnico sólido que lo avale, el resultado puede ser contraproducente, como demuestran algunas desafortunadas experiencias en el pasado.

En este contexto, la carretera, una infraestructura eminentemente social, juega un papel crucial por cuanto traslada a las personas por el territorio y las pone en situación de aproximar su aprecio y entendimiento responsable del paisaje. No se olvidan, por tanto, las exigencias de integración ambiental ni los valores no visuales pero apreciables del paisaje, ni tampoco las condiciones de seguridad y funcionalidad que son propias de toda infraestructura pública de transporte (Grindlay y Otros 2014).

## **2.1. Criterios de Integración y diseño.**

El paso de un túnel excavado en mina a un viaducto, o a otra estructura en falso túnel o a una estructura abierta para protección de desprendimientos, tiene por tanto muchas aproximaciones y puede ser abordado por distintos profesionales, siempre que se tenga en consideración la complejidad y las especificidades que se solapan en ese punto: la geología, la orografía, el trazado de la vía, la estructura del túnel, los temas de seguridad y evacuación, la señalización y las instalaciones propias y la relación de continuidad con otras estructuras.

Las bocas de túneles tienen una especial cualidad paisajística pues es en ellas donde se resuelve la confrontación de la linealidad de la carretera con el relieve en el que se inserta bruscamente. Como en otros elementos de la obra pública, funcionalidad y estética se combinan de distintos modos según las soluciones estructurales adoptadas.

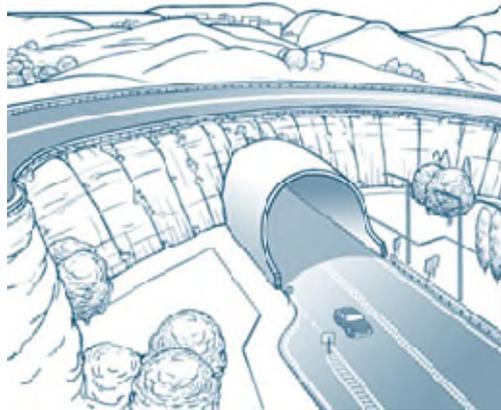
Siguiendo a Español, (2008) la boca de túnel ha de resolver la transición desde fuera a dentro de la formación rocosa generando un ámbito propio que adopta la forma de una trinchera de profundidad progresiva hasta alcanzar la ladera frontal de la pared rocosa en la que se inserta el túnel. Este ámbito de la boca suele venir condicionado por la dinámica que impone la estabilidad natural de las laderas y su resolución en la excavación de las paredes laterales de la trinchera y el frente del túnel. La mayor fragilidad de la excavación de un túnel bajo tierra se produce en las bocas de los túneles donde los materiales situados sobre la cabecera de la boca tienden a perder su estabilidad con la excavación, siendo común que se produzcan colapsos, a menudo forzados por el propio plan de obra.

En el ámbito de la boca del túnel, la excavación de la plataforma de la carretera rara vez enfrenta una pared absolutamente vertical. De ahí que antes del túnel, la carretera se desarrolla en un espacio intermedio de transición de tipo trinchera, o doble pared de excavación, que tiene una altura (o profundidad) creciente. Esta trinchera opera paisajísticamente como un receptáculo artificial abierto en la ladera que recibe al trazado y lo encauza hacia el túnel. Junto con la excavación del frente del túnel, el colapso de la cabecera de la boca y la trinchera, forman el espacio escénico de la boca del túnel que es el paisaje interior de la carretera antes del túnel y, que en la distancia para vistas exteriores, determina su presencia en el paisaje.

Es así que las distintas soluciones de trinchera y boca del túnel proporcionan distintos paisajes de carretera y distintos efectos sobre el paisaje. El desarrollo de esta trinchera previa puede ser brusco con una trinchera muy corta y repentinamente profunda, casi imperceptible. Esto ocurre cuando la carretera se incrusta contra una pared rocosa muy vertical, normalmente precedida por un viaducto sostenido sobre un pequeño

estribo. Otras veces el relieve de la formación que atraviesa el túnel de la carretera es más tendido, y la carretera va excavando una trinchera larga y poco profunda hasta finalmente penetrar con el túnel bajo la roca. Es la situación típica de carreteras que atraviesan macizos rocosos desde su pie de monte, la carretera parece deprimirse en el terreno aunque en realidad es el terreno el que se levanta poco a poco envolviendo el trazado de la carretera.

Más comúnmente, la carretera se anticipa al túnel con una trinchera de longitud media y progresivamente profunda creando un espacio previo, una especie de abrigo o cueva lateral que debe ser objeto de un diseño delicado dada su especial condición paisajística. Las paredes excavadas de las márgenes de la carretera, a menudo, precedidas por cunetones de seguridad, cierran este espacio hasta confrontarlo con el frente de la ladera en el que se sitúa la boca del túnel.



**Figura 11. Boceto de integración boca de túnel. Fuente: Español, y otros (2008)**

El conjunto del entorno formado por la trinchera de altura progresiva en la que discurre la carretera antes del túnel puede presentar diseños unitarios que involucren a la boca propiamente dicha, a la pared frontal en la que se inserta, a las paredes laterales, y a los espacios entre ellos (medianas, isletas, etc.) mediante ajardinamientos de mayor o menor desarrollo. Las paredes laterales de la trinchera y la frontal del túnel pueden aparecer ordenadas con escalonamientos regulares de bermas ajardinadas que organizan el espacio de la boca, o simplemente como paramentos de cierta verticalidad que para ser revegetados tienden a requerir elementos de sujeción o mantas orgánicas. Los tratamientos pueden ser de orientación funcional y aséptica o apoyándose en elementos de naturalización con disposiciones más irregulares.

El diseño de este espacio previo del túnel, su disposición respecto a la escena amplia del entorno (valle, montaña, etc.) y los tratamientos de acabado determinan la presencia de la boca del túnel en el paisaje que puede tener desarrollos de gran imposición sobre el paisaje o, por lo contrario, conseguir pasar desapercibidos en el

conjunto, gracias a la orientación respecto a las vistas exteriores (miradores, itinerarios visuales, etc.) de los volúmenes excavados y a su naturalización.

Así pues el ámbito de la boca del túnel debe resolver los elementos propios de la vía, la coronación del túnel, la bóveda que generalmente sufre colapsos de ladera, y las trincheras y taludes que preceden a la boca. (Fig. 11).

En el diseño y acabado de la boca del túnel se pueden plantear distintas presencias en el paisaje de la carretera. Los túneles de menores dimensiones, apenas seis metros, generalmente antiguos y excavados manual o mecánicamente, mantienen las paredes de excavación de sus bocas en roca vista. El colapso de la cabecera de la boca suele ser menor en estos pequeños túneles de manera que pueden presentar la roca vista con sus secciones circulares o cuadradas (generalmente con un remate redondeado de sus aristas) conservando un cierto carácter y pese a la geometría de la excavación se dotan de una alta naturalidad gracias a la morfología de las paredes excavadas que tienden a reproducir la naturaleza litológica de la formación. Esta solución es muy paisajística y de gran interés pues presentan legible el proceso constructivo de la obra. Sin embargo, esta solución de boca excavada en roca vista no es tan eficaz en túneles de mayores dimensiones en los que los colapsos de cabecera tienden a ser mayores y a desfigurar el acabado de la obra. Además, se requieren estructuras de protección para prevenir posibles caídas de material de la pared superior. Por esta razón muchas bocas de túneles adoptan soluciones apantalladas, es decir, presentan estructuras construidas que se levantan verticales rematando el extremo de la bóveda interior del túnel que se prolonga hacia el exterior. Generalmente se recurre a elementos verticales de carácter ornamental y mayor o menor desarrollo formal. Algunos túneles clásicos del siglo XIX llegan a incorporar conjuntos edificados apantallando la boca del túnel, otros más recientes pueden llegar a elaborar construcciones asociadas a los sistemas de ventilación. Estos sistemas de apantallamiento vertical tienen una doble función, por un lado, esconden las irregularidades de la pared de la roca que se produjeron con el colapso sobre la cabecera (dependiendo de la naturaleza de la roca algunos colapsos pueden llegar a tener alturas considerables sobre la ladera), y consiguen así un aspecto ordenado y funcional.

Otra solución más moderna y que es la más comúnmente adoptada en las obras recientes es la de prolongar la bóveda de hormigón interior del túnel hacia fuera. Estas bóvedas suelen ser de cañón aunque las hay con arcos más abiertos y parabólicos. A veces continúan hacia el exterior como prolongación directa de la estructura de bóveda, otras veces la prolongación de la bóveda se envuelve recogida en una estructura prismática que avanza desde el pie de la ladera y que contiene en su interior una prolongación del túnel. En estos casos, la boca del túnel adopta entonces el aspecto de una gran cubierta de hormigón circular que avanzara unos metros hacia

fuera de la roca concediendo al conjunto una cierta sensación de movimiento. Una variante de estas bocas de túneles son aquellas que rematan el final de la bóveda de cañón con una sección sesgada en forma de punta de pluma de ave lo que le añade aún más dinamismo.



**Figura 12. Prolongación exterior de la bóveda del túnel. Fuente: Español, y otros (2008)**

La resolución de estas estructuras de remate y prevención de caídas de material es muy variada, llegando a incluir, como se ha dicho, incluso conjuntos edificados. Como en otros elementos de fábrica de la carretera, hay bocas de túneles que se presentan cubiertas por muros de piedra para colaborar con el carácter local, muchas incorporan ajardinamientos y tratamientos de naturalización de distintos tipos o simples gunitados; otras desarrollan estructuras más creativas o artificiosas mientras la mayoría tienden a adoptar soluciones sencillas, en geometrías puras, más discretas y elegantes.

El diseño de la boca del túnel debe incorporar el colapso de ladera que acompaña al tramo final del túnel y que compone el ámbito de la boca. Diversas estrategias procuran su ocultación con fachadas de remate y otras soluciones. (Fig. 12)

Además de la boca propiamente dicha del túnel, el conjunto del entorno formado por la trinchera de altura progresiva en la que discurre la carretera, puede presentar diseños unitarios mediante ajardinamientos de mayor o menor desarrollo. Las paredes laterales de la trinchera y la frontal del túnel pueden aparecer ordenadas con escalonamientos regulares de bermas ajardinadas que organizan el espacio de la boca o simplemente como paramentos de cierta verticalidad que para ser revegetados tienden a requerir elementos de sujeción o mantas orgánicas. Los tratamientos pueden ser de orientación funcional y aséptica o apoyándose en elementos de naturalización con disposiciones más irregulares.

Otro aspecto importante a destacar en el diseño de los túneles es la estructura denominada, falso túnel. Algunas bocas de túneles completan el túnel excavado en la roca con un tramo final en falso túnel, es decir, cubriendo parte de la trinchera

excavada y la zona de colapso con el material original para conseguir una mayor longitud de trazado bajo tierra (por razones ambientales o paisajísticas) y un acabado de la transición de la boca más naturalizado.

Los falsos túneles, en realidad trincheras recubiertas con material sobre una estructura de cubierta, son soluciones comunes para carreteras y autovías al producirse una serie de circunstancias: cuando se quiere mantener el trazado a excavar a una profundidad no muy elevada que no puede garantizar la estabilidad del túnel de excavación, o cuando se plantean como modificaciones de trincheras ya previstas por sus ventajas ambientales (cubrición para ruido, eliminar la fragmentación de hábitats) o geotécnicas (por inestabilidad de las laderas que se compensarían una con otra).



**Figura 13. Falso Túnel. Fuente: Español, y otros (2008)**

Generalmente son túneles costosos pues implican el gasto añadido de la cubierta resistente sobre la carretera, la excavación completa desde la superficie, la gestión de la escombrera temporal y las tareas de su cubrición posterior y acabado. Se trata de soluciones muy superficiales pues de ser muy profundos se requeriría un gran esfuerzo en la doble tarea de excavar la trinchera y rellenarla, (Fig. 13) una vez construida la estructura interior del túnel.

Un aspecto prioritario en el diseño del ámbito de la boca del túnel y más allá son las exigentes condiciones de seguridad que se reclaman en los tramos de autovía que preceden a un túnel. La transición del interior al exterior del túnel requiere un especial esfuerzo en el conductor que sufre el cambio de iluminación y también el de legibilidad y dinámica del trazado de manera que se recomienda siempre conseguir un tramo de transición que debe estar especialmente concebido para una conducción fácil y automática.

Respecto al trazado, son precisas medidas conducentes a eliminar o paliar el posible efecto del deslumbramiento del conductor del vehículo a la salida del túnel, en especial cuando la alineación de la vía en esta zona coincida con la orientación de los rayos solares en algunas horas del día. En general, no se proyectarán alineaciones en

planta con orientación este-oeste, aunque a veces será inevitable, como por ejemplo en el corredor de la A-7, a su paso por la costa tropical Fig. 14.



**Figura 14. Trazado de la A-7 a su paso por el municipio de Albuñol (Granada). Fuente: Elaboración propia (2014)**

Se deben evitar curvas o pendientes repentinas, carencias en la visibilidad o en la legibilidad del trazado, posibilidad de incorporaciones o cruces, pues cualquiera de estas circunstancias se traduce en un riesgo cierto de accidente. Es importante, por tanto, liberar los tramos contiguos a los túneles de dificultades incluyendo la posibilidad de obstáculos o deficiencias para la conducción.

En este sentido, hay que tener especialmente en cuenta la seguridad al proyectar la geometría de la sección transversal y la alineación horizontal y vertical del túnel y sus vías de acceso, ya que sus parámetros tienen una gran influencia en la probabilidad y gravedad de los accidentes.

No pueden darse reglas específicas de cómo deberían ser estas transiciones, ni como deberían resolverse los entornos de lo que se ha denominado “la frontera del túnel” (Estany y Serra, 2010) puesto que se trata de una decisión muy particular de diseño pero condicionada como se ha dicho por necesidades funcionales y estructurales, por la orografía, el entorno y el paisaje, los condicionantes socio-ambientales, el proceso constructivo, la disponibilidad de espacio y los desvíos de tráfico, etc.

El concepto de frontera del túnel se materializa en lo que llamamos comúnmente se denominan las bocas o emboquilles del túnel. Estas son, quizás, las zonas más identificable de los túneles, las que le dotan máxima visibilidad. Estas son la zona que puede apreciarse en una perspectiva amplia al aproximarse desde el exterior y, por tanto, la que más se presta a una valoración estética, por su propia configuración y por ser el elemento de transición entre el túnel y el entorno, de cara a integrarse de algún modo en el paisaje. Por su elevada visibilidad, la resolución satisfactoria de estos entornos de frontera son el reflejo del nivel de integración no solo de la propia estructura sino extensivamente de todo el trazado de una vía.

Siguiendo a Estany y Serra ( 2010), el conseguir un buen “encaje” (Fig. 15) entre el paisaje, la orografía y las características de la autovía, son objetivos necesarios e irrenunciables a la hora de proyectar estas estructuras



**Figura 15. Integración túnel, orografía. Fuente: Estany y Serra (2010)**

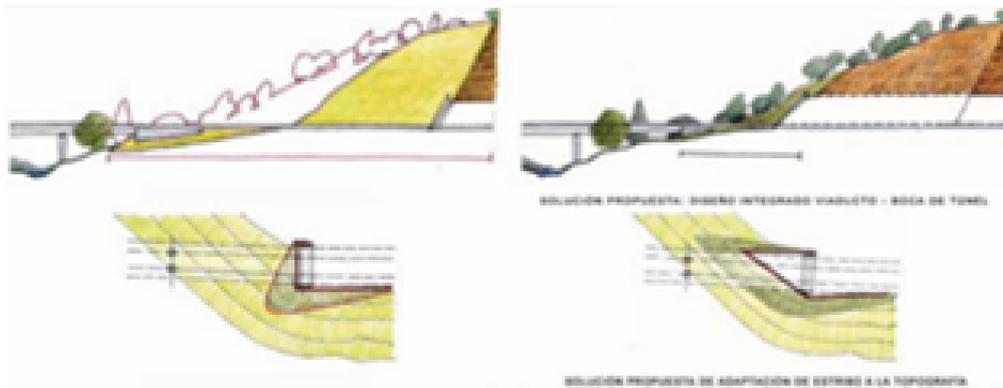
Como se ha indicado, de la infinita casuística que puede confluir en cada caso particular a la hora de resolver la transición de un túnel al exterior, quizás hay una regla fundamental que debería abordarse en todos los casos: la integración de la boca en la orografía que la contiene y en el paisaje que la enmarca.

Así, este concepto de integración que es en sí muy amplio y difícil de materializar, podríamos definirlo como el esfuerzo máximo a realizar por profesionales de distintas

disciplinas: geólogos, biólogos, ingenieros, paisajistas,.. para minimizar la afección de esta nueva cicatriz en el paisaje.

Existen medios y tecnologías específicas aplicables a la resolución de estos entornos de frontera, comúnmente muy complejos por la dificultad de restitución de excavaciones con taludes muy verticales o de vaciados importantes de laderas produciendo grandes brechas obligadas por condicionantes geológicos o por trazados en esviaje respecto a las laderas del terreno (Serrano Bernardo, y otros 2015).

Generalmente no existen problemas técnicos irresolubles para abordar una buena integración de las boquillas y los entornos resultantes de la construcción del túnel, más bien se evidencia en muchos casos un cierto abandono en la resolución del problema por aspectos económicos o por minusvaloración de la importancia de los temas de integración y restitución paisajística y medioambiental.

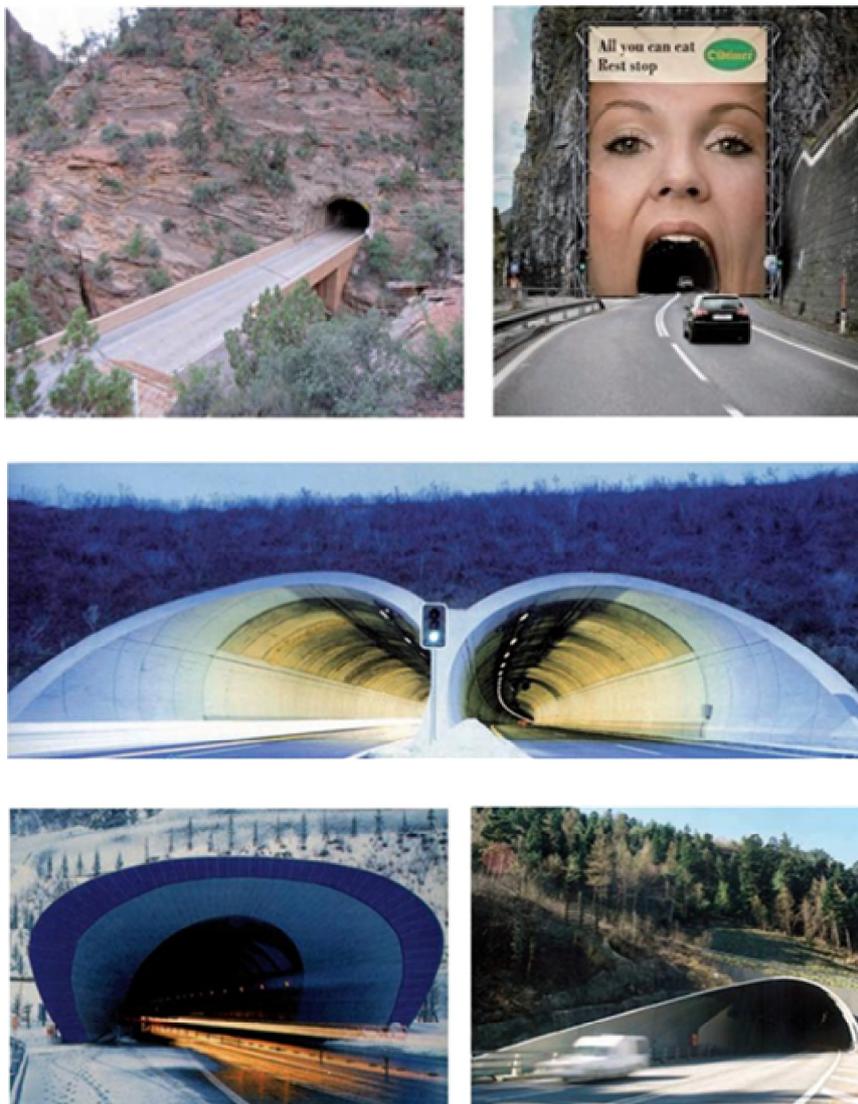


**Figura 16. Modelo de restauración en el portal del túnel. Fuente: Estany y Serra (2010)**

Procurar un buen “encaje” en el paisaje y restituir la orografía al estado inicial, es el objetivo de una perfecta restauración paisajística, (Español, y otros 2008) (Fig. 16).

La geología y la orografía del lugar son sin duda cuestiones relevantes a la hora de abordar la integración de una boca de un túnel. La geología porque es la que condiciona en primer lugar la construcción del túnel y la configuración de los extremos del mismo. La orografía porque finalmente habrá de restituirse el entorno afectado a un modelado adaptado en continuidad a las laderas limítrofes.

En frentes verticales en roca, los emboquillos casi pueden llegar a desaparecer por innecesarios, minimizándose a la implementación de los temas de seguridad y protección contra desprendimientos. La propia configuración de la roca, la belleza de los estratos o una decisión estética, pueden hacer innecesarios elementos de transición demasiado evidentes.



**Figura 17. Diferentes diseños de emboquilles. Fuente: Estany y Serra (2010)**

En la Fig. 17, se pueden ver distintos tipos de diseños de los emboquilles como un túnel en mina en el parque nacional Zion, la utilización publicitaria de una boca de túnel y un falso túnel con su restitución topográfica en el Túnel de Kan Etsu y. Tunel d'Orelle.

En ocasiones, cuando los estratos rocosos se encuentran a cierta profundidad, tratando de buscar roca sana, los emboquilles se profundizan contra el terreno natural mediante grandes desmontes, que posteriormente son restituidos construyendo largos túneles artificiales de emboquilles con su posterior relleno. Esta solución con mucha frecuencia genera importantes afecciones en los terrenos de frente de emboquille que finalmente deben ser restituidos.

Esto implica nuevas estructuras añadidas al túnel, los falsos túneles de transición entre el túnel excavado y la topografía final, y paralelamente condicionantes de

planificación, el acopio temporal de las tierras excavadas para su restitución final, y la recuperación y mantenimiento de la tierra vegetal para recuperar posteriormente el sustrato vegetal sobre el terreno afectado por la obra. Implica también una labor de proyección de disciplinas complementarias y en definitiva una aportación económica adicional.

La integración, por tanto no es solo un concepto “estético” que se reduce a un acicalamiento final en forma de revegetación o de construcción final de elementos “puerta” del túnel, sino que nace simultáneamente con la conceptualización del proyecto de ingeniería entendido como un proceso interdisciplinar (geología, estructuras, topografía, trazado), que será el sustrato sobre el que se implementarán los acabados finales: plantaciones (con ventajas energéticas como hemos visto), muros, señalización, iluminación, etc.

Como Peila y Pelizza (2002) afirmaban, los aspectos arquitectónicos y paisajísticos relativos a los portales de los túneles se han vuelto muy importantes tal y como la conciencia de protección del medio ambiente por los proyectistas y su elevada preocupación por la integración de las infraestructuras con el entorno.

Efectivamente, este es un caso muy específico de la relación más amplia de las infraestructuras y el medio ambiente, y como Aguiló (2001) reconocía, “como en todo problema de relación, hay dos aproximaciones extremas, la afinidad o el contraste, apoyarse en las sugerencias y rasgos comunes, o subrayar las diferencias”. En resumen, integrarse en el entorno buscando mimetizarse con el entorno o significarse con obras destacadas, tal y como muestran Fei y otros (2012), en algunos de los portales de túneles muy decorados de China. Como estos autores concluyen el paisajismo de los portales de túneles es un arte integral, que involucra a la creatividad, la arquitectura, y arquitectura del paisaje, la cultura local, la bionomía, la psicología, la protección del medio ambiente, técnicas ópticas y de seguridad y la aplicación de nuevos materiales y nuevas técnicas artísticas. Otro estudio realizado por Lingli y Dongping (2008) indica que el paisaje de la entrada del túnel debería incluir la racionalidad de la estructura, el arte del diseño visual, y la durabilidad del medio ambiente.

Así pues, Estany y Serra (2010), coinciden en que hay genéricamente dos maneras de abordar el entorno frontera y las boquillas de los túneles:

- Mimetizando la estructura en el entorno y en la orografía con la renaturalización o incidiendo en el carácter natural.
- Mediante estructuras sobrepuestas al entorno y soluciones más diseñadas o incidiendo en un carácter más artificial.

La primera es quizás la más habitual (Fig. 18 y 19) y la más neutra en el paisaje, ello sin contar los beneficios energéticos con los que además podemos contar. Son soluciones siempre correctas y exitosas cuando aportan además la implementación de otras disciplinas: paisajismo, adecuación topográfica,... Son soluciones que delatan la intención del proyectista de la infraestructura de intentar minimizar la afección de la nueva vía sobre el territorio, puesto que estos emboquilles suelen adaptarse estrictamente a la configuración y pendientes de las laderas sobre las que se insertan o atraviesan.



**Figura 18. Mimetización estructura entorno. Fuente: Estany y Serra (2010)**

Es fácil encontrar muy buenos ejemplos de este tipo de emboquilles, de adecuada funcionalidad e integración en el entorno tanto en prolongación de bocas de los túneles excavados como en túneles artificiales.

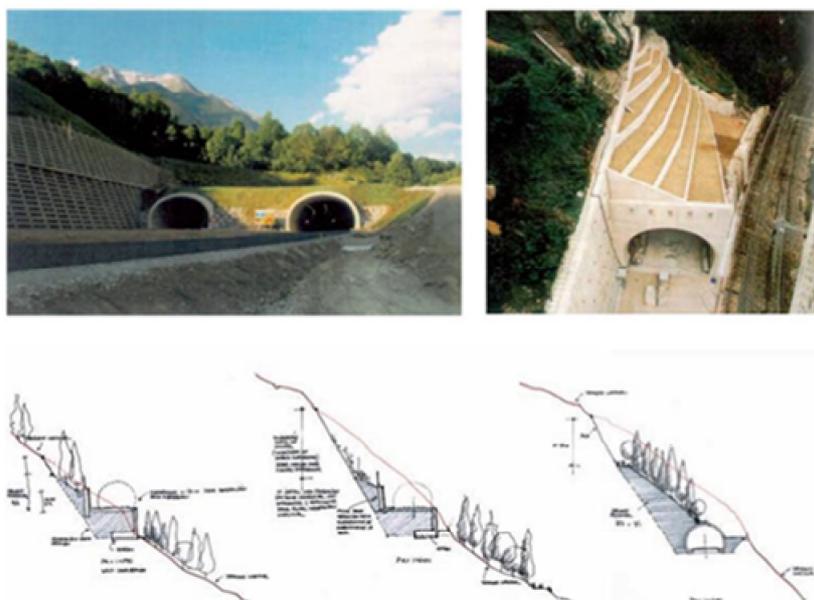


**Figura 19. Restitución de túneles en la A5 italiana entre Aosta y el túnel de Montblanc. Fuente: Estany y Serra (2010)**

La autopista A5 italiana en el tramo entre Aosta y el túnel del Montblanc atraviesa orografías muy abruptas que hacen necesaria la construcción de numerosos túneles en situaciones de topografías complejas con emboquilles muy esviados. Las soluciones de integración de las emboquilles y restauración de las laderas presentan soluciones muy adecuadas y con un nivel de acabados excepcional.

Las soluciones por “sobreposición” pueden considerarse otro camino de integración, más ligadas a un diseño más personalizado o a la configuración de un hito, y se desarrollan generalmente en situaciones más complejas donde la restitución topográfica natural es compleja o inviable, o cuando es necesario incluir en la boca del túnel no solo el espacio necesario de paso, sino otras infraestructuras necesarias: edificio de control y vigilancia, espacios para las ventilaciones interiores, edificios para el suministro de energía, espacios de información y peajes, etc.. Son soluciones interesantes cuando no son excesivas o innecesariamente estéticas.

La orografía y la geología condicionan el encaje de los emboquilles, tanto en su ubicación como en la dirección del eje de la vía. Conviene que en las boquillas el eje del túnel sea aproximadamente perpendicular a las curvas de nivel para facilitar el inicio de la obra, evitando empujes asimétricos sobre su bóveda precisamente donde la roca suele estar más meteorizada y donde aparecen materiales aluviales y coluviales. Por tanto, la posición de la boquilla condicionará la estabilidad de los taludes frontales y laterales de la trinchera de acceso.



**Figura 20. Tratamientos de estabilización de los taludes laterales. Ejemplo en Austria y Francia.**  
Fuente: Estany y Serra (2010)

La resolución correcta de estas situaciones exige habitualmente soluciones costosas y afectan no solo al ámbito estricto de la excavación sino que puede llegar a extenderse más allá para conseguir una armonización adecuada con el entorno inmediato.

En áreas urbanas los requerimientos serán más complejos. Por ejemplo en la salida del futuro túnel de la Conreria en Tiana (Barcelona), se realizó una adaptación de todo el entorno de salida del túnel para integrarlo a la situación urbana de ambos municipios

permitiendo además la reordenación de varios equipamientos públicos, la canalización de un arroyo y la creación de un parque sobre los entornos de dominio público.

La boca norte del túnel entre Miribilla y Ametzola en Bilbao, exigía también esta labor de integración puesto que la propia boca por su situación y visibilidad iba a convertirse en un elemento más del futuro parque de la ladera de Irala. Inicialmente, una pasarela peatonal diseñada desde un proyecto de arquitectura y el emboquille del túnel configurado según los condicionantes de un proyecto de ingeniería, iban a ocupar un mismo espacio físico. La solución, integrar ambas en un único elemento que resolviera las cuestiones programáticas, estéticas, constructivas y funcionales de ambos proyectos.

En la ubicación de las boquillas y los espacios de transición existe otro condicionante a implementar como es la conveniencia de disponer de espacios amplios en su proximidad para las instalaciones de obra. Las instalaciones definitivas como el edificio de control, transformadores eléctricos, instalaciones de ventilación, etc., suelen ocupar menos superficies que las de obra, pero al ser permanentes necesitan ser proyectadas para su funcionalidad y de integración en el entorno.

En túneles urbanos o de gran longitud y condicionados por la trascendencia de este tipo de obras, estas instalaciones suelen proyectarse de modo interdisciplinar entre arquitectos e ingenieros resultando en la mayoría de los casos elementos configurados como hitos en el entorno, con diseños muy cuidados.

En proyectos de menor entidad sin embargo no se invierte la misma atención en el cuidado de los acabados y la disposición de los elementos construidos para albergar las instalaciones necesarias o los elementos de seguridad.

Es importante cuidar los acabados de las boquillas y su integración en el paisaje, evitando caer en una decoración excesiva que pueda distraer la atención e incluso resultar antiestética y poco acorde con su finalidad funcional.



**Figura 21. Espacios y elementos que afean el aspecto del emboquille.**  
Fuente: Estany y Serra (2010)

Como criterio general, debe procurarse restituir las laderas naturales de los frentes de los emboquilles a una situación lo más aproximada posible a su condición inicial ya que elementos no proyectados afean el aspecto del emboquille. (Fig. 21).

### 3. CONSUMO ENERGÉTICO DEL ALUMBRADO DE TÚNELES EN AUTOVÍAS.

El túnel, por su configuración actual y por sus sistemas de seguridad necesarios, tal y como se ha visto en los capítulos anteriores, demanda una gran cantidad de energía necesaria para que todo funcione en perfecta armonía, incluso con sistemas alternativos como son los grupos electrógenos funcionando con combustible fósil para el caso de una avería fortuita en la red eléctrica principal, ya que por importancia en la seguridad viaria, nunca los sistemas encargados de esa seguridad pueden quedar sin funcionamiento.

Si al correcto funcionamiento de los sistemas de seguridad añadimos las longitudes actuales de los últimos túneles construidos, hace pensar que la factura global en consumo eléctrico por año de todos los túneles de la red nacional, debe estar en unos niveles muy considerables para su análisis y consideración.

Por otra parte, el incremento del precio de la energía que se ha producido en los últimos años y la situación económica actual, han dado lugar a que el Gobierno de España haya promovido una serie de normas encaminadas al ahorro y la eficiencia energética. (Ministerio de Fomento 2015).

A modo de muestra se presentan datos energéticos (Tabla 6) de algunos de los túneles que nos han servido, como se verá en capítulos posteriores, para los objetivos que se pretenden con el presente trabajo.

TÚNELES		CERROSOL	PINO	MARCHANTE	MADROÑO 1	MADROÑO 2	ACEBUCHAL 1	ACEBUCHAL 2	GUAPA	RAMONCILLOS	
TENSIÓN	TENSIÓN (V)	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	
POTENCIA (KW)	P1	27,00	200,00	451,00	150,00	127,00	156,00	119,00	119,00	119,00	
	P2	31,00	200,00	451,00	150,00	127,00	156,00	119,00	119,00	119,00	
	P3	157,00	200,00	451,00	150,00	157,00	156,00	119,00	119,00	119,00	
	P4			451,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	P5			451,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	P6			451,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	INSTALADA ILUMINACIÓN VENTILACIÓN OTROS						342,47 94,00 240,00 8,00		348,27 100,00 240,00 8,00		348,27 100,00 240,00 8,00
CONSUMOS (€)	10-01, DEL 14	32.471,90	72.055,64	180.107,44	37.748,39	35.932,61	21.913,04	56.880,96	56.880,96	56.880,96	
	2013	35.386,86	51.037,06	205.321,90	50.275,92	90.598,93	23.271,54	69.489,15	69.489,15	69.489,15	
	2012	31.088,11	67.238,18	0,00	0,00	78.508,01	0,00	0,00	0,00	0,00	
	02, 11, 12 DEL 12	0,00	0,00	32.965,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	2, 8-12, DEL 12	0,00	0,00	0,00	27.077,32	0,00	18.310,85 €	34.618,82	34.618,82	34.618,82	
	01, DEL 11	0,00	0,00	17.599,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	11, 12 DEL 11	0,00	48.258,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	12, DEL 11	1.306,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
POTENCIA (KWH)	10-01, DEL 14	218.454,00	462.921,00	1.037.791,00	197.554,00	199.126,00	84.142,00	333.210,00	333.210,00	333.210,00	
	2013	192.225,00	452.869,00	1.272.215,00	296.759,00	551.397,00	91.736,00	379.764,00	379.764,00	379.764,00	
	2012	172.080,00	273.354,00	0,00	0,00	443.105,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	02, 11, 12 DEL 12	0,00	0,00	226.239,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	2, 8-12, DEL 12	0,00	0,00	0,00	115.698	0,00	59.306,00	106.173,00	106.173,00	106.173,00	
	01, DEL 11	0,00	0,00	145.866,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	11, 12 DEL 11	0,00	47.577,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	12, DEL 11	8.148,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	Consumo €/año/Tubo
22.1	CERROSOL (MA)	176	16.364,78
26.2	GUALCHOS (GR)	250	17.880,50
22.2	CERROSOL (MA)	202	18.782,30
26.1	GUALCHOS (GR)	330	23.602,26
20.1	PINO (MA)	381	33.857,07
20.2	PINO (MA)	387	34.390,25
8.2	ACEBUCHAL (GR)	541	48.414,68
8.1	ACEBUCHAL (GR)	551	49.309,59
10.2	MADROÑO (GR)	489	57.113,86
10.1	MADROÑO (GR)	544	63.537,71
11.2	GUAPA (GR)	521	93.157,41
11.1	GUAPA (GR)	526	94.051,44
5.2	MARCHANTE (GR)	1363	94.351,56
5.1	MARCHANTE (GR)	1398	96.774,38
6.2	RAMONCILLOS (GR)	634	136.034,85
6.1	RAMONCILLOS (GR)	664	142.471,83

**Tabla 6. Datos energéticos de los túneles seleccionados.**  
**Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Fomento (2015)**

A partir de estos datos, el consumo anual de estos 8 túneles, cuya longitud total es de 8.957 m, ascendería a algo más de 1 Millón de euros anuales o, expresado en unidades de longitud normalizadas, 113.890 euros por kilómetro de túnel construido. Extrapolando al total de la red estatal (291.133 m), tendríamos un consumo anual superior a 33 Millones de euros sin contabilizar los túneles de las redes autonómicas y provinciales.

La magnitud de las cifras anteriores justifica todo esfuerzo por minimizar estas desmesuradas facturas así como su elevado impacto medioambiental.

Uno de los problemas en el proyecto de un túnel carretero es el diseño de la iluminación. Aunque no es una tarea complicada para condiciones nocturnas, se hace más complicado para las condiciones diurnas (Schreuder, 1971; Adrian, 1982) debido a que el tiempo necesario para la adaptación visual de un entorno de luz del día a la oscuridad de un túnel es más largo durante el día que en condiciones nocturnas. Especialmente, la luminancia en la primera parte de la zona de umbral, es la parte donde más consumo de energía en el túnel se produce (CIE Publ., 1988).

Para el diseño de una instalación de iluminación del túnel, los ingenieros necesitan conocer el valor más alto de la luminancia ( $\text{cd} / \text{m}^2$  candelas por metros cuadrados). Hay varios métodos de aproximación para estimar la luminancia en el acceso a los túneles. En este trabajo el llamado método de  $L_{20}$  se ha utilizado según (CIE Publ., 1988).

El valor de la  $L_{20}$  es la luminancia en un campo cónico de ángulo  $20^\circ$  de vista, definido a una distancia igual a la distancia de seguridad ( $S_D$ ) como se define en (CIE Publ., 1988) a partir de la entrada del túnel, como se muestra en la (Fig.. 15). De acuerdo con esta norma CIE, el valor de  $L_{20}$  se obtiene de una imagen de los alrededores del túnel de entrada y con la Ecuación 4, ya mencionada.

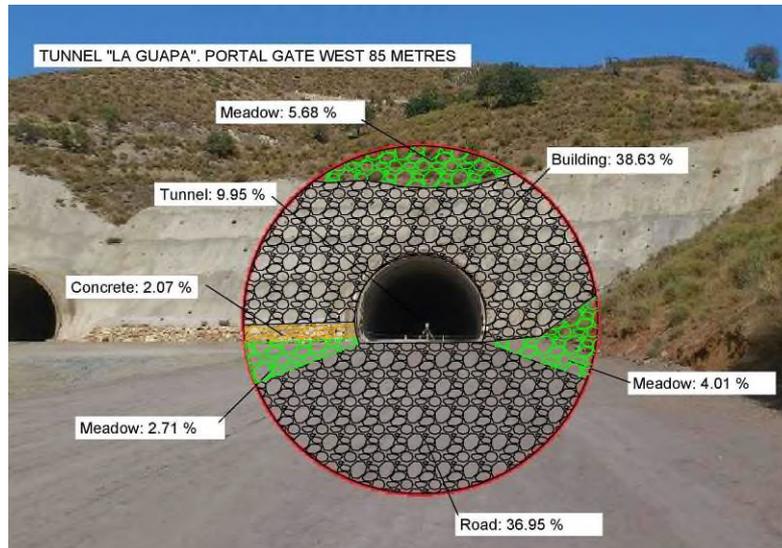
$$L_{20} \approx \gamma L_S + \rho L_R + m L_M + b L_B$$

**Ecuación 4. Cálculo de la  $L_{20}$**

En esta ecuación  $L_S$ ,  $L_R$ ,  $L_M$  y  $L_B$  son las luminancias medias del cielo, carretera, prado y edificios circundantes que rodean al túnel, mientras que, como se muestra en la (Fig.. 22),  $\gamma$ ,  $\rho$ ,  $m$  y  $b$  son los respectivos porcentajes de cielo, carretera, prado y edificios, que rodean al túnel, a la distancia de seguridad ( $S_D$ ) y con visión cónica de ángulo  $20^\circ$ . Estos coeficientes, obviamente, cumplen la Ecuación 5.

$$\gamma + \rho + m + b = 1$$

**Ecuación 5. Relación entre coeficientes en la expresión de la  $L_{20}$**



**Figura 22 Túnel carretero paralelo a la costa mediterránea en el sureste de España.  
Fuente: Elaboración propia (2014).**

Por lo tanto, la Ecuación 4. da el valor de la  $L_{20}$  en la entrada del túnel. Teniendo en cuenta que los valores de las luminancias pertinentes varían mucho dependiendo de la estación del año, la orientación del túnel, las condiciones atmosféricas y otras circunstancias (CIE Publ., 1988).

Driving direction (North Hem.)	$L_c$ (kcd/m <sup>2</sup> )	$L_r$ (kcd/m <sup>2</sup> )	$L_e$ (kcd/m <sup>2</sup> )			
			Concretes	Buildings	Snow	Meadow
N	8	8	3	8	15	2
E-W	12	4	2	6	10 (V) 15 (H)	2
S	16	5	1	4	5 (V) 15 (H)	2

**Tabla 7. Contribución de la  $L_{20}$  para distintos escenarios y ángulo cónico 20°. Fuente: CIE Publ., (1988).**

Si miramos con atención la tabla anterior, Tabla 7, muestra que cuanto más superficie tiene la zona de prado, menor es la contribución a la  $L_{20}$ . Por ejemplo, la completa vegetación de la zona construida, haría que la contribución de 8, 6 o 4 k<sub>cd</sub> / m<sup>2</sup> a sólo 2 k<sub>cd</sub> / m<sup>2</sup>.

De acuerdo con los argumentos anteriores, minimizando el  $L_{20}$ , que también significa una disminución en  $L_{th}$ , debido a que son proporcionales, los requisitos para la iluminación eléctrica del túnel será menor, logrando así un ahorro de energía notable. En este sentido, muchas filosofías diferentes se han estudiado en los últimos años, tales como estructuras de tensión (Gil-Martín et al., 2011), pérgolas (Peña-García et al., 2013) y tubos de luz (Gil-Martín et al. , 2014). Estas formas de ahorrar energía, analizan el uso de la luz solar para conseguir disminuir el peso de la iluminación eléctrica. Sin embargo, poco se ha investigado para reducir directamente los requisitos de la propia iluminación eléctrica.

Será esta menor reflectancia de los elementos vegetales en los emboquilles de túneles la que permitirá una significativa disminución de los requisitos lumínicos de los túneles. En este sentido, uno de los principales objetivos de la presente memoria será la propuesta de una estrategia basada en una completa vegetación de los emboquilles con plantas trepadoras, tal y como se presenta en el apartado Resultados.

#### 4. OBJETIVOS DE LA TESIS.

El objetivo general de la presente Tesis Doctoral es aportar un modelo y una filosofía de trabajo en los que los portales de los túneles de autovías, o en su caso de carreteras, se consideren desde una perspectiva global y unificada.

En este sentido, los objetivos particulares de esta memoria son dos:

1) Minimizar el desmesurado consumo energético de las instalaciones de alumbrado de los túneles mediante la vegetación total de sus portales con vegetación trepadora de baja reflectancia a la luz solar. Además de minimizar el consumo energético, dichas especies permitirán una mejor integración de la entrada del túnel con su entorno.

2) Proponer un índice cuantitativo que aúne criterios de eficiencia energética con criterios de integración paisajística de dichos portales, de manera que, por primera vez hasta la fecha, pueda hablarse del binomio ahorro energético-integración paisajística para estas infraestructuras tan críticas para la seguridad viaria.

No se trata, por tanto, de dos propuestas aisladas, sino de un trabajo de unificación de las distintas perspectivas desde las que hasta ahora se han considerado los portales de los túneles carreteros: la energética y la paisajística.

## 5. RESULTADOS

En el marco general de la problemática asociada a los túneles de autovías que se ha expuesto anteriormente, se presentan a continuación los resultados fundamentales de la presente memoria, que se pretende confluyan en una visión integrada del portal del túnel como elemento esencial para el encaje de estas instalaciones dentro del imprescindible marco de la sostenibilidad energética.

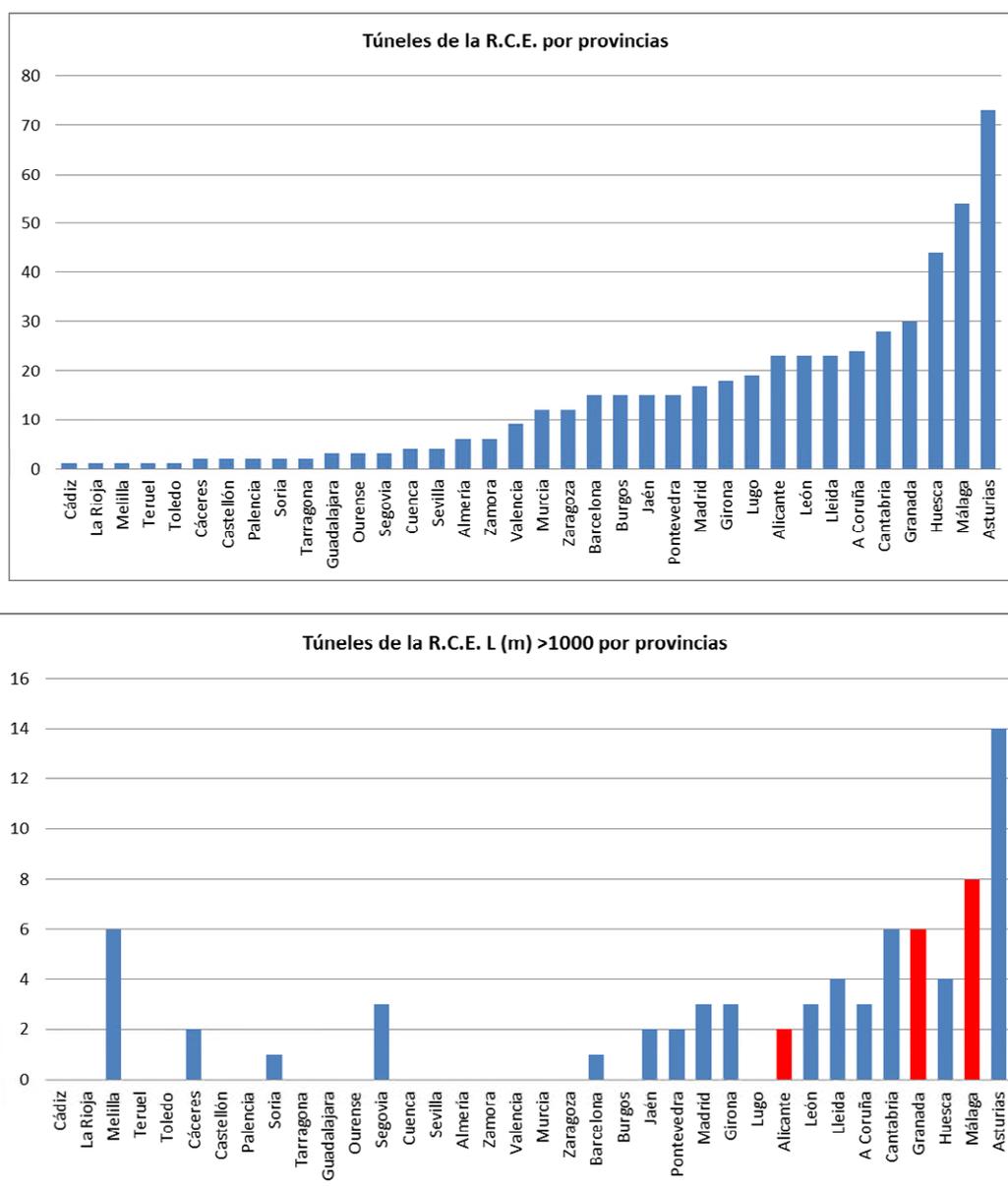
Para la elaboración de las propuestas presentadas se ha tomado como muestra una infraestructura de vanguardia por su reciente terminación, por su importancia estratégica para el transporte y el turismo de nuestro país (Burgos-Núñez y Olmo-García 2015) y, sobre todo, por el enorme reto que ha supuesto desde el punto de vista de la ingeniería, como es la Autovía A-7, y más en concreto en su recorrido a través de las provincias de Málaga y Granada.

	Granada	Granada	Granada	Granada	Granada	Málaga	Granada	Málaga	Málaga	Málaga	Málaga	Málaga	Málaga
	CANTALOBOS 1	CANTALOBOS 2	TRABO 2	TRABO 1	MARCHANTE 2	CERRO LECHÓN (AP 46)	MARCHANTE 1	CERRO LECHÓN (AP46)	CHURRIANA 1	CHURRIANA 2	TORROX	TORROX	CASARES 2
LONGITUD	2170	2170	2092	2082	1398	1370	1363	1330	1256	1213	1152	1148	1070
	CASARES 1												
	1063												

**Tabla 8. Túneles en Granada y Málaga con L >1000 metros.**  
Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Fomento (2015)

Tal y como se representa en la (Tabla 8) estas provincias tienen un lugar privilegiado en la Red de Carreteras del Estado (R.C.E.) en longitudes de túneles superiores a más de 1000 metros, destacando Granada con el túnel de Cantalobos (2.170 m) y Málaga con

Cerro Lechón de la AP-46 (1.370 m) o el túnel de Churriana de la A-7 (1.256 m). Este hecho unido a que en los últimos quince años se han ejecutado en estas provincias los túneles con mayor complejidad geotécnica y mejor dotados en sistemas de seguridad viaria de España, hacen de la zona un perfecto ámbito a la hora de realizar cualquier estudio relacionado con la sostenibilidad energética y la integración paisajística de túneles.



**Figura 23.** Número de túneles en la R.C.E., por provincias y con L >1.000 metros. Relación con A-7.  
**Fuente:** Elaboración propia a partir de Ministerio de Fomento (2015)

Como se puede ver en la Fig. 23, el peso de los túneles que conforman el eje de la A-7, es relevante en la red estatal de túneles con longitudes superiores a los 1.000 m.

Siendo las provincias de Granada, y en mayor medida Málaga, las que lideran en número de túneles de esa longitud, por detrás de Asturias. Lo que añade, si cabe, más interés en la elección de este recorrido para el presente trabajo.

### **5.1. Caracterización y valoración paisajística, energética y económica de los emboquilles de los túneles: propuesta de índice.**

En este apartado se propone un parámetro que permitirá valorar cuantitativamente los emboquilles de los túneles aunando sus impactos económico, paisajístico y energético. En los siguientes sub apartados se definirán las variables, se construirá el parámetro a partir de ellas y, finalmente, se aplicará a los túneles de una autovía de alta capacidad.

#### **5.1.1. Definición de variables de valoración. Aplicación a portales en la autovía A7.**

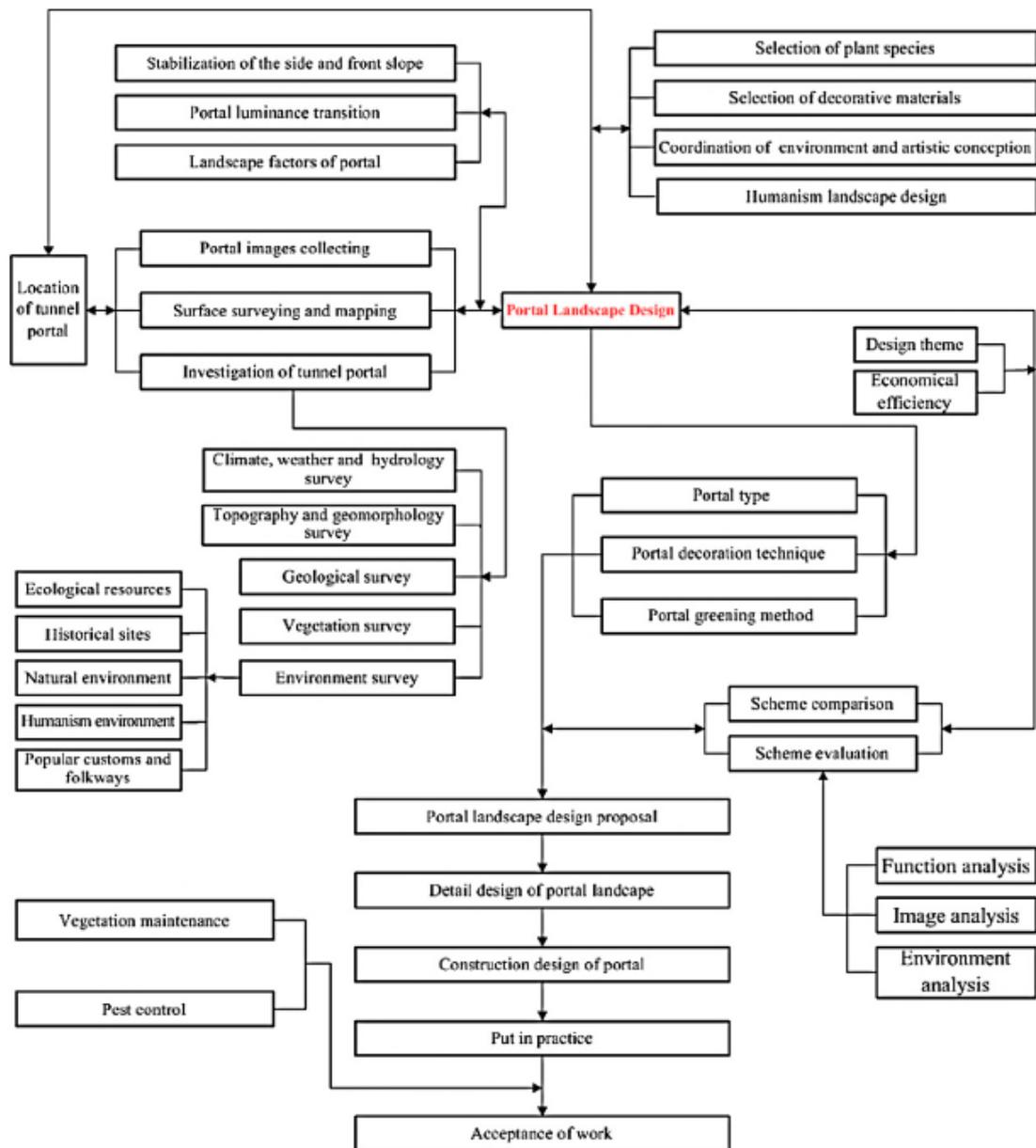
En este punto se pretende valorar cualitativa y cuantitativamente la integración del emboquille de los túneles en el territorio mediante la propuesta de un indicador que considere tanto la dimensión paisajística como el ahorro energético que de ella pueda derivarse. Para ello se han estudiado un total de 26 túneles, pertenecientes todos ellos a la red de alta capacidad del Ministerio de Fomento en su recorrido Transeuropeo denominado A-7, "Autovía del Mediterráneo, N-340 de Cádiz a Barcelona por Málaga".

A continuación (Tabla 9) se adjunta la relación de los 26 tubos seleccionados, se ha incluido el túnel de Gualchos (Granada), que en el momento de la redacción no se encontraba abierto al tráfico pero que ha sido inaugurado a finales de Septiembre de 2015, con lo que el corredor quedará totalmente representado al poder contar con la totalidad de túneles que lo forman.

Asimismo, en este estudio se ha realizado un análisis gráfico, que se incluye en el Apéndice nº1, realizado para cada uno de los túneles seleccionados, incluyendo los parámetros elegidos, cuyo principal objetivo, tal y como se ha comentado, es encontrar una relación entre la sostenibilidad económica en materia energética del túnel y su integración paisajística, a través de lo que se ve del mismo, como es su portal de entrada o emboquille. Por ello se han seleccionado inicialmente unas variables con el fin de caracterizarlas, en base a diversos estudios (Fei, y otros 2012).

Como se puede ver en el esquema siguiente, son numerosos los elementos a considerar en el diagrama de flujo del diseño paisajístico del emboquille de túneles, de

entre los que se pueden destacar la selección de especies vegetales y de materiales de construcción, tal y como se considerarán más adelante.

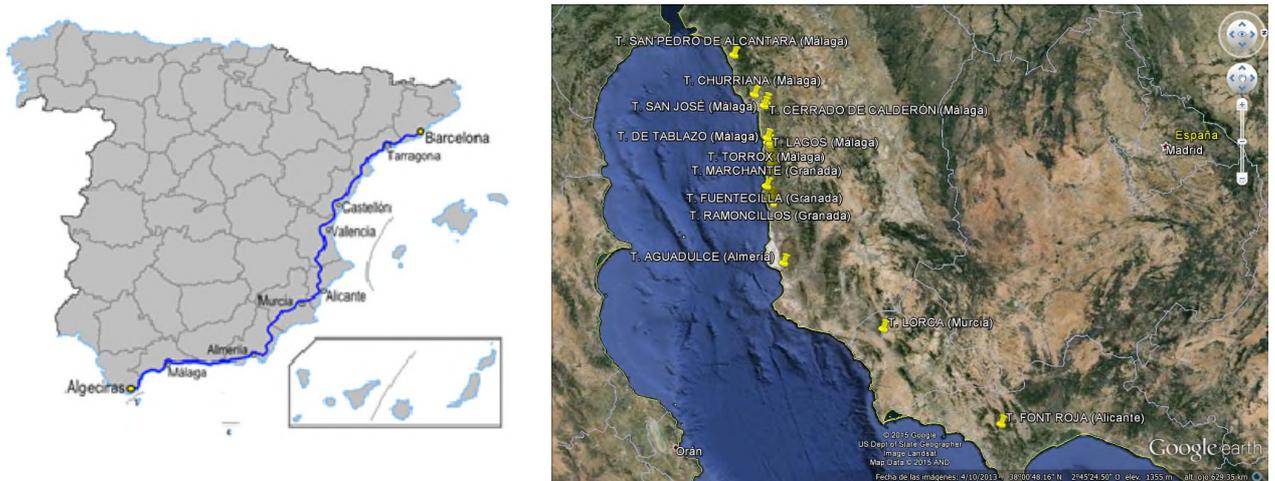


Esquema 1. Diagrama de flujo del diseño paisajístico del emboquille de túneles.  
Fuente: Fei, y otros (2012)

Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)
1.1	FONT ROJA - 2 (A)	898	13.2	GATO (GR)	260
1.2	FONT ROJA - 2 (A)	908	14.1	CHURRIANA (MA)	1213
1.3	FONT ROJA - 1 (A)	674	14.2	CHURRIANA (MA)	1256
1.4	FONT ROJA - 1 (A)	630	15.1	TORROX (MA)	1148
2.1	AGUADULCE (AL)	998	15.2	TORROX (MA)	1152
2.2	AGUADULCE (AL)	524	16.1	SAN PEDRO DE ALCANTARA (GR)	997
3.1	CANTALOBOS (GR)	2170	16.2	SAN PEDRO DE ALCANTARA (GR)	997
3.2	CANTALOBOS (GR)	2170	17.1	CAPISTRANO (MA)	928
4.1	TRABO (GR)	2092	17.2	CAPISTRANO (MA)	975
4.2	TRABO (GR)	2082	18.1	CERRADO CALDERÓN (MA)	735
5.1	MARCHANTE (GR)	1398	18.2	CERRADO CALDERÓN (MA)	770
5.2	MARCHANTE (GR)	1363	19.1	LAGOS (MA)	463
6.1	RAMONCILLOS (GR)	664	19.2	LAGOS (MA)	440
6.2	RAMONCILLOS (GR)	634	20.1	PINO (MA)	381
7.1	FUENTECILLA (GR)	580	20.2	PINO (MA)	387
7.2	FUENTECILLA (GR)	610	21.1	SAN JOSÉ (MA)	374
8.1	ACEBUCHAL (GR)	551	21.2	SAN JOSÉ (MA)	374
8.2	ACEBUCHAL (GR)	541	22.1	CERROSOL (MA)	176
9.1	CARCHUNA (GR)	540	22.2	CERROSOL (MA)	202
9.2	CARCHUNA (GR)	550	23.1	TABLAZO (MA)	164
10.1	MADROÑO (GR)	544	23.2	TABLAZO (MA)	138
10.2	MADROÑO (GR)	489	24.1	FRIGILIANA (MA)	56
11.1	GUAPA (GR)	526	24.2	FRIGILIANA (MA)	56
11.2	GUAPA (GR)	521	25.1	LORCA (MU)	560
12.1	CALACEITE (GR)	390	25.2	LORCA (MU)	954
12.2	CALACEITE (GR)	370	26.1	GUALCHOS (GR)	330
13.1	GATO (GR)	250	26.2	GUALCHOS (GR)	250

**Tabla 9. Elección de túneles de la A-7, Cádiz-Barcelona, N-340. (Elaboración Propia)**

**Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Fomento (2015)**



**Figura 24. Localización geográfica de los túneles en la A-7. Fuente: Google (2015)**

Es importante destacar que el orden representado en la Tabla 9, corresponde al mismo del que dispone el Ministerio de Fomento, no siendo un orden lógico geográfico tal y como cabría esperar, no obstante de Norte a Sur, empezaríamos con el túnel de Font Roja en Alicante, Lorca en Murcia, Aguadulce en Almería, Ramoncillos en Granada, Torrox en Málaga y terminaríamos con el túnel de San Pedro de Alcántara en Málaga.

Inicialmente, los criterios seguidos (Tabla 10) para la elaboración de nuestro modelo versaba en la elección de ocho parámetros que considerábamos engloban los aspectos paisajísticos y económicos más importantes de cualquier túnel, tales como, la estética,

el color, la cobertura, la textura, el tipo de construcción, la frecuencia en la conservación, el consumo energético del túnel y el coste económico del mismo en función los sistemas de seguridad viaria (según Real Decreto 635/2006, Ministerio de Fomento, 2006).

Así, para poder darle consistencia al método se define una escala para cada uno de los parámetros anteriores, valorada de 0 a 5, siendo el valor máximo (5) el deseado y (0) para el valor no deseado. De esta forma, por ejemplo, tendría el valor 5 un túnel con un consumo energético bajo y un valor 0 con un consumo excesivo, para el rango de datos disponibles.

ESCALA			ESTÉTICA	COLOR:	COBERTURA %:	TEXTURA:	CONSTRUCCIÓN:	CONSERVACION:	CONSUMO ENER.:	COSTE ECONÓMICO:
MUY ALTO	5		MAYOR INTEGRACIÓN	VERDE OSCURO	90	ARBOLADO DENSO	ESCOLLERA	POCA MANO OBRA	MENOS LUZ ELECT.	MENOS POBLADO
ALTO	4			VERDE CLARO	75					
MEDIO	3			AMARILLO	50	MATORRAL	MAMPOSTERÍA			
BAJO	2			OCRE	25					
MUY BAJO	1			GRIS	10					
NULO	0		MENOR INTEGRACIÓN	HORMIGÓN	0	SECANAL	HORMIGÓN	MUCHA MANO OBRA	MUCHA MÁS LUZ ELECT.	MÁS POBLADO

Tabla 10. Método: Variables y Escala iniciales. Fuente: Elaboración Propia

Procedemos a continuación a la descripción de cada uno de ellos.

La primera variable considerada fue genéricamente de carácter **Estético**, ya que se podría considerar de forma global el grado de integración del emboquille del túnel, valorando, con la mayor puntuación, lo que pudiera considerarse como el perfecto equilibrio entre la construcción y la integración paisajística, consiguiendo la solución del binomio: funcionalidad - integración.

No obstante, dado el carácter más subjetivo y personal de su evaluación, que hubiera requerido de una serie de encuestas de costosa realización, es por lo que ha sido descartada del modelo final.

**El color, la cobertura y la textura**, fueron variables elegidas por estar directamente relacionadas con la vegetación, forestación y densidad de población arbustiva o arbórea en la entrada del túnel, lógicamente cuando estos criterios fueran altos ello significaría una mayor integración, por lo que nuestra valoración tomaría valores cercanos al 5. También es sabido que todos los aspectos relacionados con la vegetación, tal y como se han comentado en este trabajo, colaboran en la integración de la infraestructura en el paisaje.

No obstante, al igual que la anterior, el color, la cobertura y la textura son parámetros difícilmente cuantificables, por lo que se ha considerado finalmente una sola variable global que mida de forma numérica y lo más objetivamente posible el porcentaje de renaturalización conseguido en el portal del túnel una vez construido y puesto en servicio. En el marco de la dualidad antes comentada entre naturalidad y artificialidad, integración-significación a esta la denominamos genéricamente **Valoración Paisajística**.

Esta valoración se ha calculado en función del porcentaje de superficie artificial y/o renaturalizada del emboquille, teniendo en consideración la superficie de la base del cono definido desde la distancia de parada de túnel en cuestión, relacionada con la velocidad de proyecto del túnel (que para la mayoría de los casos estudiados está comprendida entre 80 y 100 Km/h), por lo que se ha utilizado el cono de 20° a una distancia de 85 metros del emboquille del túnel, al igual que para el cálculo de la L<sub>20</sub> comentado en el apartado anterior. De esta forma, el porcentaje de renaturalización se obtiene de acuerdo a la superficie de la entrada con una cobertura suficiente de vegetación, en el área acondicionada en la excavación del emboquille, y el consiguiente mimetismo natural con el entorno del portal de entrada.

ESCALA		
0	0,00%	10,00%
1	10,00%	20,00%
2	20,00%	30,00%
3	30,00%	40,00%
4	40,00%	50,00%
5	50,00%	60,00%

**Tabla 11. Escala para el Valor Paisajístico. Fuente: Elaboración Propia**

Puesto que la superficie total a considerar en todos los casos no puede ser superior al 60%, dado que el resto corresponde al área de la carretera, en la escala de valoración se otorga el máximo valor a este porcentaje (Tabla 11). El resultado es el que se muestra en la Tabla 12, señalando que todos los cálculos adicionales se encuentran de forma detallada en el Apéndice nº1, del presente trabajo.

Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	% ARTIFICIALIDAD	% RENATURALIZACIÓN	VALOR PAISAJÍSTICO	Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	% ARTIFICIALIDAD	% RENATURALIZACIÓN	VALOR PAISAJÍSTICO
1.1	FONT ROJA - 2 (A)	898	87,75%	12,25%	1	13.2	GATO (GR)	260	49,59%	50,41%	5
1.2	FONT ROJA - 2 (A)	908	77,92%	22,08%	2	14.1	CHURRIANA (MA)	1213	66,65%	33,35%	3
1.3	FONT ROJA - 1 (A)	674	84,97%	15,03%	1	14.2	CHURRIANA (MA)	1254	75,65%	24,35%	2
1.4	FONT ROJA - 1 (A)	630	53,20%	46,80%	4	15.1	TORROX (MA)	1148	69,55%	30,45%	3
2.1	AGUADULCE (AL)	998	92,29%	7,71%	0	15.2	TORROX (MA)	1152	54,10%	45,90%	4
2.2	AGUADULCE (AL)	524	87,85%	12,15%	1	16.1	SAN PEDRO DE ALCANTARA (GR)	997	100,00%	0,00%	0
3.1	CANTALOBOS (GR)	2170	56,60%	43,40%	4	16.2	SAN PEDRO DE ALCANTARA (GR)	997	100,00%	0,00%	0
3.2	CANTALOBOS (GR)	2170	54,05%	45,95%	4	17.1	CAPISTRANO (MA)	928	91,64%	8,36%	0
4.1	ÍTRABO (GR)	2092	73,43%	26,57%	2	17.2	CAPISTRANO (MA)	975	54,13%	45,87%	4
4.2	ÍTRABO (GR)	2082	75,00%	25,00%	2	18.1	CERRADO CALDERÓN (MA)	735	59,78%	40,22%	4
5.1	MARCHANTE (GR)	1398	80,49%	19,51%	1	18.2	CERRADO CALDERÓN (MA)	770	61,62%	38,38%	3
5.2	MARCHANTE (GR)	1363	61,38%	38,62%	3	19.1	LAGOS (MA)	463	52,43%	47,57%	4
6.1	RAMONCILLOS (GR)	654	52,44%	47,56%	4	19.2	LAGOS (MA)	440	56,37%	43,63%	4
6.2	RAMONCILLOS (GR)	634	57,55%	42,45%	4	20.1	PINO (MA)	381	70,42%	29,58%	2
7.1	FUENTECILLA (GR)	580	72,05%	27,95%	2	20.2	PINO (MA)	387	77,64%	22,36%	2
7.2	FUENTECILLA (GR)	610	72,05%	27,95%	2	21.1	SAN JOSÉ (MA)	374	66,63%	33,37%	3
8.1	ACEBUCHAL (GR)	551	51,00%	49,00%	4	21.2	SAN JOSÉ (MA)	374	61,77%	38,23%	3
8.2	ACEBUCHAL (GR)	541	52,95%	47,05%	4	22.1	CERROSOL (MA)	176	47,52%	52,48%	5
9.1	CARCHUNA (GR)	540	69,50%	30,50%	3	22.2	CERROSOL (MA)	202	44,84%	55,16%	5
9.2	CARCHUNA (GR)	550	69,50%	30,50%	3	23.1	TABLAZO (MA)	164	58,77%	41,23%	4
10.1	MADROÑO (GR)	544	54,19%	45,81%	4	23.2	TABLAZO (MA)	138	49,62%	50,38%	5
10.2	MADROÑO (GR)	489	49,32%	50,68%	5	24.1	FRIGILIANA (MA)	56	62,19%	37,81%	3
11.1	GUAPA (GR)	526	53,23%	46,77%	4	24.2	FRIGILIANA (MA)	56	62,19%	37,81%	3
11.2	GUAPA (GR)	521	92,26%	7,74%	0	25.1	LORCA (MU)	560	56,58%	43,42%	4
12.1	CALACETTE (GR)	390	56,03%	43,97%	4	25.2	LORCA (MU)	954	49,66%	50,34%	5
12.2	CALACETTE (GR)	370	50,39%	49,61%	4	26.1	GUALCHOS (GR)	330	100,00%	0,00%	0
13.1	GATO (GR)	250	49,11%	50,89%	5	26.2	GUALCHOS (GR)	250	100,00%	0,00%	0

**Tabla 12. Valor Paisajístico de los túneles elegidos. Fuente: Elaboración Propia**

De la tabla anterior se han seleccionado los resultados correspondientes a los emboquilles con el mayor valor paisajístico, en función de la metodología explicada, y que se recogen en la siguiente (Tabla 13).

Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	% ARTIFICIALIDAD	% RENATURALIZACIÓN	VALOR PAISAJÍSTICO
22.2	CERROSOL (MA)	202	44,84%	55,16%	5
22.1	CERROSOL (MA)	176	47,52%	52,48%	5
13.1	GATO (GR)	250	49,11%	50,89%	5
10.2	MADROÑO (GR)	489	49,32%	50,68%	5
13.2	GATO (GR)	260	49,59%	50,41%	5
23.2	TABLAZO (MA)	138	49,62%	50,38%	5
25.2	LORCA (MU)	954	49,66%	50,34%	5

Tabla 13. Túneles de la A-7 con mayor valoración paisajística. Fuente: Elaboración Propia

Tal y como podemos observar, entre todos destacaría el túnel de **Cerrosol en Málaga**, por el adecuado nivel de vegetación y, consecuentemente, nivel de integración de su emboquille con el entorno, no quedando restos de la actuación sin acondicionar y destacando la conveniente textura, cobertura y color del portal de entrada, de acuerdo a los parámetros inicialmente considerados.



Figura 25. Portal (22.1) y (22.2) del túnel de Cerrosol en Málaga. Fuente: Google, (2015)

De la misma forma, podemos observar las características de los entornos que presentan un menor valor (0 %) de renaturalización. Entre ellos se pueden distinguir, por un lado, lo que sería un túnel urbano, por lo que no procede a ella, como el de San Pedro de Alcántara en Málaga o, por otro, uno recién construido y que no ha podido desarrollar una mínima cobertura vegetal, como el túnel de Gualchos en Granada.

ORDEN	Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	% ARTIFICIALIDAD	% RENATURALIZACIÓN	VALOR PAISAJÍSTICO
171	17.1	CAPISTRANO (MA)	928	91,64%	8,36%	0
112	11.2	GUAPA (GR)	521	92,26%	7,74%	0
21	2.1	AGUADULCE (AL)	998	92,29%	7,71%	0
161	16.1	SAN PEDRO DE ALCANTARA (GR)	997	100,00%	0,00%	0
162	16.2	SAN PEDRO DE ALCANTARA (GR)	997	100,00%	0,00%	0
261	26.1	GUALCHOS (GR)	330	100,00%	0,00%	0
262	26.2	GUALCHOS (GR)	250	100,00%	0,00%	0

Tabla 14. Túneles de la A-7 con menor valoración paisajístico. Fuente: Elaboración Propia



**Figura 26. Portales con mayor artificialidad (16.1-16.2) del túnel San Pedro de Alcántara en Málaga y (26.1-26.2) del túnel de Gualchos en Granada.**

**Fuente: Elaboración Propia y Google (2015)**

A la vista de estos casos, y como se ha comentado anteriormente, es completamente cierto que el entorno real de encuadre del túnel está muy relacionado con las posibilidades que se ofrecen para una perfecta integración, ya que un entorno con posibilidades integradoras facilitaría dicha labor, mientras que entornos urbanos, paisajes desérticos o kársticos, como el de Gualchos, requieren grandes esfuerzos. Precisamente en este punto, hay que destacar, como ejemplo de posibilidad de integración y mimetización con el entorno, el túnel de Lorca en Murcia, cuyos matices exteriores quedan bien reflejados en el contorno del túnel.



**Figura 27. Portal (25.1) y (25.2) del túnel de Lorca en Murcia.**

**Fuente: Google (2015)**

La siguiente variable escogida fue la **Construcción**, era importante diferenciar entre los distintos tipos de materiales necesarios, no sólo en el interior del túnel, sino sobre todo en los empleados y utilizados en los emboquilles, así de esta forma, materiales como la escollera, propios del lugar, o la mampostería se valoran positivamente (con mayor puntuación), primero por el menor coste y segundo por la mejor integración en el terreno de los materiales naturales ubicados en las mismas zonas donde se construye. Por el contrario, valoraciones más bajas (0-2), se asignan al empleo directo del hormigón, sin ningún tipo de ornamentación exterior, por imposibilidad de utilización de materiales pétreos, necesidades estructurales o enclaves urbanos.

Para una mayor precisión en la cuantificación objetiva de la “Construcción”, el parámetro finalmente utilizado ha sido el de **la Valoración Económica del Emboquille** en función de los elementos proyectados para el resultado final de la Obra Civil, con la posibilidad de utilizar escollera y/o adiciones exteriores como pérgolas o falsos túneles.

El cálculo de esta valoración, se ha realizado atendiendo a presupuestos de diversos proyectos del Ministerio de Fomento conocidos, cuyas valoraciones económicas (Fomento, 2012), quedan perfectamente regladas según los cuadros de precios de referencia exigidos y de obligado cumplimiento para todas las consultoras. En esta valoración económica también se ha añadido el coste que suponen las plantaciones en el contorno del túnel, a través de precios unitarios reflejados en los proyectos oficiales basados en el conocimiento y estudio de diferentes autores (López y C., 1999; Tormo-Blanes y otros, 2009).

El resultado, de los presupuestos a los que se ha tenido acceso, es el que se muestra en la Tabla 16, junto con la escala propuesta de acuerdo a los presupuestos totales de los túneles disponibles (Tabla 15), señalando que todos los detalles adicionales se encuentran en el Apéndice nº1.

ESCALA		
5	0 €	150.000 €
4	150.000 €	300.000 €
3	300.000 €	450.000 €
2	450.000 €	600.000 €
1	600.000 €	750.000 €
0	750.000 €	900.000 €

**Tabla 15. Escala para la Valoración Económica del Emboquille. Fuente: Elaboración Propia**

A partir de estos resultados, se puede observar, que cuanto menor ha sido el coste del conjunto de la entrada, mejor ha sido valorado, por su menor cuantía económica, por

---

ende también será mayor, de esta forma, el túnel del Acebuchal, que presenta el menor coste, seguido del de Gualchos y Madroño, todos ellos en Granada.

Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	Coste Emboquille €/por Tubo	VALORACIÓN E. EMBOQUILLE
8.2	ACEBUCHAL (GR)	541	132.209,63	5
8.1	ACEBUCHAL (GR)	551	134.653,44	5
26.2	GUALCHOS (GR)	250	144.812,49	5
26.1	GUALCHOS (GR)	330	191.152,48	4
10.2	MADROÑO (GR)	489	198.401,19	4
10.1	MADROÑO (GR)	544	220.716,25	4
6.2	RAMONCILLOS (GR)	634	295.055,47	4
6.1	RAMONCILLOS (GR)	664	309.017,08	3
14.1	CHURRIANA (MA)	1213	549.924,00	2
14.2	CHURRIANA (MA)	1256	569.418,43	2
7.2	FUENTECILLA (GR)	610	572.766,77	2
9.1	CARCHUNA (GR)	540	576.298,00	2
11.2	GUAPA (GR)	521	594.836,11	2
11.1	GUAPA (GR)	526	600.544,71	1
9.2	CARCHUNA (GR)	550	679.104,27	1
7.1	FUENTECILLA (GR)	580	956.718,73	0

**Tabla 16. Valoración Económica del Emboquille para los túneles conocidos.**

**Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Fomento (2015)**



**Figura 28. Portal (8.1) y (8.2) del túnel de Acebuchal en Granada.**

**Fuente: Google (2015)**

En el final de la tabla se encuentran los emboquilles de los túneles de la Fuentecilla (portal 7.1), Carchuna (portal 9.2), o la Guapa (portal 11.2 y 11.1), donde se puede comprobar (Fig. 29) que las actuaciones de estabilización de la zona de entrada junto con la disposición de falsos túneles, encarecen lógicamente la obra, lo que se ve reflejado en el presupuesto. Así, no es lo mismo una actuación de limpieza y saneamiento, con poca o nula longitud de falso túnel, como es el caso del túnel de Gualchos (Fig. 26), que una estabilización geotécnica junto a una considerable longitud de falso túnel en la zona de entrada, que siempre se verá encarecida.

Otro aspecto importante, de la valoración económica y su repercusión en la integración paisajística, son los bajos costes unitarios de las plantaciones respecto de

la obra civil, (López J., 1999), pudiendo mejorar notablemente el entorno y con una repercusión económica en el global del emboquille siempre inferior al 5% del total presupuestado.



Figura 29. Portal (7.1), (9.2) (11.2) y (11.1) del túnel de la Fuentecilla, Carchuna y la Guapa (Granada).  
Fuente: Elaboración Propia

La siguiente variable considerada en el planteamiento inicial fue **la Conservación** del túnel, la cual está íntimamente relacionada con la mano de obra y los materiales necesarios para el funcionamiento correcto del túnel y su entorno, tanto en infraestructura como en seguridad viaria, siendo esta última la que más peso tiene en una valoración económica. Dado que es independiente del binomio principal sostenibilidad-integración, dejamos su análisis y repercusión para futuros trabajos o nuevas líneas de investigación.

**El Consumo Energético** es un aspecto de un reconocimiento cada vez mayor, principalmente desde el punto de vista de la sostenibilidad energética, y hay recomendaciones desde la Administración Central en este sentido, como la Orden FOM 3317/2010 y la Orden Circular 36/2015, que establecen criterios para diseñar y proyectar de forma sostenible las infraestructuras. En este sentido, va nuestro principal interés a la hora de buscar el equilibrio entre sostenibilidad e integración, con el objetivo de conseguir una reducción del consumo energético y, por tanto, de la factura energética final, actuando en la zona umbral del túnel.

ESCALA		
5	0 €	25.000 €
4	25.000 €	50.000 €
3	50.000 €	75.000 €
2	75.000 €	100.000 €
1	100.000 €	125.000 €
0	125.000 €	150.000 €

**Tabla 17. Escala para la Valoración Energética para los túneles conocidos.**

**Fuente: Elaboración propia**

De este modo, desde el Ministerio de Fomento (2015) se nos ha facilitado los consumos de los túneles objeto de estudio (Tabla 18), a partir de los cuales se ha establecido una valoración energética en función de la distribución de consumos (Tabla 17), y un orden de los mismos de menor a mayor consumo energético, para poder así, más adelante, comparar estos resultados con las otras características evaluadas y comentadas anteriormente.

Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	Consumo €/año/Tubo	VALORACIÓN ENERGÉTICA
22.1	CERROSOL (MA)	176	16.364,78	5
26.2	GUALCHOS (GR)	250	17.880,50	5
22.2	CERROSOL (MA)	202	18.782,30	5
26.1	GUALCHOS (GR)	330	23.602,26	5
20.1	PINO (MA)	381	33.857,07	4
20.2	PINO (MA)	387	34.390,25	4
8.2	ACEBUCHAL (GR)	541	48.414,68	4
8.1	ACEBUCHAL (GR)	551	49.309,59	4
10.2	MADROÑO (GR)	489	57.113,86	3
10.1	MADROÑO (GR)	544	63.537,71	3
11.2	GUAPA (GR)	521	93.157,41	2
11.1	GUAPA (GR)	526	94.051,44	2
5.2	MARCHANTE (GR)	1363	94.351,56	2
5.1	MARCHANTE (GR)	1398	96.774,38	2
6.2	RAMONCILLOS (GR)	634	136.034,85	0
6.1	RAMONCILLOS (GR)	664	142.471,83	0

**Tabla 18. Escala para la Valoración Energética para los túneles conocidos.**

**Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Fomento (2015)**

Particularmente en el caso del túnel de Gualchos, dado que se encuentra en un tramo aún no en servicio a la hora de realizar este estudio, se nos ha facilitado el estudio de potencias previsto, por lo que a partir de esos datos hemos podido prever su consumo para el primer año de servicio.

Tal y como se puede observar (Tabla 18), naturalmente cuanto menor es la longitud del túnel, sus necesidades lumínicas son también menores, y se repiten de nuevo los túneles de Cerrosol (Fig. 25) y Gualchos (Fig.26) que se encuentran ambos en la parte superior de la tabla, por su menor longitud. Esto pone de relieve fundamentalmente la

importancia de la necesidad de actuar en las zonas de entrada de túneles largos, como el del Marchante (1.363 y 1.398 m), para tratar de conseguir una disminución de los consumos eléctricos (López, y otros, 2014).

Como también se puede observar, en el final de la tabla nos encontramos con el túnel de los Ramoncillos (Fig. 30) en Granada (inaugurado en diciembre de 2014) de 634 m y que, a pesar de tener menos de la mitad de longitud que el túnel del Marchante (1.363 m), su consumo es un 44% mayor, siendo ambos de última generación. Esto se debe a que en este túnel, el estudio de potencias inicial, con el que se ha contratado su explotación, requiere una potencia de 600 KW. Uno de los principales motivos de esta excesiva potencia, además de sus particulares sistemas de seguridad, es precisamente la orientación del mismo Este-Oeste, con unos valores lumínicos exteriores tan elevados que ha hecho necesaria dotar la zona umbral de unos valores muy altos y capaces de adaptar lo más rápidamente posible la oscuridad al ojo humano.

No obstante, estas potencias deberán de ajustarse tras su primer año de funcionamiento, mediante un nuevo estudio más preciso, e intentando acondicionar el emboquille del mismo para que las necesidades lumínicas disminuyan en la zona umbral del túnel.

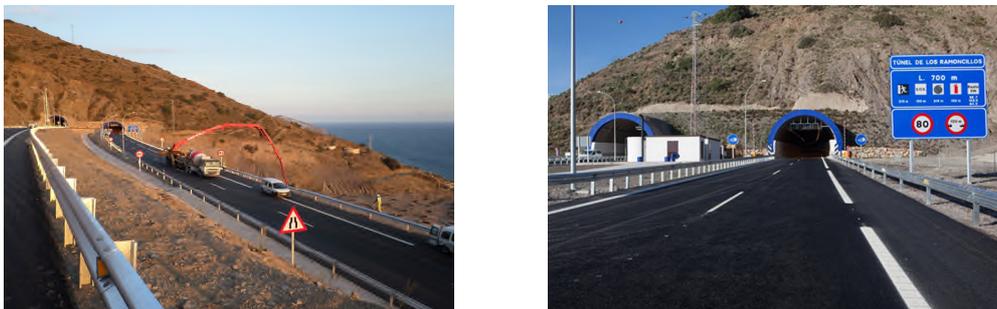


Figura 30. Portal (6.1) y (6.2) del túnel de Ramoncillos en Granada. Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, dentro de la variable **Coste Económico** había una componente importante de aspectos de seguridad, tal y como marca el Real Decreto 635/2006, por el que versan todas las instalaciones para una perfecta seguridad del usuario en el interior de un túnel, como televisión, radio, sistemas de ventilación, sistemas contra incendios, etc. y que por su especial importancia ya han sido comentados en el punto primero del presente trabajo. Sin embargo, dados los similares requerimientos de seguridad en todos los túneles, no se incluirá en el binomio sostenibilidad energética-integración.

A partir de las variables referidas se va a realizar un análisis comparativo de las mismas, cuyos resultados se comentan en el apartado siguiente.

### **5.1.2. Propuesta de un parámetro cuantitativo para la evaluación de portales de túneles en autovías de alta capacidad: Vector sostenibilidad.**

Se define “Sostenibilidad” (Real Academia de la Lengua Española, 2012), como “*Cualidad sostenible*”, definiéndose, a su vez, “sostenible” como:

*“1. adj. Que se puede sostener. Opinión, situación sostenible*

*2 adj. Especialmente en ecología y economía, que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente. Desarrollo, economía sostenible”.*

Evidentemente, la acepción objeto de la presente Tesis Doctoral será la segunda.

Por otro lado Macedo (2005), en su informe para la UNESCO argumenta, que el concepto de sostenibilidad surge por vía negativa, como resultado de los análisis de la situación del mundo, que puede describirse como una “*emergencia planetaria*” (Bybee, 1991), como una situación insostenible que amenaza gravemente el futuro de la humanidad y destaca uno de los primeros intentos por definir el concepto de sostenibilidad o sustentabilidad (CMMAD, 1988): “*El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades*”.

En este sentido, el parámetro que se propone a continuación, permitirá valorar la sostenibilidad de un túnel, entendida como desarrollo presente sin comprometer el desarrollo futuro (CMMAD, 1988), en función de variables definidas previamente para cada portal.

Una vez introducidas las variables para la valoración de los aspectos relativos a costes de construcción, consumo energético e integración paisajística, tomando como ejemplo túneles de la autovía de alta capacidad A7 en el tramo que transcurre por las provincias de Málaga y Granada, estamos en disposición de proponer a partir de dichas variables, un parámetro que relacione y haga más compacta la relación entre cada una de las variables anteriores para un portal determinado.

En efecto, un túnel cuyo portal esté completamente cubierto de vegetación resulta más sostenible, dado que la sujeción del terreno es mejor, el balance de emisión y absorción de oxígeno y dióxido de carbono es más positivo, afronta mejor los extremos climáticos, entre otras muchas ventajas. Por otro lado, un túnel cuyo emboquille sea más caro o requiera más operaciones especiales, requerirá un mayor empleo de maquinaria, explosivos etc. con el lógico detrimento de la sostenibilidad del proceso de construcción. Del mismo modo, tal y como se demuestra en el apartado 5.2, un túnel cuyo portal esté completamente cubierto de vegetación, requerirá niveles de iluminación más bajos en su interior y, por tanto, menor consumo energético e

---

---

impacto medioambiental debido a la reducción del empleo de materias primas y emisión de gases de efecto invernadero.

Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	VALORACIÓN ENERGÉTICA ( c )	VALORACIÓN ECONÓMICA EMBOQUILLE ( b )	VALOR PAISAJÍSTICO ( l )
8.1	ACEBUCHAL (GR)	551	4	5	4
8.2	ACEBUCHAL (GR)	541	4	5	4
10.2	MADROÑO (GR)	489	3	4	5
10.1	MADROÑO (GR)	544	3	4	4
26.1	GUALCHOS (GR)	330	4	5	0
26.2	GUALCHOS (GR)	250	5	5	0
6.2	RAMONCILLOS (GR)	634	0	4	4
6.1	RAMONCILLOS (GR)	664	0	3	4
11.1	GUAPA (GR)	526	2	1	4
11.2	GUAPA (GR)	521	2	2	0

**Tabla 19. Disponibilidad de Variables conocidas. Fuente: Elaboración Propia**

Si expresamos todas las variables conocidas, del apartado anterior, de forma conjunta (Tabla 19) y como coordenadas de un vector tridimensional, que denominaremos, genéricamente, **vector sostenibilidad**, aun cuando ésta dependa efectivamente de una mayor cantidad de factores (Ahn, y otros 2010), este tendrá la forma,

$$\vec{S} = (c, b, l)$$

**Ecuación 6. Vector sostenibilidad**

Si lo aplicamos a un ejemplo de la Tabla 19, por ejemplo, al portal del túnel de la Guapa etiquetado como 11.2 (Fig. 29), tendría un vector sostenibilidad,  $\vec{S} = (2,2,0)$  mientras que, para el portal del túnel Acebuchal etiquetado como 8.1, dicho vector sería  $\vec{S} = (4,5,4)$ .

A simple vista resulta evidente que el túnel del Acebuchal tiene una mejor integración paisajística así como un menor consumo energético de su instalación de alumbrado y, además, el coste de la construcción de su emboquille fue menor. Sería, por tanto, un túnel más sostenible.

Sin embargo, en casos menos extremos, dicha conclusión no sería tan evidente. Es necesario, por tanto, proporcionar una metodología para comparar los vectores sostenibilidad de distintos túneles. En este sentido, podemos recurrir a ciertos conceptos básicos de los vectores para obtener interesantes conclusiones.

En concreto, podemos expresar dicho vector, en lugar de por sus coordenadas, por su módulo y ángulos directores. (Ecuación 7 y 8)

$$|\vec{S}| = \sqrt{c^2 + b^2 + l^2}$$

**Ecuación 7. Módulo del vector sostenibilidad**

$$\theta = a \tan\left(\frac{b}{l}\right)$$

$$\varphi = a \tan\left(\frac{b}{c}\right)$$

**Ecuación 8. Ángulos Directores del vector sostenibilidad**

Volviendo a los ejemplos anteriores, en el caso del túnel de la Guapa (Tubo 11.2), tendríamos:

$$|\vec{S}|_G = \sqrt{2^2 + 2^2 + 0^2} = \sqrt{8} \approx 2.83; \theta_G = a \tan\left(\frac{2}{0}\right) = 90^\circ; \varphi_G = a \tan\left(\frac{2}{2}\right) = 45^\circ$$

Mientras que para Acebuchal (Etiqueta 8.1), los parámetros anteriores serían:

$$|\vec{S}|_A = \sqrt{4^2 + 5^2 + 4^2} = \sqrt{57} \approx 7.55; \theta_A = a \tan\left(\frac{5}{4}\right) = 51^\circ; \varphi_A = a \tan\left(\frac{5}{4}\right) = 51^\circ$$

Comparando los parámetros anteriores, vemos que un túnel cuyo **vector sostenibilidad** tiene un módulo mayor que otro es, más sostenible en tanto la combinación de sus parámetros de integración, consumo y coste del emboquille es mejor. Este hecho queda patente en el ejemplo anterior, ya que, por determinadas circunstancias, el túnel de la Guapa tiene un elevado consumo (93.157,41 €/año), una nula integración paisajística (debida a problemas de deslizamiento durante su construcción en el portal) y su emboquille supuso un alto coste (600.544,71 €) por las mismas razones. Por el contrario, Acebuchal tiene un menor consumo energético (49.309,59 €), un alto porcentaje de la superficie de su emboquille está forestada y el coste de dicho emboquille fue menor (134.653,44 €) que en el caso de la Guapa. El hecho de que, el módulo de su vector sostenibilidad sea mayor, está de acuerdo con esta realidad.

Sin embargo, además del módulo, los ángulos definidos aportan también una valiosa información sobre la sostenibilidad del túnel. En este sentido, los túneles más sostenibles tendrán ángulos cercanos a 45°, siempre y cuando su módulo sea alto, lo cual significa que las coordenadas que definen dicho ángulo están equilibradas. Los valores extremos cercanos a 0° o a 90° implican que una de las variables tiene un valor muy bajo y, por tanto, indicaría la necesidad de operaciones de mejora, aun cuando el módulo sea alto.

Por ejemplo, en el túnel de la Guapa, el hecho de que su ángulo  $\theta$  tenga un valor de  $90^\circ$  concuerda con el hecho de que su portal presente una total ausencia de vegetación con el perjuicio que ello significa. Un ángulo  $\theta$  de  $0^\circ$  ó considerablemente bajo implicaría un alto coste del emboquille, aun cuando el módulo del vector sostenibilidad no fuese demasiado malo.

De la misma forma, para el ángulo  $\varphi$  valores altos implicarán consumos altos y valores bajos significarán costes de emboquilles altos.

En definitiva, estos tres parámetros del vector que hemos definido como “sostenibilidad”, ayudan a cuantificar aspectos sumamente importantes de su emboquille y, lo que supone una auténtica innovación, relaciona dichos aspectos entre sí de forma gráfica e intuitiva.

### 5.1.3. Comparativa y aplicación del vector sostenibilidad a los túneles de un tramo de la autovía de alta capacidad A7.

Expuesta la metodología utilizada, se trata en este punto de analizar y comparar los resultados obtenidos. Para ello, antes de representar el vector sostenibilidad para cada uno de los túneles conocidos, se compararán dos a dos, por una lado las variables consumo energético y coste del emboquille y, por otro, la valoración paisajística frente al coste del emboquille.

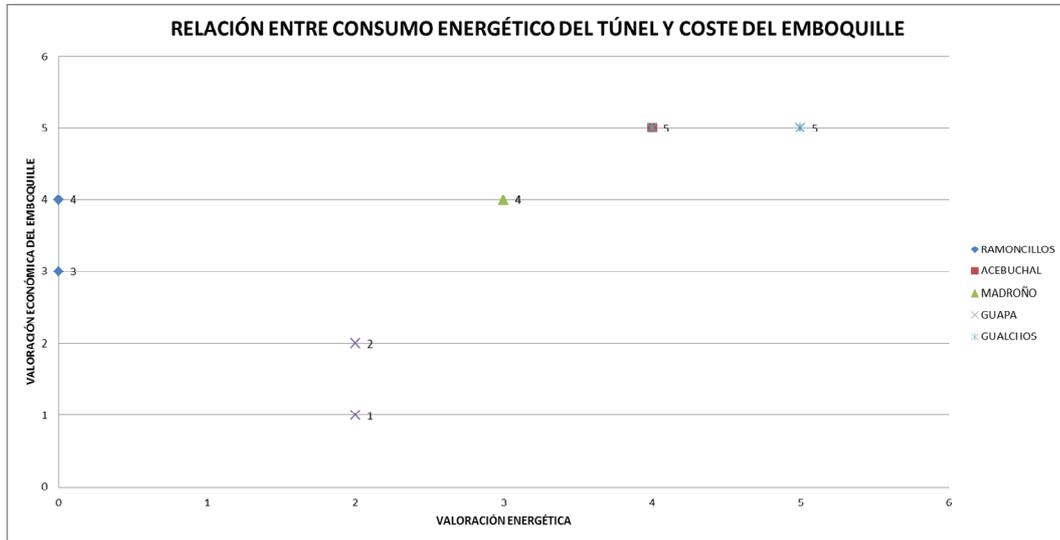
Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	VALORACIÓN ENERGÉTICA ( c )	VALORACIÓN ECONÓMICA EMBOQUILLE ( b )
8.1	ACEBUCHAL (GR)	551	4	5
8.2	ACEBUCHAL (GR)	541	4	5
10.2	MADROÑO (GR)	489	3	4
10.1	MADROÑO (GR)	544	3	4
26.1	GUALCHOS (GR)	330	4	5
26.2	GUALCHOS (GR)	250	5	5
6.2	RAMONCILLOS (GR)	634	0	4
6.1	RAMONCILLOS (GR)	664	0	3
11.1	GUAPA (GR)	526	2	1
11.2	GUAPA (GR)	521	2	2

**Tabla 20. Relación Consumo Energético-Coste de Emboquille.**

Fuente: Elaboración Propia

Dado que la información disponible no ha sido completa para la totalidad de los 26 túneles inicialmente seleccionados, se ha reducido finalmente la muestra tan solo a diez túneles con la totalidad de los datos disponibles para realizar las valoraciones de los mismos, no obstante, siendo de longitudes no muy dispares. De esta forma se ha podido confeccionar la Tabla 19, que se considera relativamente representativa, para

poder relacionar las valoraciones efectuadas, como son la paisajística, la energética y la valoración económica del emboquille.



**Figura 31. Relación Consumo Energético-Coste de Emboquille.**

**Fuente: Elaboración Propia**

Del estudio comparativo de las valoraciones económicas, **Valoración Energética** y del **Emboquille**, (Tabla 20 y Figura 31), se observa que se da el hecho de la existencia en todos estos casos de una relación del mismo orden, excepto en el caso anteriormente mencionado del de Ramoncillos, por su orientación singular y el de la Guapa, por sus actuaciones geotécnicas. Es decir que coinciden unos reducidos consumos energéticos con un reducido coste de los elementos de los emboquilles.

De la comparativa entre **Coste del Emboquille** y **Valoración Paisajística**, (Tabla 21 y Figura 32), se observa igualmente una correspondencia entre ambas, excepto en los casos de los túneles de la Guapa donde en su salida ha tenido un grave deslizamiento y el de Gualchos de reciente construcción. Estos casos, con la información disponible para realizar las valoraciones, muestran su idoneidad al presentar elevados valores paisajísticos con reducidos costes en la construcción de sus emboquilles.

Optimización del consumo eléctrico en el alumbrado de túneles en autovías de alta capacidad mediante actuaciones sobre el entorno. Análisis crítico de la normativa vigente.

Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	VALORACIÓN ECONÓMICA EMBOQUILLE ( b )	VALOR PAISAJÍSTICO ( I )
8.1	ACEBUCHAL (GR)	551	5	4
8.2	ACEBUCHAL (GR)	541	5	4
10.2	MADROÑO (GR)	489	4	5
10.1	MADROÑO (GR)	544	4	4
26.1	GUALCHOS (GR)	330	5	0
26.2	GUALCHOS (GR)	250	5	0
6.2	RAMONCILLOS (GR)	634	4	4
6.1	RAMONCILLOS (GR)	664	3	4
11.1	GUAPA (GR)	526	1	4
11.2	GUAPA (GR)	521	2	0

Tabla 21. Relación entre Valoración Paisajística y Coste de Emboquille. Fuente: Elaboración Propia.

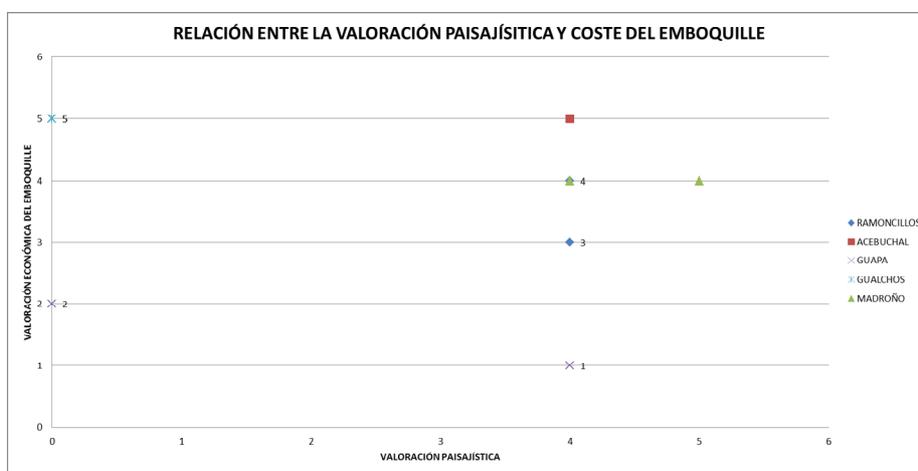


Figura 32. Relación entre Valoración Paisajística y Coste de Emboquille. Fuente: Elaboración Propia.

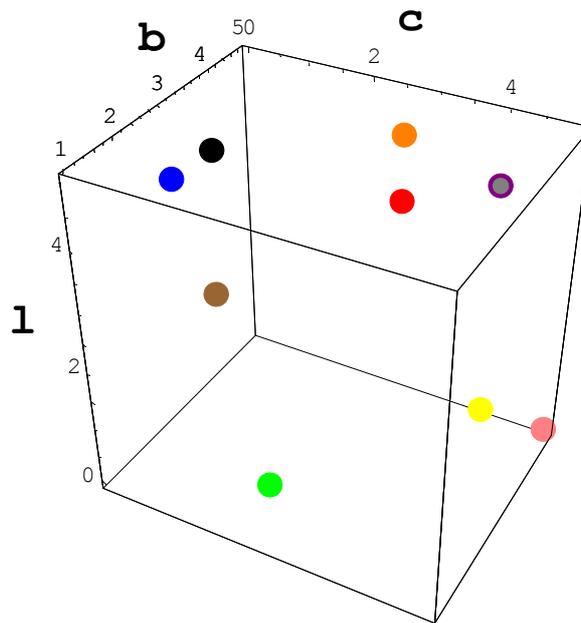
Una vez representadas las relaciones entre estas variables por parejas, puede darse el salto a la situación tridimensional que requiere la representación del denominado vector sostenibilidad.

A continuación se muestran los parámetros de dicho vector para los túneles estudiados (Tabla 22).

Nº	TÚNEL	VALORACIÓN ENERGÉTICA ( c )	VALORACIÓN ECONÓMICA EMBOQUILLE ( b )	VALOR PAISAJÍSTICO ( I )	MÓDULO	$\theta = a\text{Tag}(b/l)$	$\varphi = a\text{Tag}(b/c)$
8.1	ACEBUCHAL (GR)	4	5	4	7,55	51º	51º
8.2	ACEBUCHAL (GR)	4	5	4	7,55	51º	51º
26.2	GUALCHOS (GR)	5	5	0	7,07	90º	45º
26.1	GUALCHOS (GR)	4	5	0	6,40	90º	51º
11.1	GUAPA (GR)	2	1	4	4,58	14º	27º
11.2	GUAPA (GR)	2	2	0	2,83	90º	45º
10.2	MADROÑO (GR)	3	4	5	7,07	39º	53º
10.1	MADROÑO (GR)	3	4	4	6,40	45º	53º
6.2	RAMONCILLOS (GR)	0	4	4	5,66	45º	90º
6.1	RAMONCILLOS (GR)	0	3	4	5,00	37º	90º

**Tabla 22. Vector Sostenibilidad para las Variables conocidas. Fuente: Elaboración Propia**

De la representación de estos resultados en un gráfico en 3D (figura 33), se puede apreciar mejor la relación entre los distintos vectores sostenibilidad de los túneles considerados. Para una mejor identificación, en esta figura el color de cada punto se corresponde con el empleado en la Tabla 22. En aras de una mayor claridad de la figura, no se representan los vectores sino la coordenada de su extremo, partiendo todos ellos del origen (0,0,0).



**Figura 33. Representación tridimensional para las variables conocidas.**  
Fuente: Elaboración Propia

Como se ha comentado anteriormente, se puede observar claramente que el caso mejor situado corresponde a los emboquilles del túnel del Acebuchal, con módulos superiores a 7 y ángulos directores por encima de 45°. Siguiéndole muy de cerca los emboquilles del túnel del Madroño, cuyos módulos también son cercanos a 7 y ángulos superiores a 35°.

## **5.2. Forestación de portales de túneles con vegetación trepadora para minimizar el consumo energético de las instalaciones de alumbrado.**

Tal y como se indicaba en el apartado “Consumo energético del alumbrado de túneles en autovías” la vegetación de los emboquilles de los túneles puede redundar en un

descenso de sus requisitos lumínicos. Sin embargo hasta la fecha no se ha llevado a cabo ningún intento cuantitativo y sistemático para la selección de las especies vegetales más adecuadas, desde el punto de vista lumínico para las distintas casuísticas que puedan presentarse.

En este apartado se presentarán los resultados obtenidos al considerar varias especies candidatas para la vegetación de túneles situados en un entorno climático e hidrológico de tipo Mediterráneo.

### **5.2.1. Selección de especies vegetales.**

A la hora de evaluar posibles especies vegetales, se ha partido de la necesidad de cubrir completamente de vegetación de la superficie del cono L<sub>20</sub>. Como se ha comprobado anteriormente en la mayoría de los casos la vegetación de los portales es de tipo puntual, dejando sin cubrir amplias zonas de roca o terreno natural. Desde un punto de vista lumínico, este hecho no reproduciría las condiciones para las que se han establecido los requisitos lumínicos del documento CIE (1988) recogidos en la Tabla 7.

Por esta razón en la presente memoria se proponen especies trepadoras cuyas características les permiten una cubierta de vegetación más frondosa (López y otros, 2015), y que además se utilizan habitualmente en la revegetación de taludes (Tormo-Blanes, y otros 2009; Serrano Bernardo, y otros 2015).

Se han considerado para el estudio cuatro especies trepadoras para su posible integración sobre los portales de entrada de los túneles: *Hedera helix*, *Carpobrotus edulis*, *Jasminum nudiflorum* y *Macfadyena unguis-cati*.

A continuación se hace un breve resumen sobre las características principales de estas especies. (López y C. 1999; Tormo-Blanes, y otros 2009).

#### **Hiedra común (*Hedera helix*)**

La hiedra común o *Hedera helix* es una especie botánica de hiedra originaria de los bosques húmedos del oeste, el centro y el sur de Europa, norte de África y Asia, desde la India hasta Japón (Ruiz de la Torre y Ceballos 1971). Es una planta relictica y uno de los escasos sobrevivientes en Europa de la flora laurisilva de la era terciaria. Se cree que su fácil dispersión, propiciada por las aves, la ayudó a colonizar de nuevo amplias zonas de donde había desaparecido durante las glaciaciones.



**Figura 34. Hedera hélix. Fuente: Bettini y Arrigo (2009)**

Entre las características principales de esta especie (Bettini y Arrigo 2009) y su hábitat, podemos citar las siguientes:

- Sus hojas son perennes, resistentes y duraderas, de tipo coriáceas. El color es verde brillante y tamaños entre 5-10 cm de diámetro. Coexisten dos tipos de hoja en la misma planta, las de ramas no floríferas de hoja lobulada y las carentes de lóbulos en las ramas floríferas.
- Las flores son pequeñas, de color verde formando un corimbo, el fruto es una baya negra del tamaño de un guisante y venenoso.
- Es trepadora, no parásita, de crecimiento rápido, alcanzando hasta los 50 m. de longitud, puede durar más que el árbol sobre el que trepa.
- Las temperaturas entre 10º y 20º C, aunque resisten bien el frío.
- Se adecúan mejor a los ambientes húmedos.
- Crecen más en sombra pero una vez desarrollada necesitan más luz solar directa.
- Se desarrollan en suelos alcalinos, abonados y con buen drenaje admitiendo varios sustratos, pero el más indicado son los de ph. entre 6 y 7.

### **Carpobrotus edulis**

La *Carpobrotus edulis* o vulgarmente uña de gato (no confundir con unguis-cati) es una especie de plantas de la familia Aizoaceae (Ruiz de la Torre y Ceballos 1971). Una de las causas de su introducción fue su empleo como enmienda en obras públicas para asentar taludes y frenar de esta forma la erosión provocada por motivos de

escorrentías o desertización, no obstante, hoy se emprenden medidas de control para evitar la afectación a la flora autóctona.



**Figura 35. *Carpobrotus edulis*. Fuente: Bettini y Arrigo (2009)**

Entre las características principales de esta especie y su hábitat (Bettini y Arrigo 2009), podemos citar las siguientes:

- Porte rastrero y suculento; con tendencia a expandirse por grandes superficies formando tupidas alfombras no pisables, la longitud del tallo, puede llegar hasta los 2 m. levantando sólo unos 15 cm del suelo.
- Las hojas son perennes, gruesas, de color verde vivo, a veces púrpura en los extremos, y ahusadas, con textura cérea y sección triangular, curvadas hacia arriba, y tamaño de un dedo índice. En suelos muy salinos, pueden poseer una especie de costra salina que les da un color blanquecino en superficie.
- Se usa como cubierta de suelos o recubriendo muros muy altos, revegetando taludes secos y escarpados en zonas costeras.
- Se reproducen muy fácilmente, en cualquier época del año, plantando para ello unos 7 o 10 esquejes por metro cuadrado.
- Tolera muy bien las características edáficas inadecuadas para otras plantas, como la salinidad, por lo que se desarrollan en suelos pobres, secos e inadecuados. Son muy resistentes a la sequía.
- Necesitan mucha luz y pleno sol. La temperatura mínima resiste es de  $-6^{\circ}\text{C}$ .
- Respecto a los cuidados especiales, en realidad no necesita ninguno, ya que donde otras muchas plantas no podrían progresar ella prospera, y son perfectamente pisables.

### **Jasminum nudiflorum**

La *Jasminum nudiflorum* o jazmín es una especie de arbusto de la familia de las oleáceas (Ruiz de la Torre y Ceballos 1971). Es originaria del sudeste del Tibet.



**Figura 36. *Jasminum nudiflorum*. Fuente: Bettini y Arrigo (2009)**

Entre las características principales de esta especie y su hábitat (Bettini y Arrigo 2009), podemos citar las siguientes:

- Es una planta trepadora de hoja caduca y tallo cuadrangular. Tiene hojas pinnadas y opuestas de color verde oscuro, trifoliadas y folíolos elípticos.
- Las flores solitarias tienen seis pétalos de color amarillo claro que crecen en las axilas, aparecen sobre ramificaciones sin hojas en pleno invierno en las ramas del año anterior. Debido a su temprana floración, es aconsejable asociarlo a otras trepadoras que den su nota de color en otra época del año, tales como rosales, clemátides o madreselvas. De cualquier modo, la densidad y el bello tono verde profundo de su ramaje asegura un bello efecto el resto del año.
- Sus necesidades lumínicas contemplan el pleno sol, pero viven bien en semisombra, especialmente en regiones de veranos calurosos, resisten muy bien las heladas.
- El riego necesita ser regular, no copioso, de una a dos veces a la semana según que el ejemplar esté cultivado en plena tierra o en maceta. No regar en días con heladas.
- Los usos principales son para cubrir paredes, muros, celosías o vallas.
- Se desarrollan en una gran variedad de suelos, preferiblemente en suelos ricos en humus, bien abonados y drenados, pudiendo ser de tipo calizo.
- Se desarrolla sin dificultad por estacas de madera semiduras con hojas, tomadas a fines del verano y puestas a enraizar en invernadero.

### Macfadyena unguis-cati



Figura 37. *Macfadyena unguis-cati*. Fuente: Bettini y Arrigo (2009)

*Macfadyena unguis-cati*, uña de gato, (Fig. 37) es una especie fanerógama, de la familia bignoniáceas (Ruiz de la Torre y Ceballos 1971). Es nativa de la selva tropical seca de Centroamérica, Suramérica y el Caribe, y está presente en todo el mundo, a excepción de la Antártida. Afecta a todas las capas de plantas de los ecosistemas forestales por su difusión rápida tanto vertical como horizontalmente en contacto con el dosel herbáceo

Entre las características principales (Bettini y Arrigo 2009) de esta especie y su hábitat, podemos citar las siguientes:

- Es una planta vigorosa. leñosa y de tallos delgados siendo de las pocas trepadoras realmente autoadherentes, se agarra a casi cualquier superficie utilizando además de los zarcillos, pequeñas raíces aéreas que tienen sus ramas. Tiene una gran densidad de hojas pequeñas y muy brillantes de tipo semipersistente, pues en lugares protegidos, donde no recibe heladas, lo conserva siempre, y donde suelen presentarse heladas, lo pierde parcialmente. Sus hojas de color verde, son opuestas, bi-foliadas, terminadas en zarcillos de 3 ramas en forma de gancho. Los folíolos tienen una longitud de 3 a 4 cm. En primavera o a principios de verano se cubre de una manta de flores amarillas en forma de trompeta, aunque duran poco y pueden crecer solas o en grupos de 2 o 3. Tienen un diámetro de 4 a 5 cm. Los frutos, son cápsulas lisas de color castaño. Tienen una longitud de 20 a 40 cm por 1 a 1,5 cm de diámetro.
- Atención a su carácter invasor son voraces y difíciles de erradicar, creciendo con muchísima rapidez por semillas y también por esquejes.
- Su utilización es ideal para cubrir paredes altas o muros por su abundante floración, aunque sólo dura algunas semanas.

- Necesita mucha luz y exposición a pleno sol, estando bien adaptada a los climas secos y calurosos, sus raíces grandes y carnosas le permiten sobrevivir a la sequía y aguanta temperaturas de hasta -8°C.
- El suelo conviene que drene bien y sea fresco y con algo de materia orgánica. El riego debe ser regular pero con cantidades de agua moderadas evitándolo en invierno, abonándolo con estiércol en primavera y hacia finales de verano.

Dado que el objeto del presente trabajo consiste en la integración de una de estas especies en un túnel en el sureste de España, junto al mar Mediterráneo, con el objetivo de disminuir el consumo energético debido a su alumbrado, atenderemos a las características de estas especies que mejor se adapten a este hábitat.

A la vista de las cuatro especies trepadoras estudiadas para su posible integración sobre los portales de entrada a los túneles, Hedera helix, Carpobrotus edulis, Jasminum nudiflorum y Macfadyena unguis-cati, parece interesante decantarse en una primera aproximación entre la Hedera Helix o la Macfadyena unguis-cati, teniendo en cuenta que la ubicación de las mismas será en zona costera y clima mediterráneo.

De la Macfadyena unguis-cati, su excesiva floración más su carácter invasor, implicaría un especial mantenimiento. No obstante su resistencia a la sequía y su desarrollo en suelos de características afines al clima mediterráneo es lo que hace fijarnos en ella.

De la Hedera Helix, tenemos a su favor la necesidad de luz, su crecimiento rápido, hoja perenne (fundamental en su aplicación de la obra pública vial), resistente y duradera, su carácter trepador, ayudará a cubrir mayor superficie alrededor y encima del túnel, mejorando por tanto los parámetros lumínicos interesados en el objeto de este trabajo, necesitando muy poco mantenimiento. La necesidad de excesiva humedad, frustra nuestra incipiente elección, ya que siendo una cualidad indispensable, nuestro clima costero y mediterráneo podría secalarla. No obstante como la orientación de los túneles, en todo el arco mediterráneo es Este-Oeste, Oeste-Este, su plantación en la zona Norte, podrá disminuir sus necesidades hídricas necesarias en una primera etapa de su desarrollo, siendo después de este imprescindible la luz solar.

Además, de acuerdo con las consideraciones que se han venido presentando a lo largo de la presente Tesis Doctoral, la especie elegida ha de ser compatible con la integración del paisaje.

Sin embargo, más allá de todos los elementos de tipo hídrico y paisajístico, una de las principales razones para la vegetación del portal de los túneles y pilar básico de esta memoria consiste en el ahorro energético aportado por dicha vegetación en términos de la iluminación eléctrica.

En este sentido, las investigaciones llevadas a cabo han tenido por objeto la comparación de algunas de las especies descritas desde el punto de vista de la luminancia aportada al cono  $L_{20}$  de los túneles (Peña-García y otros, 2015).

Para ello, se situaron las especies candidatas en una ubicación en la que recibían idéntica iluminación solar de izquierda a derecha: la madreselva (*Lonicera caprifolium*), la uña de gato (*Macfadyenaunguis-cati*), jazmín (*Jasminum nudiflora*) y la hiedra común (*Hedera helix*) en una pared situada al aire libre en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada (sur de España) como se muestra en la (Fig. 38).

La plantación se realizó desde la parte superior de la pared, mediante un alambre guía, para evitar reflexiones, ya que el objetivo de esta siembra conjunta sería medir la luminancia en las mismas circunstancias para todas, lo que permite una comparación más objetiva.

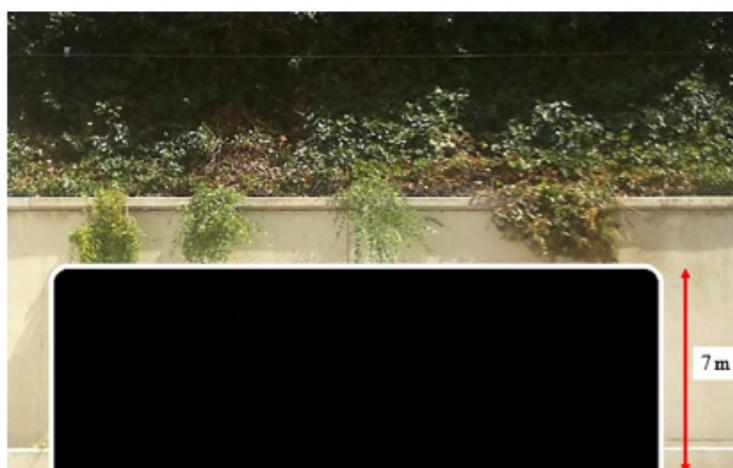


**Figura 38. Conjunto de especies plantadas para determinar su contribución a la  $L_{20}$ .**  
**Fuente: Peña-García, López y Grindlay (2015)**

Con el fin de determinar la planta que más se ajusta a nuestras necesidades, será necesario evaluar su capacidad para reflejar la luz solar. Por tanto, aquella en la que se mida una luminancia más baja (en este caso, el flujo luminoso reflejado por unidad de superficie y ángulo sólido en la línea visual del conductor que se aproxima a un túnel) en las condiciones más críticas para la adaptación visual, será la más idónea, siempre que sus características lo hagan posible, para su plantación en el portal de entrada del túnel. Esto significa que las plantas elegidas no sólo acondicionarán de un color más oscuro la entrada, sino que deben de estar bien adaptadas a la región donde se encuentra el túnel.

Por tanto el criterio para la evaluación específica de estas cuatro especies (madreselva, uña de gato, jazmín y hiedra común) incluirá una correcta integración paisajística, adaptación a las condiciones geográficas, climáticas e hidrológicas locales (López, y otros 2015).

La configuración elegida para las plantaciones (Fig. 39), permite simular fácilmente un portal de entrada al túnel, de manera que la luminancia en los alrededores se pueda evaluar de la misma manera que en un túnel real.



**Figura 39. Siembra paralela de las cuatro especies elegidas. Simulación del portal de entrada al túnel.**  
Fuente: Peña-García, López y Grindlay (2015)

Las luminancias se han medido con un luminancímetro Hagner S3 debidamente calibrado. Dado que la luminancia es una magnitud direccional, la dirección de medición debe controlarse cuidadosamente cuando se mide. Por esta razón, el luminancímetro incorpora una mira telescópica para apuntar hacia el objeto cuya luminosidad se debe medir. Una vez que el objeto está centrado, el observador ve un punto negro, que cubre el campo cuya luminancia se va a medir.

Es necesario remarcar que el luminancímetro permite la medición de pequeños campos angulares. De hecho, el campo de medición es notablemente más pequeño que la planta, lo cual permite llevar a cabo las mediciones sin esperar a que las plantas crezcan tanto como lo harían en el túnel definitivo.

Los resultados obtenidos, una vez realizadas las mediciones, se presentan y analizan en el siguiente apartado.

La luminancia de cada planta trepadora se ha medido en días de sol (ya que es la condición más desfavorable para el consumo de energía en los túneles de autovía)

entre el 1 de junio y 31 de julio de 2014. El periodo elegido para la campaña de medición es el que tiene la más alta insolación, porque cuanto más alta es la luz ambiental, más altas son las necesidades de iluminación para la adaptación visual cuando el usuario entra en el túnel y, por tanto, mayor consumo de energía.

Además, las luminancias se han medido en los tiempos más desfavorables del día. Se han realizado dos mediciones todos los días, una a las 12:00 y otra a las 14:00. Los promedios correspondientes para cada hora del día se presentan en columnas separadas para cada planta trepadora en la Tabla 23.

Trepadoras	L (cd/m <sup>2</sup> )		Disminución de la Luminancia respecto a la CIE 88:2004 (%)
	12:00	14:00	
Madreselva	832	1652	17,4
Uña de gato	1623	1867	6,7
Jazmín	1977	2996	- 49,8
Hiedra común	417	1038	47,6

**Tabla 23. Promedio y disminución de las luminancias para las especies elegidas.**  
**Fuente: Peña-García, López y Grindlay (2015)**

Con respecto a los niveles de iluminación en la zona de medida anteriormente mencionados, se ha medido la iluminancia media (flujo luminoso recibido por unidad de superficie, y expresada en lux) sobre el suelo a la hora más crítica (14:00), arrojando un valor  $E = 106.000$  lux, cifra bastante común en el sur de España y puede ser incluso mayor que en otros países más cercanos al Ecuador. Esta hora es la más crítica, ya que corresponde a la posición más alta del sol, en el lugar donde se han plantado las especies trepadoras ( $37.18^\circ$  N,  $3.61^\circ$  W). Por esta razón, los ahorros de energía se referencian a esta hora.

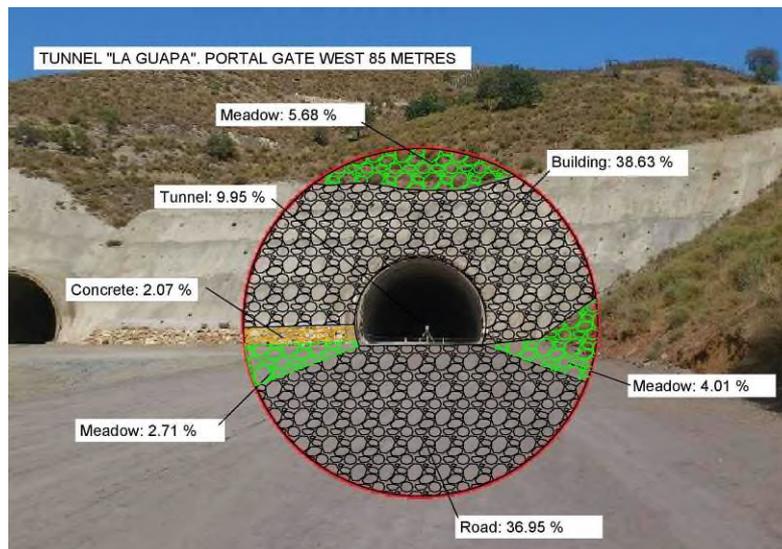
Un primer análisis de la Tabla 23 muestra que la hiedra común (*Hedera helix*) es la planta trepadora más idónea para reducir la contribución energética y, por lo tanto, con mejores requisitos lumínicos en términos de consumos energéticos. No obstante, analizaremos las consecuencias de una completa vegetación en el portal de entrada al túnel, en el siguiente apartado.

### 5.2.2. Efecto de la revegetación sobre el consumo energético en túneles

A partir de los datos anteriores, y teniendo en cuenta que los túneles objeto de la presente Tesis Doctoral se encuentran en una zona de clima Mediterráneo, se calculará el efecto de la revegetación completa del portal de un túnel concreto con hiedra común que, como se ha demostrado en el apartado anterior, es la especie que exhibe una menor contribución a la  $L_{20}$  en este tipo de ambientes.

Es necesario remarcar que este resultado va más allá de la mera consideración de la vegetación según el documento CIE 88:2004 (2004) ya que, además de estimar el ahorro en la situación presentada en este documento (luminancia de 2000 cd/m<sup>2</sup> independientemente de la especie seleccionada), se demuestra que la elección de la hiedra rebaja las necesidades lumínicas de la CIE, lo cual pone de manifiesto que se puede conseguir un mayor ahorro energético que el propugnado por la normativa de referencia.

Consideremos un túnel de autovía como el de la Fig.40, (túnel "La Guapa", actualmente en servicio en el término municipal de Polopos, costa de Granada), donde el contorno del túnel ocupa el 53,1% de la superficie correspondiente al cono de 20°.



**Figura 40 Túnel viario paralelo a la costa mediterránea en el sureste de España.  
Fuente: Elaboración propia (2014).**

Las necesidades de iluminación en la zona umbral se calculan para tres situaciones diferentes: un entorno sin modificación con respecto al proyecto del túnel de autovía, un entorno totalmente plantado con vegetación (considerando las recomendaciones de la Tabla 24) y, finalmente, los alrededores sembrados de hiedra común, motivo del presente trabajo.

Driving direction (North Hem.)	$L_c$ (kcd/m <sup>2</sup> )	$L_r$ (kcd/m <sup>2</sup> )	$L_e$ (kcd/m <sup>2</sup> )			
			Concretes	Buildings	Snow	Meadow
N	8	8	3	8	15	2
E-W	12	4	2	6	10 (V) 15 (H)	2
S	16	5	1	4	5 (V) 15 (H)	2

**Tabla 24. Contribución de la  $L_{20}$  para distintos escenarios y ángulo cónico 20°.**  
Fuente: CIE Publ., (1988).

Los valores de luminancia se pueden convertir en valores de flujo luminoso (cantidad de energía luminosa obtenido por el consumo eléctrico) por medio de la Ecuación 9, (Parise y otros, 2007).

$$E = \frac{L\pi}{\rho B\mu}$$

**Ecuación 9. Flujo luminoso**

donde E es la iluminancia, L la luminancia,  $\rho$  la reflectancia de la superficie de la carretera, B el factor de utilización y  $\mu$  el factor de mantenimiento. En el túnel considerado (Fig 40), los valores de  $\rho = 0.25$ ,  $B = \mu = 0,8$ , para adoptar un enfoque realista.

A partir de la (Ecuación 9), dado que la iluminancia se define como el flujo luminoso ( $\phi$ ) recibido por unidad de superficie, en un túnel de autovía con anchura y longitud, correspondiente a la primera mitad de la zona umbral, y cuya ecuación corresponde a la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{L\pi l w}{\rho B\mu}$$

**Ecuación 10. Flujo luminoso en la primera mitad de la zona umbral**

	$L_{20}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$L_{th}$ (cd/m <sup>2</sup> )	(flujo luminoso) $\phi$	(Ahorros) (%)
Proyecto actual	4180	251	2.462.938	-----

Vegetación según (CIE 88:2004)	2540	152	1.491.500	39,4
Propuesta Hiedra Común	2030	122	1.197.125	51,4

**Tabla 25. Comparación de los parámetros de iluminación y ahorro para tres situaciones diferentes.**

**Fuente: Peña-García, López y Grindlay (2015).**

Los resultados obtenidos, tras aplicar la Ecuación 10, para nuestro túnel (Fig. 40), que tiene una velocidad máxima de 80 kmh, longitud = 50 m y anchura = 10 m para la primera parte de la zona umbral, son los que se muestran en la Tabla 25.

Entre las diversas ventajas de cubrir con plantas trepadoras de baja luminancia el portal de entrada de un túnel, nos encontramos con la posibilidad de hacer una buena aproximación al número de luminarias necesarias, en la primera parte de la zona umbral del túnel. Una lámpara de sodio de alta presión típico para la iluminación de un túnel puede tener un flujo luminoso de 40.000 lm. Por lo tanto, podemos calcular el número de luminarias necesarias, dividiendo la cuarta columna de la Tabla 25 por 40.000 como se muestra en la Tabla 26.

	<b>Número de luminarias (primera parte de la zona umbra)</b>
Proyecto actual	62
Vegetación según (CIE 88:2004)	38
Propuesta Hiedra Común	30

**Tabla 26. Número de luminarias necesarias para la primera mitad de la zona umbral de un túnel de autovía, para tres situaciones diferentes.**

**Fuente: Peña-García, López y Grindlay (2015).**

Los resultados de las Tablas 25 y 26 muestran el interés y los ahorros notables que se consiguen con la cobertura vegetal de este tipo de plantas trepadoras en los portales de túneles de autovía. Estos ahorros no sólo afectan el consumo de energía, sino también al número de luminarias necesarias, con las correspondientes ventajas económicas y ambientales.

Dado que el entorno denominado como prado o vegetación considera una contribución de  $2 \text{ kcd} / \text{m}^2$ , cualquiera que sea la orientación del túnel (véase la Tabla

22), los resultados obtenidos hacen disminuir, considerablemente, los valores de esta tabla, es decir, mejoran las previsiones del Documento de referencia a nivel mundial (CIE 88:2004, 2004) para ciertas plantas, siempre y cuando sus necesidades (hidrológicas, climáticas y de integración paisajística) lo permitan. En nuestro caso, túnel de la Guapa, la revegetación del portal de entrada con esta especie (Hiedra Común) es factible debido a las características de la boca del túnel, así como de las condiciones climáticas e hidrológicas de la zona.

## **6. CONCLUSIONES.**

A lo largo de la introducción se ha mostrado cómo, en el conjunto de las infraestructuras viarias, los túneles son un elemento clave de la ingeniería civil, especialmente en las actuales vías de alta capacidad. La continua necesidad de superar las barreras naturales ha impulsado progresivamente su desarrollo, que ha sido paralelo al de las técnicas y procesos constructivos, ganando en longitud y profundidad.

Uno de los aspectos más sensibles de estas infraestructuras es el de la seguridad, y dentro de ella la iluminación, que se encuentra perfectamente regulada y normalizada. Sin embargo, tras la experiencia acumulada desde la implantación de la normativa vigente en materia de seguridad en túneles, se ha mostrado que es una norma de máximos respecto a las necesidades reales de los túneles. Particularmente, del análisis crítico realizado se advierte la necesidad de diferenciar la longitud de los túneles en cuanto a sus requerimientos de seguridad (para longitudes superiores a 500 m, o entre 200 y 500), así como la consideración de tramos con riesgo de congestión, la no exigencia de pavimento de hormigón en túneles de longitud superior a 1000 m, las necesidades de ventilación artificial, o la eliminación del concepto de grupo de túneles, entre otros.

Dentro de las consideraciones perceptivas, los elevados requerimientos lumínicos y los altos consumos energéticos a ellos asociados son, junto a la integración paisajística de sus embocaduras, las principales problemáticas asociadas a los túneles en autovías de última generación. Como se demuestra, la configuración del portal de los túneles está relacionada con los requerimientos lumínicos a lo largo del mismo y, por tanto, con el consumo energético de sus instalaciones de alumbrado.

En el amplio marco de la integración ambiental de las infraestructuras viarias, donde los aspectos visuales son cada vez más valorados, la integración paisajística de los portales de túneles es uno de los aspectos más relevantes de estas infraestructuras y uno de los más complejos de resolver, por la gran cantidad de factores involucrados y,

particularmente, por los problemas geotécnicos que presentan los emboquilles y las dificultades de revegetación que estos comportan.

La caracterización y valoración de los emboquilles de los túneles desde los aspectos más relevantes considerados, como son el paisajístico, el energético y el económico, se puede realizar mediante indicadores sencillos, que permiten también un análisis comparativo entre los mismos, como son el grado de cobertura vegetal de la superficie delimitada por la base del cono que determina los requerimientos lumínicos del túnel (parámetro  $L_{20}$ ), el consumo energético y el coste de construcción de los portales.

Del estudio realizado en el conjunto de los túneles de la autovía A-7, a pesar de que por la disponibilidad de datos la muestra final se ha reducido, como se puede verificar en algunos casos, lo ideal es disponer de un alto valor paisajístico con una alta valoración económica del emboquille, es decir con un reducido coste de éste, dado que, como se ha mostrado, el valor de las plantaciones es apenas el 5% de la obra civil. Esto es así en los casos de los túneles del Acebuchal y el Madroño.

Se ha podido comprobar que en los casos estudiados, pequeñas actuaciones en las zonas del emboquille, es decir con menor coste económico, coinciden con túneles de menor longitud, que naturalmente requieren de menores necesidades lumínicas. Así, túneles como el de Gualchos, Acebuchal y Madroño en Granada, han requerido costes de entrada bajos y sus consumos anuales son también bajos. Por el contrario, puede darse el caso de costes de ejecución en el portal de entrada altos vinculados con altos consumos energéticos, como en el caso del túnel de la Guapa. Esto es debido a que ejecuciones de estabilización o problemas geológicos-geotécnicos requieren de grandes inversiones en los portales de entrada, cuya configuración artificializada requiere importantes consumos lumínicos en la zona umbral, lo que dispara los consumos energéticos. Por otro lado, podemos observar como el túnel de Ramoncillos, con una valoración económica de emboquille buena, carece de un buen valor energético, lo que puede ser solucionado con actuaciones exteriores, plantaciones o pérgolas, y con estudios más detallados de las potencias requeridas.

En otros casos se ha podido advertir que integraciones paisajísticas altamente valoradas, como son las correspondientes a los túneles del Madroño o el Acebuchal, requieren costes económicos bajos de los emboquilles, por lo que es posible encontrar soluciones integradoras que impliquen reducidos costes de emboquille y consumos energéticos menores. Así, atendiendo a los estudios realizados se infiere que es posible mejorar los portales reduciendo a la vez sus consumos energéticos.

En este sentido, el vector propuesto aúna las variables principales estudiadas, pudiendo predecir las características óptimas de los portales de entrada a los túneles

de autovías de alta capacidad y conseguir la disminución de sus consumos energéticos, por lo que podría ser incorporado a futuras normativas sobre construcción de túneles.

Si las estabilizaciones realizadas en las entradas de los túneles, por problemas geológico-geotécnicos, pudieran ser tratadas de forma integradora (plantaciones, pérgolas), las necesidades lumínicas en la zona umbral disminuirían de manera notable, ejemplos como el túnel del Acebuchal demuestran que es posible.

Al considerar la integración paisajística de los túneles viarios, uno de los componentes más relevantes es el de la elección de la vegetación para cubrir estas zonas adyacentes. Ésta tradicionalmente se ha implementado con objetivos relacionados con la estética o la sujeción del terreno, entre otros, pero no se ha considerado su relación con los requerimientos lumínicos, y el consumo energético de las instalaciones de alumbrado del propio túnel.

Los niveles más altos de luminancia se requieren en la primera parte de los túneles de carretera, también llamada zona umbral. Este requisito surge del tiempo necesario para que el ojo humano se adapte de un entorno brillante a un entorno más oscuro. Así, la única manera de poder disminuir estos enormes consumos consistirían en el uso de la luz solar como complemento a la iluminación eléctrica o, como se ha mostrado en este estudio, la disminución del parámetro  $L_{20}$  en el portal de los túneles de carretera.

Una medida eficaz para disminuir el valor de la  $L_{20}$  consistiría en la sustitución de un entorno de hormigón o colores claros de la puerta del túnel por zonas boscosas o de colores más oscuras. La implementación de una vegetación que cubriese toda la superficie necesaria, es tarea compleja debido a la naturaleza de las especies más empleadas como, por ejemplo, el pino o el matorral en túneles situados en zonas de clima mediterráneo.

La vegetación mediante plantas trepadoras permite salvar estas dificultades cubriendo el 100% del terreno incluido en el cono  $L_{20}$ , que es el que tiene influencia sobre el consumo energético de las instalaciones de alumbrado de los túneles.

La plantación de dicha vegetación puede llevarse a cabo en terrazas o, tal y como se propone, al pie de la montaña empleando guías de alambre u otros materiales para subir hacia arriba. La plantación a pie de montaña permite ahorrar dinero y esfuerzos en las tareas de jardinería, especialmente intensas en las primeras semanas.

Dentro de las especies arbustivas consideradas más apropiadas para la revegetación en el sur y este de España, muy cerca del mar Mediterráneo, se advierte como la Hedera Helix es la de mejor aplicación, debido a su óptima adaptación al clima y condiciones hídricas de la zona.

La comprobación realizada, en términos luminancia reflejada por el sol, por cuatro plantas trepadoras en una situación que simula el portal de entrada de un túnel de autovía, se ha llevado a cabo con el fin de determinar qué especie es la más idónea para disminuir las necesidades del túnel en términos de energía eléctrica. Así pues, la hiedra común (*Hedera helix*) es también la que tiene la luminancia más baja, de las trepadoras estudiadas. La contribución a la luminancia de esta especie es el medio de la considerada por el documento CIE. Esto significa que la forestación de los contornos de túneles de autovías, con esta especie, siempre que esté permitido por las condiciones climáticas e hidrológicas de la zona, podrá reducir las necesidades lumínicas en la primera parte del túnel hasta en un 50%.

Las especies más idóneas en cada túnel, dependerán de la localización geográfica, las condiciones hidrológicas de la zona y/o la integración paisajística, entre otros factores. Por lo tanto, la elección de forestación no dependerá solamente de criterios lumínicos.

La selección de plantas trepadoras podrá permitir la forestación completa y densa, situaciones totalmente diferentes a las actuales, con las correspondientes disminuciones de la  $L_{20}$ .

La metodología seguida para determinar las mejores especies en el sur de España (clima mediterráneo) pueden repetirse fácilmente para otras áreas del mundo o incluso para otros microclimas, lo que contribuiría a un ahorro global en el consumo eléctrico de los túneles de autovía de alta capacidad.

Los resultados obtenidos podrían dar lugar a una nueva propuesta de las tablas de luminancia para los diferentes reglamentos o directrices de diseño (CIE). Dada la amplia gama de luminancias según la planta, hora, por lo que podría ser razonable distribuir el conjunto denominado "prado" en más elementos con diferentes contribuciones a la  $L_{20}$ .

Finalmente, la disminución del consumo de energía en los túneles de autovía con una densidad de forestación importante, no sólo ahorra energía: dado que la introducción de especies como la hiedra común para reducir las solicitudes, los niveles de iluminación en la zona de umbral son ahora más bajos. Por lo que podría ser una buena oportunidad para introducir la iluminación LED en esta zona del túnel donde la iluminación principal todavía se realiza con unas tecnologías de consumo que, además, no permite más de dos o tres niveles de intensidad.

## 7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La investigación futura se centrará en la determinación de los coeficientes de reflexión de todas estas especies y extender esta investigación a otros climas donde otras especies podrían mejor adaptarse.

Es necesario la investigación con otras especies y para distintos microclimas, que determinen las plantaciones más adecuadas para conseguir una máxima forestación de portales y, por tanto, considerar seriamente la contribución de la vegetación en el consumo energético para los túneles de autovía, permitiendo a su vez, una efectiva integración del túnel en su entorno.

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

- Adrian, W. «Investigations on the required luminance in tunnel entrances, Lighting Res. .» *Technol*, 1982: 14,151-159.
- Aguiló, M. *Legado y proyección de lo construido en España*. Madrid: ACS, 2012.. *The new high speed rail system Spain*. Madrid: ACS, 2010.
- Aguiló-Alonso, M. « Naturaleza, paisaje y lugar: estética de la obra y su entorno.» *Ingeniería y Territorio*, 2001: 54, 28-35.
- Ahn, C., H. Xie, S. H. Lee, S. Abourizk, y F. Pena-Mora. « Sustainability Analysis of Tunnel Construction Processes using Collaborative Tunneling Simulation. .» *In Proceedings of the Construction Research Congress*. 2010.
- Alonso, E. «Apuntes de la asignatura de túneles.» Barcelona: U.P.C., E.T.S.E.C.C.P., 2002.
- Bettini, y Arrigo. *El Milplantas. Guia de las Plantas de los Viveros de España "Mil Plantas"*. Maxi Editori, 2009.
- Blasco, R. D., J. M. Cornejo, y S. Ferri-Anglada. «La carga mental en los túneles. Consecuencias en la conducción y posibles soluciones.» *V Simposio de Túneles de Carreteras. Seguridad para los túneles del Siglo XXI*. Bilbao: Asociación Técnica de Carreteras, 2010. 673-694.

- Burgos- Núñez, A., y J.C. Olmo-García. «Los caminos entre Málaga y Motril. Evolución y patrimonio de las infraestructuras de transporte a lo largo de la costa.» *Congreso Virtual 27 y 28 de Mayo. En Ruta litoral destino N-340*. 2015. 20.
- Bybee, R.W. «Planet Earth in crisis: how should science educators respon?» *The American Biology Teacher*, 1991: 53(3), 146-153.
- Cerioti, M., y otros. «Is there light at the ends of the tunnel? Wireless sensor networks.» 2011.
- CIE Publ., Vienna. «Commission Internationale de l'Éclairage, CIE, 2004. Guide for the lighting of road tunnels and underpasses.» Vienna, 1988.
- CMMAD. *Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo*. Madrid: Alianza, 1988.
- Coronado Tordesillas, J.M. «El trazado de carreteras y el territorio.» En *Un siglo de caminos de España*. Madrid, 2007.
- Coronado Tordesillas, J.M. «Proyecto del territorio: Prescripciones territoriales a los proyectos de carreteras.» *Ingeniería y Territorio, Número: 60*, 2002: 92-101.
- Depei, Z. «Greening design of portal part of tunnel and case analysis.» *Science of Soil and Water Conservation, S1.*, 2006.
- Español, I. Echániz, D. Álvarez, D. Fernández, C. González del Piñal, A. Ramírez, y D. De Santos. «Capítulo 5: Diseño paisajístico de la carretera.» *La carretera en el paisaje: Criterios para su planificación, trazado y proyecto*, 290-296. Sevilla: Junta de Andalucía: Consejería de Obras públicas y Transportes, 2008.
- Estany, A., y Serra. «La frontera del túnel.» *V Simposio de Túneles de carretera: Seguridad para los túneles del siglo XXI*. Bilbao, del 24 al 26 de febrero: Asociación Técnica de la carretera, 2010. 778-782.
- Fei, Ye, He Chuan., W. Shi-min, y Z. Jin-long. «Landscape design of mountain highway tunnel portals in China.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012: 52-68.
- García-Fernández, J. *Alumbrado de túneles*. s.f. <http://recursos.citcea.upc.edu/llum/external/tunel.html> (último acceso: 25 de 02 de 2015).
- García-Garay, A. «Bóvedas de transición lumínica. Un proyecto de investigación.» *Simposio de túneles de carretera – Explotación sostenible de túneles*. Zaragoza (España), 2015.
-

- García-Garay, A., A. Guirao-Piñera, J. Piñera-Lucas, y O. Gutiérrez-Bolívar. «Bóvedas de transición lumínica en túneles de carretera para el aprovechamiento de la luz solar.» *Rutas: Revista de la Asociación Técnica de Carreteras*, 2012: 151, 30-38.
- Gil-Martín, L.M., A. Gómez-Guzmán, y A. Peña-García. «Use of diffusers materials to improve the homogeneity of sunlight under pergolas installed in road tunnels portals for energy savings.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015: 48, 123-128.
- Gil-Martín, L.M., A. Peña-García, R. Escribano, y A. Espín-Estrella. «A computational method to optimize energy savings of tension structures set in road tunnels.» *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11)*, 2011.
- Gil-Martín, L.M., Peña-García, A., Hernández-Montes, E., Espín-Estrella, A. «Tension structures: A way towards sustainable lighting in road tunnels.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011: 26,223-227.
- Gil-Martín, L.M., Peña-García, A., Jiménez, A., Hernández-Montes, E. «“Study of Light-pipes for the use of sunlight in road tunnels: from a scale model to real tunnels”.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014: 41, 82-87.
- Grindlay, A., y Otros. *El valor de las carreteras provinciales : estudio económico sobre el dominio público viario de la Diputación de Granada*. Diputación Provincial de Granada, 2014.
- Herce-Vallejo, M. *El negocio del territorio evolución y perspectivas de la ciudad moderna*. Madrid: Alianza Editorial, S.A., 2013.
- Juncá, J.A. «El túnel I. Historia y Mito.» *Colección Ciencias y Humanidades e Ingeniería nº34* (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos), 1991.
- «Junta de Andalucía.» *Modelos de restauración forestal*. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente, 2004.
- Lingli, J., y Z. Dongping. «A study on the trend of development and present state of tunnel entrance landscaping.» *China Civil Engineering Journal*, 2008: 01,15.
- Llopis, G. *Propuesta de Modificación del RD 635/2006*. Madrid: Jefe de Servicio de Túneles en Dirección General de Carreteras. Ministerio de Fomento, 2012.
- López, J., y C. *Manual de estabilización y revegetación de taludes*. U.D.Proyectos. Madrid: E.T.S.I. Minas-U.P.M, 1999.

- López, J.C, A. Grindlay, M. Carpio, y A. Peña-García. «Strategies for the optimization of binomial energy saving landscape integration in road tunnels.» *Energy Production and Management in the 21st Century*. Ekaterinburg, Russia: Wit Press Southampton, Boston, 2015. 511-520.
- López-Guarga, R. «V Simposio de Túneles de Carretera.» *El comité de túneles y la evolución técnica de la concepción del túnel*. Bilbao: Asociación Técnica de Carreteras, 2010. 13-46.
- Macedo, B. *El concepto de sostenibilidad*. Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe UNESCO Santiago, 2005.
- Mashimo, H. «State of the road tunnel safety technology in Japan.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2002: 17, 145–152.
- «Ministerio de Fomento.» *Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte 2005-2020 (PEIT)*. Madrid. 2005.
- «Ministerio de Fomento.» *Orden FOM. 3317/2010. Instrucción sobre las medidas específicas para la mejora de la eficiencia en la ejecución de las obras públicas de infraestructuras ferroviarias, carreteras y aeropuertos*. Madrid, 2010.
- «Ministerio de Fomento.» *Recomendaciones para la iluminación de túneles*. 1999.
- «Ministerio de Fomento.» *Orden circular 36/2015. Sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles*. Madrid, 2015.
- «Ministerio de Fomento. .» *Base de datos de Inventario, incidencias e inspecciones en túneles de la R.C.E*. Madrid, 2015.
- «Ministerio de Fomento.» *Cuadro de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Nota de Servicio 4/2012*. Madrid, Diciembre de 2012.
- Onaygil, S., Ö. Güler, y E. Erkin. «Determination of the effects of structural properties on tunnel lighting with examples from Turkey.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003: 18, 85–91.
- Pachamanov, A., y D. Pachamanova. «Optimization of the light distribution of luminaries for tunnel and street lighting.» *Engineering Optimization*, 2008: 40, 47-65.
- Parise, G., L. Martirano, y S. Pierdomenico. «An adaptive criterion to design the lighting system in the road tunnels.» *42nd IEEE-IAS Annual Meeting*, 2007: 1244-1248.
-

- Peila, D., y S. Pelizza. « Criteria for technical and environmental design of tunnel portals.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2002: 17,335-340.
- Peña-García, A., Gil-Martín, L.M. «“Study of pergolas for energy savings in road tunnels. Comparison with tension structures”.» *Tunnelling and Underground Space Technology*., 2013.: 35,172-177.
- Peña-García, A., J.C. López, y A.L. Grindlay. «Decrease of energy demands of lighting installations in road tunnels based in the forestation of portal surroundings with climbing plants.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015: 46, 111-115.
- Peña-García, A., L.M. Gil-Martín, A. Espín-Estrella, y F. Aznar Dols. «Energy saving in road tunnels by means of transparent tension structures.» *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ'10)*. 2010.
- Peña-García, A., L.M. Gil-Martín, R. Escribano, y A. Espín-Estrella. «A Scale Model of Tension Structures in Road Tunnels to Optimize the Use of Solar Light for Energy Saving.» *International Journal of Photoenergy*, 2011: vol. 2011, 9 pages.
- Peña-García, A., O. Rabaza, y L.M. Gil-Martín. «Application of Translucent Concrete for Lighting Purposes in Civil Infrastructures and its optical characterization.» *Key Engineering Materials*, 2015: 663, 148-156.
- Peña-García, A., R. Escribano, L.M. Gil-Martín, y A. Espín-Estrella. «Computational optimization of semi-transparent tension structures for the use of solar light in road tunnels.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012: 32, 127-131.
- Puertas, J.Herranz. *Estimación de coste y plazo en proyectos de túneles ejecutados mediante excavación convencional y voladura*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2010.
- «Real Decreto 635/2006, Ministerio de Fomento.» *Requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado*. BOE nº 126, pg 19970 a la 19985, 26 de Mayo de 2006.
- Ruiz de la Torre, J., y L. Ceballos. *Arboles y arbustos de la España peninsular*. Madrid: Instituto Forestal de Investigaciones, 1971.
- Schreuder, D.A. «Tunnel entrance lighting: a comparison of recommended practice.» *Lighting Research Technology*, 1971: 3, 274–278.

- Schreuder, D.A. «Tunnel entrance lighting: a comparison of recommended practice.» *Lighting Research Technology* 3, 274–278., 1971: 274–278.
- Serrano Bernardo, F., y otros. «Análisis de los procesos de restauración paisajística e integración ambiental de infraestructuras viarias en Andalucía (sur de España).» *XIX Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos*. Granada: AEIPRO, 2015. 87-97.
- Serrano, J.M. «La obra subterránea en el umbral del siglo XXI.» *O.P.*, 1998: 4-7.
- Tormo-Blanes, J., Bochet, E. Soler-Espiauba, y P. García-Fayos. «Restauración y revegetación de taludes de carreteras en ambientes mediterráneos semiáridos: procesos edáficos determinantes para el éxito.» *Ecosistemas. Revista científica de Ecología y Medio Ambiente*, 2009: 12.
- Urrecho-Corrales, J. *Orden circular 36/2015*. Ministerio de Fomento, 2015.
- VVAA. «II Simposio de Túneles: explotación, seguridad, conservación y reparación.» *II Simposio (Jaca, 6 y 8 de mayo 1998)*. Jaca: Asociación Técnica de Carreteras, 1998.
- VVAA. «III Simposio de Túneles: Las nuevas tecnologías, Métodos y Soluciones aplicadas a la Explotación de túneles.» Pamplona, 5,6 y 7 de febrero 2003: Asociación Técnica de Carreteras, 2003.
- VVAA. «IV Simposio de Túneles: ¿ Por qué son seguros los túneles?» Andorra, del 26 al 28 de octubre 2005: Asociación Técnica de Carreteras, 2005.
- VVAA. «Primer Simposio de túneles, Jornadas de Gijón.» *Jornadas de Gijón*. Gijón: Asociación Técnica de carreteras, 1994.
- VVAA. «V Simposio de Túneles de carreteras: Seguridad en los Túneles del siglo XXI.» *V Simposio de Túneles de carreteras: Seguridad en los Túneles del siglo XXI*. Bilbao, del 24 al 26 de febrero de 2010: Asociación Técnica de Carreteras, 2010. 1122.
- Wencheng, C., H. Zheng, G., Yandan L. Liping, y Dahua C. «Performance of induction lamps and HPS lamps in road tunnel lighting.» *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008: 23, 139-144.
- Yang, C., y Z. Wang. «Simulation experiments on counter beam lighting in highway tunnel. .» *J Chongqing Univ: Eng Ed*, 9, 2010: Eng Ed, 9,: 139-145.

**Páginas web:**

*Diccionario de la Real Academia Española.* 2012.  
<http://lema.rae.es/drae/?val=sostenibilidad>.

Google. *Google Earth.* 2015. <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>.

*Monrovia.* s.f. [http://www.monrovia.com/plant-catalog/plants/2457/yellow-trumpet-vine/Macfadyena\\_unguis-cati](http://www.monrovia.com/plant-catalog/plants/2457/yellow-trumpet-vine/Macfadyena_unguis-cati) (último acceso: 2014).

Plešová, T. 27 de Septiembre de 2011. <http://www.zahrada-sk.com/a/sk/7099-hedera-helix-brectan-popinavy/>.

Y., Roskov, y otros. *Species 2000 & ITIS Catalogue of Life, 2014 Annual Checklist. Digital resource. Species 2000: Naturalis, Leiden, the Netherlands.* 2014.  
[www.catalogueoflife.org/annual-checklist/2014](http://www.catalogueoflife.org/annual-checklist/2014).

Winterjasmin. *Baumschule Horstmann.* s.f. <http://www.baumschule-horstmann.de/shop/exec/product/1421/150/Winterjasmin.html> (último acceso: 2014).

## **APÉNDICES**

APÉNDICE 1: DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS TÚNELES ELEGIDOS.

APÉNDICE 2: VARIABLES UTILIZADAS EN LA CARACTERIZACIÓN  
SOSTENIBILIDAD-INTEGRACIÓN.

APÉNDICE 3: RADIOMETRÍA, FOTOMETRÍA Y COLORIMETRÍA

APÉNDICE 4: FICHAS TÉCNICAS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA:  
**FOTÓMETRO S3**

APÉNDICE 5: PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN (1)

**Energy Production and Management in the 21st Century, Vol. 1**  
**511:** Strategies for the optimization of binomial energy saving landscape integration in road tunnels.

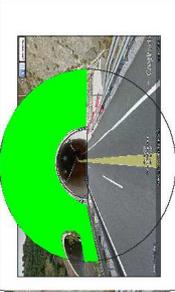
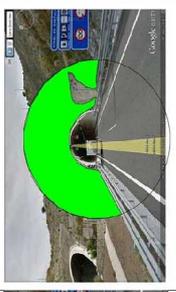
APÉNDICE 6: PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN (2)

**Tunnelling and Underground Space Technology:** Decrease of energy demands of lighting installations in road tunnels based in the forestation of portal surroundings with climbing plants.

**APÉNDICE 1: DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS TÚNELES  
ELEGIDOS.**



NÚMERO	PROVINCIA	OPERACIÓN	NOMBRE DEL TUNEL	LONGITUD (m)	Nº ARTIFICIALIDAD	Nº REINTEGRACIÓN PARABOLICA	VALUACIÓN PARABOLICA	VALUACIÓN INHIBICION	VALUACIÓN GLOBAL
2.1	ALMERIA	LAO BARCELONA		998,00	1,00 1,00	9 292,535 8 285,537 3 292,898 9 282,282	0	-	-
2.2	ALMERIA	LAO CADIZ		524,00	1,00 1,00	13 293 960,977 12 293 960,977 317 294 961,952	1	-	-

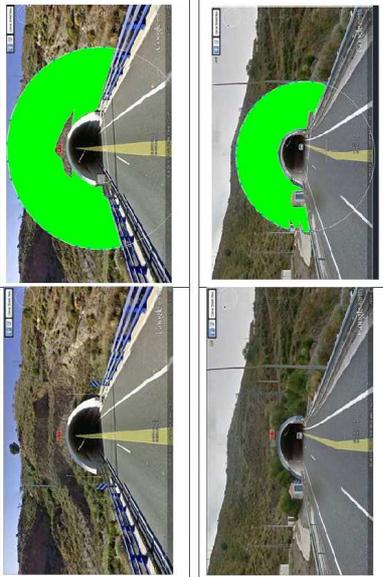
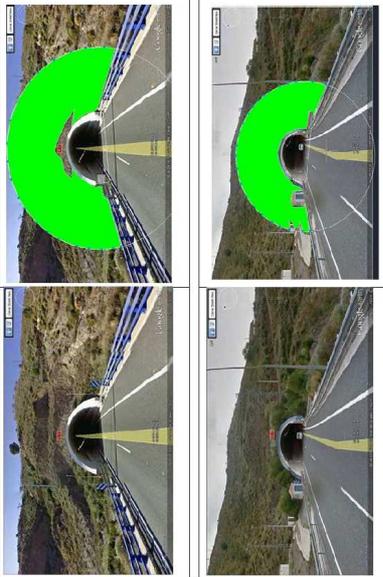
NÚMERO	PROVINCIA	ORIENTACIÓN	NOMBRE DEL TIPO	NOMBRE DEL TUBO	LONGITUD (m)	N. APTICIONADO	N. REPARTICIONADO	VALIDACION PARABOLICA	VALIDACION ENERGETICA	VALIDACION MECANICA	VALIDACION GLOBAL
3.1	ALMERIA	LABO BARCELONA	CANTALOBOS		2.170,00	6 CAN 6 RBT	5.724.021 15.577.086 26.299 72.046 31.716.935	-	-	-	-
											
3.2	ALMERIA	LABO CADIZ	CANTALOBOS		2.170,00	37 CAN 37 RBT	53.792.792.692 150.122.122.122 80.322.322.322	-	-	-	-
											

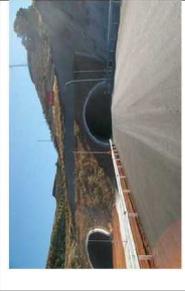
NÚMERO	PROVINCIA	ENTORNADO	NOMBRE DEL TUNEL	NOMBRE DEL TUNEL	LONGITUD (m)	Nº ARTIFICIALIDAD	Nº REINTEGRACIÓN	VALORACIÓN PASADIZA	VALORACIÓN ENERGÉTICA	VALORACIÓN AMBIENTAL	VALORACIÓN GLOBAL
4.1	GRANADA	LABO BARCELONA			2.092,00	73,43%	26,57%	2	-	-	-
4.2	GRANADA	LABO CADIZ			2.082,00	75,00%	25,00%	2	-	-	-
<p>ARCO INTERIOR: 5.665.983,19€                  ANILLO INTERIOR: 82.394.272,49€                  AREA TOTAL: 71.837.310,70                  AREA REINTEGRACION: 62.887.617,617                  AREA ARTIFICIAL: -</p> <p>ARCO INTERIOR: -                  CIRCULO EXTERIOR: -                  AREA TOTAL: -                  AREA REINTEGRACION: -                  AREA ARTIFICIAL: -</p>											

NÚMERO	PROVINCIA	ORIENTACIÓN	NOMBRE DEL TUBO	NOMBRE DEL TUBO	LONGITUD (m)	N. ARTIFICIALIDAD	N. REPARTICIÓN	VALIDACIÓN PARABÓLICA	VALIDACIÓN ENERGÉTICA	VALIDACIÓN PARABÓLICA	VALIDACIÓN GLOBAL
5.1	GRANADA	LABO BARCELONA			1.363,00	80,49%	19,51%	1	2	-	-
5.2	GRANADA	LABO CADIZ			1.398,00	61,38%	38,62%	3	2	-	-

NÚMERO	PROVINCIA	ORIENTACIÓN	NOMBRE CILINDRO	NOMBRE DEL TUNEL	LONGITUD (m)	Nº ARTIFICIALIDAD	Nº REINTEGRACIÓN	VALUACIÓN PARALELA	VALUACIÓN EN SERIE	VALUACIÓN GLOBAL		
6.1	GRANADA	LADO CLAYZ		RAMONCILLLOS		664,00	52,44%	47,56%	4	0	2	1.344.431 5.294.889 6.639.320 34.189.475
												ÁRDO INTERIORE: CIELO EXTERIORE ÁREA TOTAL ÁREA REINTEGRADA ÁREA ARTIFICIAL:
6.2	GRANADA	LADO BACELONA		RAMONCILLLOS		634,00	57,55%	42,45%	4	0	3	5.747.123,97 234.444.263,74 57.927.855,77
												ÁRDO INTERIORE: CIELO EXTERIORE ÁREA TOTAL ÁREA REINTEGRADA ÁREA ARTIFICIAL:

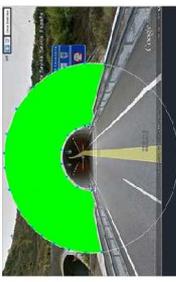
NÚMERO	PROVINCIA	ORDENACIÓN	NOMBRE DEL TUBO	NOMBRE DEL TUBO	LONGITUD (m)	Nº ARTIFICIADO	Nº RECONSTRUCCIÓN	VALUACIÓN PARALELA	VALUACIÓN IMPROBETA	VALUACIÓN GLOBAL
7.1	GRANADA	LAO0 BARCELONA			580,00	72,05%	27,95%	2	-	-
7.2	GRANADA	LAO0 CADIZ			610,00	72,05%	27,95%	2	-	-

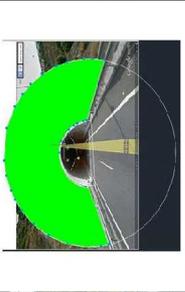
NÚMERO	PROVINCIA	UBICACIÓN	NOMBRE CANTÓN	NOMBRE DEL TUNEL	LONGITUD (m)	Nº ARTIFICIALIDAD	Nº REINTEGRACIÓN	VALUACIÓN PARALELA	VALUACIÓN PERPENDICULAR	VALUACIÓN GLOBAL
8.1	GRANADA	LAO BARCELONA	ACERBUICAL		551,00	1,000 1,000	15.121.204 54.632.278 2.250 56 41.351.215	4	4	4
8.2	GRANADA	LAO CADIZ			543,00		733.333.333,32 1.000.000 8.187.733.333,338	4	4	4
								4.306.377.866,651 9.421.351.813,371		
								733.333.333,32 5.371.837.133,337 6.881.335.832,665		
								2.304.051.874,76 2.304.051.874,767		

NÚMERO	PROVINCIA	ORDENACIÓN	NOMBRE DEL TUBO	NOMBRE DEL TUBO	LA PROFUNDIDAD (m)	Nº ARTIFICIADO	Nº RECONSTRUCCIÓN	VALUACIÓN PARABÓLICA	VALUACIÓN IMPERMEABLE	VALUACIÓN GLOBAL
9.1	GRANADA	LAO BARCELONA			540,00	69,50%	30,50%	3	-	-
9.2	GRANADA	LAO CADIZ			550,00	69,50%	30,50%	3	-	1





NÚMERO	PROVINCIA	ORIENTACIÓN	NOMBRE CULTEIRO	NOMBRE DEL TUNO	LONGITUD (m)	Nº ANTICAMPAÑAS	Nº REINTELAJACIONES	VALUACIÓN PARALELA	VALUACIÓN PERPENDICULAR	VALUACIÓN GLOBAL
12.1	GRANADA	LAZO BARCELONA	CALA CECETE			1,741 1,689	15.087.515 55.292.234 36.208.899 68.987.247			
				390,00						
12.2	GRANADA	LAZO CADIZ	CALA CECETE			1,741 1,689	15.087.515 55.292.234 36.208.899 68.987.247			
				370,00						

NÚMERO	PROVINCIA	ORDENACIÓN	NOMBRE DEL TUBO	NOMBRE DEL TUBO	LA PROFUNDIDAD (m)	Nº ARTIFICIADO	Nº PRIMORDIARIO	VALUACIÓN PARABÓLICA	VALUACIÓN IMPERMEABLE	VALUACIÓN GLOBAL
13.1	GRANADA	LAO0 BARCELONA	GATO			1,541 1,538	21.952.042 67.859.332 3.789 144.463.777			
						250,00	49,11%	50,89%	5	
								ÁREA INTERIOR: 333.135.973,286 CIRCULO EXTERIOR: 31.407.381,212,617 ÁREA TOTAL: 5.963.763,208,009 ÁREA REVESTIDA: 5.941.314,332,278		
13.2	GRANADA	LAO0 CADIZ	GATO				3.045.577.286,528 36.545.556,251,531 33.888.038,979,295			
						260,00	49,59%	50,41%	5	
								ÁREA INTERIOR: 333.135.973,286 CIRCULO EXTERIOR: 31.407.381,212,617 ÁREA TOTAL: 5.963.763,208,009 ÁREA REVESTIDA: 5.941.314,332,278		

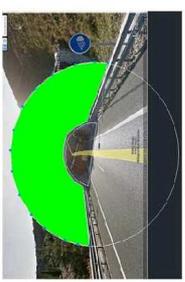


NÚMERO	PROVINCIA	ORIENTACIÓN	NOMBRE DEL TUBO	NOMBRE DEL TUBO	LONGITUD (m)	N. ARTIFICIADA	N. REPARTICIÓN	VALIDACIÓN PARABÓLICA	VALIDACIÓN ENERGÉTICA	VALIDACIÓN PARABÓLICA	VALIDACIÓN GLOBAL
15.1	MÁLAGA	LABO BARCELONA			1.148,00	6 CAN 6 PBR	25246 PZ 35133 ZSI 2839 5289 39879 PBR	30,45%	3	-	-
15.2	MÁLAGA	LABO CADIZ			1.152,00	2 CAN 2 PBR	21790 PZ 31338 ZSI 29291 PBR	45,90%	4	-	-





NÚMERO	PROVINCIA	UBICACIÓN	NOMBRE CILINDRO	NOMBRE DEL TUNO	LONGITUD (m)	Nº ARTICULACIONES	Nº REINTEGRACIONES	VALUACIÓN PARALELA	VALUACIÓN PERPENDICULAR	VALUACIÓN GLOBAL				
18.1	MÁLAGA	LAZO BARCELONA		CERRADO CALDERÓN		735,00	59,78%	40,22%	4	-	-	61.075,04	117.686,32	178.761,36
												2.028	43	173.312,78
18.2	MÁLAGA	LAZO CADIZ		CERRADO CALDERÓN		770,00	61,62%	38,38%	3	-	-	3.122.628.863,283	3.122.628.863,283	6.245.257.726,566
												40.326.297.727,277	3.531.236.878,408	70.857.534.145,685
												3.048.897.827,525	97.763.435.035,703	100.812.332.863,228
												3737272,835,79	40.326.297.727,277	43.063.570.563,073

NÚMERO	PROVINCIA	ORDENACIÓN	NOMBRE DEL TUBO	DIÁMETRO (m)	Nº ARTIFICIADOS	Nº RECONSTRUCCIONES	VALUACIÓN PARALELA	VALUACIÓN IMPERFECTA	VALUACIÓN DEFICIENTE	VALUACIÓN GLOBAL
19.1	MÁLAGA	LAO0 BARCELONA			1,541 1,538	0,000,000 179,864,742 5,288,911 1,043,73,319				
463,00	52,43%	47,57%	4							
19.2	MÁLAGA	LAO0 CADIZ			1,541 1,538	0,000,000 179,864,742 5,288,911 1,043,73,319				
440,00	56,37%	43,63%	4							

NÚMERO	PROVINCIA	ORIENTACIÓN	NOMBRE DEL TÚNEL	NOMBRE DEL TÚNEL	LONGITUD (M)	% APTEROSIDAD	REINTEGRO EN VALORACIÓN	VALORACIÓN PROYECTOS	VALORACIÓN EFECTOS	VALORACIÓN SUPLEN
20.1	MÁLAGA	LABO BARCELONA			381,00	70,42%	76.082.658 217.211.596 47.399.887 120.195.870	2	4	-
							CASO INTERIOR: 8.145.095.000,00 CICLO EXTERIOR: 506.832.273.533,28 AREA TOTAL: 548.488.188.726,82 AREA REINTEGRADA: 4.155.048.632,62 AREA ARTIFICIAL: 38.931.891.932,85	29,58%	-	
20.2	MÁLAGA	LABO CADIZ			387,00	77,64%	5.157.038.813,97 65.375.233.839,27 28.227.020,62 38.924.096.826,86	2	4	-
							CASO INTERIOR: 5.157.038.813,97 CICLO EXTERIOR: 65.375.233.839,27 AREA TOTAL: 74.532.262,45 AREA REINTEGRADA: 28.227.020,62 AREA ARTIFICIAL: 38.924.096.826,86	22,36%	-	

NÚMERO	PROVINCIA	ORIENTACIÓN	NOMBRE DE LA TUBO	DIÁMETRO (m)	Nº ARTIFICIADO	% RECONSTRUCCIÓN	VALUACIÓN PARABÓLICA	VALUACIÓN BIENEFICIA	VALUACIÓN SUBSIDIARIA	VALUACIÓN GLOBAL
21.1	MÁLAGA	LADO BARRIOM		SAN JOSÉ	1,041 1,038	36,457,087 24,318,514	33,37%	3	-	-
21.2	MÁLAGA	LADO CADIZ		SAN JOSÉ	1,041 1,038	37,462,078,645,674 316,545,188,752,108	38,23%	3	-	-

NÚMERO	PROVINCIA	OPORTUNIDAD	NOMBRE DEL TÚNEL	LONGITUD (m)	Nº ARTICULACIÓN	Nº REINTEGRACIÓN	VALUACIÓN PARALELA	VALUACIÓN INCLINADA	VALUACIÓN GLOBAL		
22.1	MÁLAGA	LAO BARCELONA		176,00	1,00	77062827 22113296 162360 27811206	5	5	-		
										47,52%	52,48%
22.2	MÁLAGA	LAO CADIZ		202,00	1,00	32846292,635922 22113296 162360 27811206	5	5	-		
										44,84%	55,16%
				CERRASOL		ÁRDO INTERIORE: CERRASOL INTERIORE: ÁRDO TOT PAL: ÁRDO REINTEGRADA: ÁRDO ARTIFICIAL:		32846292,635922 22113296 162360 27811206		71,761.641.038.65 64.321.574.177.634	
				CERRASOL		ÁRDO INTERIORE: CERRASOL EXTERIORE: ÁRDO TOT PAL: ÁRDO REINTEGRADA: ÁRDO ARTIFICIAL:		36.376.374.165.793 398.974.694.272.236 24.552.146.232.276 318.378.859.926.55 318.561.374.372.638		55,16% 44,84%	

NÚMERO	PROVINCIA	ORIENTACIÓN	NOMBRE DEL TUBO	DIÁMETRO (m)	Nº ANTIGÜEDAD	% PENETRACIÓN	VALUACIÓN PARABÓLICA	VALUACIÓN BIENEFICIA	VALUACIÓN SUBSIDIARIA	VALUACIÓN GLOBAL
<b>23.1</b>	MÁLAGA	LADO BARCELONA		<b>164,00</b>	1.041 1.038	104.615,631 34.358,019 7.289 90 294.874,746	-	-	-	-
<b>23.2</b>	MÁLAGA	LADO CÁDIZ		<b>138,00</b>	1.041 1.038	104.615,631 34.358,019 7.289 90 294.874,746	-	-	-	-

TABLADO

LADO BARCELONA

LADO CÁDIZ

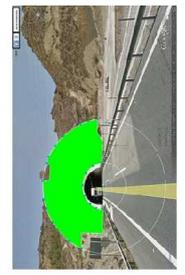
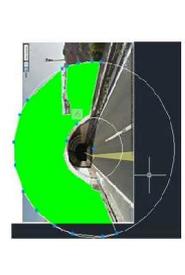
MÁLAGA

MÁLAGA

**23.1**

**23.2**

NÚMERO	PROVINCIA	OPORTUNIDAD	NOMBRE DEL TÚNEL	LONGITUD (m)	Nº ARTICULACIONES	Nº REINTELAJACIONES	VALUACIÓN PARALELA	VALUACIÓN INCLINADA	VALUACIÓN GLOBAL
24.1	MÁLAGA	LAO BARCELONA		56,00	62,19%	37,81%	3	-	-
24.2	MÁLAGA	LAO CADIZ		56,00	62,19%	37,81%	3	-	-

NÚMERO	PROVINCIA	ORIENTACIÓN	NOMBRE DEL TUBO	NOMBRE DEL TUBO	LO INSTALO (m)	Nº ATERRIZAJES	Nº REINTEGRACIONES	VALIDACIÓN PARALELA	VALIDACIÓN BARRERA	VALIDACIÓN INDIVIDUAL	VALIDACIÓN GLOBAL
25.1	MURCIA	LADO BARCELONA			560,00	1,000 1,000	359.388.364.573.946 359.388.364.573.946 2.237.875.854.942.149	4	-	-	-
25.2	MURCIA	LADO CADIZ			954,00	1.000 1.000	359.388.364.573.946 359.388.364.573.946 2.237.875.854.942.149	5	-	-	-

NÚMERO	PROVINCIA	ORIENTACIÓN	NOMBRE DEL TUBO	IDENTIFICADOR (ID)	Nº ARTICULACIÓN	Nº REINTEGRACIÓN	VALIDACIÓN PRELIMINAR	VALIDACIÓN INTERMEDIA	VALIDACIÓN DEFINITIVA	VALIDACIÓN GLOBAL
26.1	GRANADA	LA DO BARCELONA	GUALCHOS		1,000 1,000	876,145,545 2,487,737,176 962,828 2,783,937,771	0	5	4	3
26.2	GRANADA	LA DO CADIZ	GUALCHOS		1,000 1,000	358,378,346,577,985 3,487,737,176 962,828 2,517,737,962,462,148	0	5	5	3

## **APÉNDICE 2: VARIABLES UTILIZADAS EN LA CARACTERIZACIÓN SOSTENIBILIDAD-INTEGRACIÓN**

Optimización del consumo eléctrico en el alumbrado de túneles en autovías de alta capacidad mediante actuaciones sobre el entorno. Análisis crítico de la normativa vigente.

Nº	TÚNEL	LONGITUD (m)	% ARTIFICIALIDAD	% RENATURIZACIÓN	Obr. Civil €	Escollera €	Falso Túnel €	Plantaciones €	Coste Total €	Coste Embocaille €/por Tubo	Consumo €/ano/Tubo	VALOR PANSUSITICO	VALORACIÓN ENERGÉTICA	VALORACIÓN E. EMBOQUILLE	VALORACIÓN GLOBAL
1.1	FONT ROJA - 2 (A)	898	87,75%	12,25%	594.661,74	0,00	0,00	9.410,81	604.072,55	309.017,08	96.774,38	1	-	-	1
1.2	FONT ROJA - 2 (A)	908	77,92%	22,08%						295.055,47	94.351,56	4	0	3	2
1.3	FONT ROJA - 1 (A)	674	84,97%	15,03%	514.438,01	0,00	442.280,72	0,00	956.718,73	956.718,73	136.034,85	4	0	4	3
1.4	FONT ROJA - 1 (A)	630	53,20%	46,80%	425.277,60	0,00	147.489,17	0,00	572.766,77	572.766,77		2	-	0	3
2.1	AGUADULCE (AL)	598	92,29%	7,71%	257.452,26	0,00	0,00	9.410,81	266.863,07	134.653,44	49.309,59	4	4	2	4
2.2	AGUADULCE (AL)	524	87,85%	12,15%						132.209,63	48.414,68	4	4	5	4
3.1	CANTALOBOS (GR)	2170	56,60%	43,40%	378.270,24	0,00	198.027,76	0,00	576.298,00	576.298,00		3	-	2	-
3.2	CANTALOBOS (GR)	2170	54,05%	45,95%	530.310,84	0,00	148.193,43	0,00	679.104,27	679.104,27		3	-	1	-
4.1	IRABO (GR)	2092	73,43%	26,57%	409.706,63	0,00	0,00	9.410,81	419.117,44	220.716,25	63.537,71	4	3	4	4
4.2	IRABO (GR)	2082	75,00%	25,00%						198.401,19	57.113,86	5	3	4	4
5.1	MARCHANTE (GR)	1398	80,49%	19,51%						600.544,71	94.051,44	4	2	1	2
5.2	MARCHANTE (GR)	1363	61,38%	38,62%	696.333,74	61.862,84	426.286,58	11.097,66	1.195.380,82	594.836,11	93.157,41	0	2	2	1
6.1	RAMONCILLOS (GR)	664	52,44%	47,56%								4	0	4	2
6.2	RAMONCILLOS (GR)	634	57,55%	42,45%								4	0	4	3
7.1	FUENTECILLA (GR)	580	72,05%	27,95%	425.277,60	0,00	147.489,17	0,00	572.766,77	572.766,77		2	0	2	0
7.2	FUENTECILLA (GR)	610	72,05%	27,95%								2	-	2	2
8.1	ACERBUCHAL (GR)	551	51,00%	49,00%	257.452,26	0,00	0,00	9.410,81	266.863,07	134.653,44	49.309,59	4	4	5	4
8.2	ACERBUCHAL (GR)	541	52,95%	47,05%								4	4	5	4
9.1	CARCHUNA (GR)	540	69,50%	30,50%	378.270,24	0,00	198.027,76	0,00	576.298,00	576.298,00		3	-	2	-
9.2	CARCHUNA (GR)	550	69,50%	30,50%	530.310,84	0,00	148.193,43	0,00	679.104,27	679.104,27		3	-	1	-
10.1	MADROÑO (GR)	544	54,19%	45,81%	409.706,63	0,00	0,00	9.410,81	419.117,44	220.716,25	63.537,71	4	3	4	4
10.2	MADROÑO (GR)	489	49,32%	50,68%						198.401,19	57.113,86	5	3	4	4
11.1	GUAPA (GR)	526	53,25%	46,75%						600.544,71	94.051,44	4	2	1	2
11.2	GUAPA (GR)	521	92,26%	7,74%						594.836,11	93.157,41	0	2	2	1
12.1	CALACETE (GR)	390	56,03%	43,97%								4	0	4	2
12.2	CALACETE (GR)	370	50,39%	49,61%								4	-	4	-
13.1	GATO (GR)	250	49,11%	50,89%								5	-	-	-
13.2	GATO (GR)	260	49,59%	50,41%								5	-	-	-
14.1	CHURRIANA (MA)	1213	66,65%	33,35%	1.109.931,62	0,00	0,00	9.410,81	1.119.342,43	549.924,00		2	2	2	2
14.2	CHURRIANA (MA)	1256	75,65%	24,35%						569.418,43		3	-	2	-
15.1	TORROX (MA)	1148	69,55%	30,45%								3	-	2	-
15.2	TORROX (MA)	1152	54,10%	45,90%								4	-	-	-
16.1	SAN PEDRO DE ALCANTARA (GR)	997	100,00%	0,00%								0	-	-	-
16.2	SAN PEDRO DE ALCANTARA (GR)	997	100,00%	0,00%								0	-	-	-
17.1	CAPISTRANO (MA)	928	91,64%	8,36%								0	-	-	-
17.2	CAPISTRANO (MA)	975	54,13%	45,87%								4	-	-	-
18.1	CERRADO CALDERÓN (MA)	735	59,78%	40,22%								4	-	-	-
18.2	CERRADO CALDERÓN (MA)	770	61,62%	38,38%								3	-	-	-
19.1	LAGOS (MA)	463	52,43%	47,57%								4	-	-	-
19.2	LAGOS (MA)	440	56,37%	43,63%								4	-	-	-
20.1	PINO (MA)	381	70,42%	29,58%							33.857,07	2	4	-	-
20.2	PINO (MA)	387	77,64%	22,36%							34.390,25	2	4	-	-
21.1	SAN JOSÉ (MA)	374	66,63%	33,37%								3	-	-	-
21.2	SAN JOSÉ (MA)	374	38,23%	61,77%								3	-	-	-
22.1	CERROSOL (MA)	176	47,52%	52,48%							16.364,78	5	5	-	-
22.2	CERROSOL (MA)	202	44,84%	55,16%							18.782,50	5	5	-	-
23.1	TABLAZO (MA)	164	58,77%	41,23%								4	-	-	-
23.2	TABLAZO (MA)	138	49,62%	50,38%								5	-	-	-
24.1	FRIGLIANA (MA)	56	62,19%	37,81%								3	-	-	-
24.2	FRIGLIANA (MA)	56	62,19%	37,81%								3	-	-	-
25.1	LORCA (MU)	560	56,58%	43,42%								4	-	-	-
25.2	LORCA (MU)	954	49,66%	50,34%								5	-	-	-
26.1	GUALCHOS (GR)	330	100,00%	0,00%	257.784,17	0,00	78.180,80	0,00	335.964,97	191.152,48	23.602,26	0	5	4	3
26.2	GUALCHOS (GR)	250	100,00%	0,00%						144.812,49	17.860,50	0	5	5	3

## **APÉNDICE 3: RADIOMETRÍA, FOTOMETRÍA Y COLORIMETRÍA**

## 1.- RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA

Llamamos energía radiante a la energía emitida, transportada o recibida en forma de radiación electromagnética. Esta radiación tiene su origen en la energía que emiten los cuerpos cuando sus átomos o grupos de átomos pasan de unos estados energéticos a otros y que se propaga por el espacio. Para medirla emplearemos detectores que la absorberán y la transformarán en otros tipos de energía. Este será el objeto de estudio de la Radiometría y la Fotometría.

A lo largo de los años, los distintos autores han empleado nomenclaturas muy dispares para definir las magnitudes básicas en estas ciencias. Este hecho ha constituido sin duda una de las mayores dificultades a la hora de abordar con garantías el estudio de estas disciplinas que, por otra parte son fundamentales en campos como la Astronomía, la Óptica Aplicada o la Ingeniería.

Nosotros estableceremos desde el principio las definiciones que vamos a emplear (que son las recomendadas por la Comisión Internacional de Iluminación, CIE) y nos ceñiremos a ellas escrupulosamente a lo largo de todo el trabajo. A continuación enunciamos estas definiciones.

### 1.1- Magnitudes radiométricas

La Radiometría es la ciencia cuyo objeto es la medida de la energía radiante.

**Definición.-** Flujo radiante ( $F_e$ ): energía radiante emitida, transportada o recibida por unidad de tiempo. Se expresa en vatios (W).

**Definición.-** Intensidad radiante ( $I_e$ ): Flujo radiante que emite una fuente puntual por unidad de ángulo sólido. Se expresa en  $Wsr^{-1}$ .

**Definición.-** Exitancia radiante ( $M_e$ ): Flujo radiante que se emite en todas las direcciones por unidad de superficie. Se expresa en  $Wm^{-2}$ .

**Definición.-** Irradiancia ( $E_e$ ): Flujo radiante que se recibe en todas las direcciones por unidad de superficie. Se expresa en  $Wm^{-2}$ .

**Definición.-** Radiancia ( $L_e$ ): Para fuentes extensas se define como el flujo radiante emitido por unidad de superficie proyectada en la dirección de propagación y de ángulo sólido que contiene a dicha dirección. Se expresa en  $Wm^{-2}sr^{-1}$ .

Si en lugar de trabajar en todo el espectro electromagnético lo hacemos únicamente en una longitud de onda determinada, añadiremos a las definiciones anteriores el adjetivo “espectral” y hablaremos de flujo espectral, intensidad espectral etc. Estas magnitudes pasarán a expresarse en  $W\mu m^{-1}$ ,  $Wsr^{-1}\mu m^{-1}$  etc.

### Propiedades del medio

Cuando la energía radiante pasa de un medio a otro, en la frontera entre ambos puede ser total o parcialmente reflejada, transmitida o absorbida. Para cuantificar estos fenómenos se definen las siguientes magnitudes

#### Transmitancia $\tau$

Es el cociente entre el flujo radiante transmitido y el incidente,  $\tau = \frac{F_{et}}{F_{ei}}$

#### Reflectancia $\rho$

Es el cociente entre el flujo radiante reflejado y el incidente,  $\rho = \frac{F_{er}}{F_{ei}}$

#### Absortancia $\alpha$

Es el cociente entre el flujo radiante absorbido y el incidente,  $\alpha = \frac{F_{ea}}{F_{ei}}$

Por conservación de la energía, tenemos  $\tau + \rho + \alpha = 1$

**Opacidad**  $\theta = \frac{1}{\tau}$

**Densidad óptica**  $\delta = \log(\theta)$

Estas dos últimas magnitudes son ampliamente utilizadas en Astrofísica y Física Atmosférica para caracterizar medios como nubes de polvo o gas, atmósferas planetarias y estelares o capas de éstas.

## 1.2- Magnitudes fotométricas

La Fotometría es la parte de la Radiometría que se ocupa del intervalo del espectro electromagnético que comprende la radiación visible o luz. Su extensa aplicación en todos los temas relacionados con el color y la visión dan a esta parte de la Radiometría una identidad y un sistema de unidades propias. Las magnitudes que se miden en Fotometría tienen su análogo en Radiometría y su razón de ser es que están más acorde con los órdenes de magnitud con los que opera el ojo que es el instrumento que toma esta ciencia como patrón.

El paso de magnitudes radiométricas a magnitudes fotométricas será de la forma:

$$X_V = K_m \int_{380}^{780} X_{e\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

siendo  $X_V$  y  $X_{e\lambda}$  las magnitudes fotométrica y radiométrica respectivamente,  $V(\lambda)$  la eficiencia luminosa espectral y  $K_m$  la eficacia luminosa máxima,  $K_m = 683 \text{ lm/W}$ .

**Definición.**- Flujo luminoso ( $F_V$ ): cantidad de luz emitida, transportada o recibida por unidad de tiempo. Se expresa en lúmenes (lm).

**Definición.**- Intensidad luminosa ( $I_V$ ): Flujo luminoso que emite una fuente puntual por unidad de ángulo sólido. Se expresa en candelas en (cd) siendo  $1 \text{ cd} = 1 \text{ lmsr}^{-1}$ .

**Definición.**- Exitancia luminosa ( $M_V$ ): Flujo luminoso que se emite en todas las direcciones por unidad de superficie. Se expresa en  $\text{lmm}^{-2}$ .

**Definición.**- Iluminancia ( $E_V$ ): Flujo luminoso que se recibe en todas las direcciones por unidad de superficie. Se expresa en lux (lx) siendo  $1 \text{ lx} = 1 \text{ lmm}^{-2}$ .

**Definición.**- Luminancia ( $L_V$ ): Para fuentes extensas se define como el flujo luminoso emitido por unidad de superficie proyectada en la dirección de propagación y de ángulo sólido que contiene a dicha dirección. Se expresa en  $\text{Cdm}^{-2}$ .

Esta magnitud tendrá una importancia singular en Fotometría pues es la que percibe el ojo cuando observa fuentes extensas.

### 1.3- Relaciones radiométricas y fotométricas importantes

A continuación enunciamos algunas relaciones especialmente utilizadas en Radiometría y Fotometría. Al ser demostraciones sencillas, solo la incluiremos en el primero de los casos. No obstante estas demostraciones pueden encontrarse en [1] y en [5]. También veremos la importante ley de Bouguer- Beer- Lambert para la que si entraremos en más detalles por introducir magnitudes básicas en cálculos de atenuación que pueden ser útiles en casos con condiciones meteorológicas adversas o fuentes muy alejadas.

#### a) Relación entre irradiancia e intensidad radiante para una fuente puntual

Sea una fuente emisora puntual P situada a una distancia r de un elemento de superficie receptora dS cuya normal forma un ángulo  $\alpha$  con la línea que une fuente y

superficie. Si además suponemos que la fuente emite un flujo  $dF_e$  en el ángulo sólido subtendido por  $dS$ , aplicando la definición anterior de intensidad radiante tenemos

$$dF_e = I_e \frac{dS \cos \alpha}{r^2}$$

donde hemos tenido en cuenta la relación entre ángulo plano, ángulo sólido y la superficie que lo subtiende

$$\omega = \frac{S \cos \alpha}{r^2}$$

Finalmente, teniendo en cuenta la definición de irradiancia, se deduce la importante relación entre irradiancia e intensidad radiante

$$E_e = I_e \frac{\cos \alpha}{r^2}$$

#### **b) Relación Luminancia – Iluminancia para fuentes extensas**

Sean dos fuentes extensas, una emisora ( $dS_1$ ) y otra receptora ( $dS_2$ ) cuyas normales forman respectivamente ángulos  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  con la línea que los une. Existe una relación entre la luminancia emitida por  $dS_1$  y la iluminancia recibida por  $dS_2$  dada por

$$E_V = L_V \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 dS_1}{r^2}$$

#### **c) Relación Luminancia – Iluminancia para una misma superficie**

Sea una superficie sobre la que incide un haz de luz con iluminancia  $E_V$ . Se demuestra que la relación entre la iluminancia recibida y la luminancia que refleja viene dada por

$$\rho_V E_V = \pi L_V$$

donde  $\rho_V$  es la reflectancia de la superficie.

#### **d) Ecuación del transporte radiativo. Ley de Bouguer- Beer- Lambert**

En muchas ocasiones, las magnitudes fotométricas o radiométricas que medimos no permanecen inalteradas en el trayecto recorrido entre la fuente emisora de radiación y

nuestro detector. En general la radiación electromagnética sufre procesos de absorción, dispersión e intensificación. En este apartado vamos a deducir una ecuación que, conocidas las características del medio atravesado por nuestro haz de radiación, nos permitirá calcular magnitudes fotométricas o radiométricas de este haz: la ley de Bourger-Beer-Lambert.

Sea un haz de radiación monocromática caracterizado por una radiancia  $L_{e\lambda}$  que atraviesa un medio cualquiera. La interacción de la radiación con dicho medio producirá en general dos efectos sobre nuestro haz: por un lado se atenuará debido a la absorción del medio y a la dispersión por parte de las moléculas de dicho medio. Esta atenuación será proporcional a la radiancia incidente, al camino recorrido dentro del medio y a las características atenuadoras del medio que se incluirán dentro de un coeficiente de atenuación para la longitud de onda de nuestro haz monocromático:

$$dL_{e\lambda} = -k_{\lambda} L_{e\lambda} ds$$

donde  $k_{\lambda}$  es el coeficiente de extinción para esa longitud de onda. Conviene notar aquí que este coeficiente representa la suma de dos contribuciones, una que da cuenta de la atenuación debida a la dispersión de la radiación por el medio y que se denomina coeficiente de dispersión  $\sigma_{\lambda S}$  y otra que tiene en cuenta la atenuación debida a la absorción de la radiación, el coeficiente de absorción  $\sigma_{\lambda a}$ . De este modo siempre que hablemos de coeficiente de extinción nos estaremos refiriendo al efecto conjunto de absorción y dispersión, bien para una longitud de onda  $\lambda$  ( $k_{\lambda} = \sigma_{\lambda a} + \sigma_{\lambda S}$ ) o bien para todo el espectro electromagnético ( $k = \sigma_a + \sigma_S$ ). Sin embargo, en ocasiones puede desprejarse el efecto de uno de los dos procesos (dispersión o absorción) en cuyo caso el coeficiente de extinción da cuenta únicamente del otro proceso.

Por otro lado, el propio medio puede contribuir a la intensificación del haz por dispersión o por emisión propia:

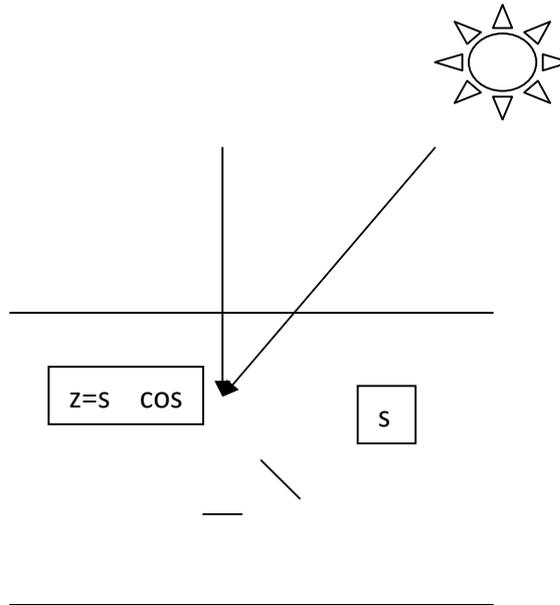
$$dL_{e\lambda} = k_{\lambda} S_{\lambda} ds$$

donde  $S_{\lambda}$  es la función fuente que da cuenta de las características emisivas del medio (coeficientes de Einstein) y de la radiación dispersada que pueda sumarse a nuestro rayo. Notemos que la inclusión del coeficiente de atenuación en esta contribución puede parecer incorrecta pero en realidad, la función fuente está dividida por ese mismo factor. Este truco facilitará las manipulaciones posteriores.

Si sumamos los efectos de emisión y absorción obtendremos la ecuación del transporte radiativo (ETR).

$$dL_{e\lambda} = k_{\lambda} S_{\lambda} ds - k_{\lambda} L_{e\lambda} ds \Rightarrow \frac{dL_{e\lambda}}{k_{\lambda} ds} = S_{\lambda} - L_{e\lambda}$$

Si el medio por el que se propaga la radiación puede tratarse como una lámina plano-paralela, introduciremos en nuestra ecuación la proyección del rayo sobre la normal a nuestro punto de observación.



**Fig.1- Rayo que penetra en un medio plano-paralelo**

De este modo la ETR presentará el siguiente aspecto

$$\cos \theta \frac{dL_{e\lambda}}{d\delta_{\lambda}} = S_{\lambda} - L_{e\lambda}$$

donde  $d\delta_{\lambda} = k_{\lambda} dz$  corresponde a la densidad óptica en la dirección normal a la superficie irradiada para la longitud de onda  $\lambda$ .

En este punto hemos llegado a una ecuación escalar (ya que estamos trabajando en una única dimensión espacial) e independiente del tiempo. En el caso en el que se pueda despreciar la emisión de la atmósfera ( $S_{\lambda} = 0$ ), la integración será casi inmediata dando como resultado la Ley de Bouguer- Beer- Lambert:

$$L_{e\lambda}(\delta_{\lambda}) = L_{e\lambda}(\delta_{0\lambda}) \exp(-(\delta_{\lambda} - \delta_{0\lambda}) / \cos \theta)$$

donde  $\delta_{0\lambda}$  es la densidad óptica del medio del que viene la luz antes de llegar a nuestro medio de interés. En la mayoría de los casos la expresión anterior se simplificará, ya

que la luz que llegue a nuestro medio vendrá directamente de la fuente que estemos considerando lo que implica  $\delta_{0\lambda} = 0$ .

De este modo,

$$L_e(\delta) - L_e(0) = \int_{380}^{780} L_{e\lambda}(0) \exp(-\delta_\lambda / \cos\theta) d\lambda$$

Llegados a este punto conviene decir que, aunque hasta ahora hemos trabajado con luminancias, estas dos leyes son válidas para otras magnitudes fotométricas como la intensidad, la iluminancia y sus análogas radiométricas.

En realidad, la ley de Bouguer sólo representa adecuadamente los procesos de atenuación debidos a la dispersión por gases y a la absorción y dispersión por aerosoles mientras que la absorción por gases es un proceso muy complicado. No obstante, dado que otros procedimientos que dan cuenta de la absorción por gases requieren una gran cantidad de cálculos es muy común aplicar también esta ley o alguna variante suya para dar cuenta de estos procesos

## 2.- COLORIMETRÍA

La Colorimetría es la ciencia cuyo objeto es la medida del color.

**Definición.**- Color percibido es el aspecto de la percepción visual mediante el cual un observador puede distinguir diferencias entre dos campos del mismo tamaño, forma y textura tal que puedan ser debidas a diferencias en la composición espectral de las radiaciones relacionadas con la observación.

### 2.1- Atributos perceptivos del color

Distinguiremos los siguientes:

- **Tono:** es el atributo de la percepción visual que nos permite caracterizar un color. Si el color percibido posee tono, se le denomina **color cromático**. Si no lo posee (blanco o gris) hablaremos de **color acromático**.
- **Luminosidad:** atributo de la sensación visual según el cual un campo parece exhibir mayor o menor cantidad de luz.
- **Saturación:** colorido de un campo juzgado en proporción a su luminosidad.
- **Colorido:** es el atributo de la sensación visual según el cual un campo parece exhibir más o menos color cromático

- **Claridad:** luminosidad de un campo juzgada en proporción a la luminosidad de un campo igualmente iluminado que se define como blanco o perfectamente transparente.

- **Croma:** colorido de un campo juzgado en proporción a la luminosidad de un campo igualmente iluminado que se percibe como blanco o perfectamente transparente.

De todos estos atributos bastan tres para determinar un color. Estos suelen ser tono, luminosidad y saturación si estamos trabajando con luces directas o bien tono, claridad y croma si se trata de materiales.

## 2.2.- Mezclas de color. Igualación

**Definición.-** Llamamos mezcla de color a cualquier método que permita obtener un color o luz de composición espectral dada a partir de otros.

Distinguimos dos tipos básicos de mezclas de color:

- Mezclas aditivas: aquellas en las que se suman luces o colores distintos
- Mezclas sustractivas: aquellas en las que bien por filtrado o bien por otro mecanismo sustraemos una o varias longitudes de onda de un haz de luz de composición espectral dada.

Cuando mediante una mezcla conseguimos que dos estímulos luminosos de distinta composición espectral sean percibidos por un observador como idénticos decimos que se ha producido una *igualación de color*.

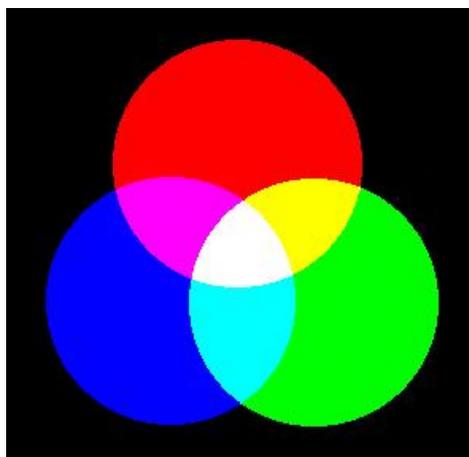


Fig. 2- Ejemplo de mezcla aditiva de color

### 2.3- Metamerismo

**Definición.-** Llamamos metamerismo a la posibilidad que tiene el sistema visual humano de ver iguales dos colores que difieren en su composición espectral. Cuando esta igualación tiene lugar decimos que los dos colores son metámeros.

Una explicación a este fenómeno la proporciona el principio de univarianza de Nakaguchi según el cual, las señales generadas en los fotorreceptores de nuestro sistema visual no vienen determinadas por la composición espectral de la luz que llega a dichos fotorreceptores. Dicho de otro modo, las distintas combinaciones de impulsos nerviosos generadas por los tres tipos de conos existentes dar lugar a que a dos colores distintos les corresponda una misma señal de salida.

### 2.4- Álgebra del color

Apoyándonos en el concepto de igualación y bajo una amplia gama de condiciones, podemos desarrollar la Colorimetría en modo paralelo al Álgebra lineal. Al igual que en aquella disciplina, dispondremos de un conjunto de elementos (las distintas longitudes de onda que componen el espectro) y una operación interna (la adición de colores).

*Postulado básico de la igualaciones de color:* Bajo un amplio rango de condiciones experimentales, una gran cantidad de colores pueden ser igualados a una mezcla aditiva de cantidades apropiadas de tres colores a los que denominaremos primarios.

Estos tres colores primarios no son fijos pero tampoco pueden ser elegidos de forma arbitraria. Ninguno de ellos ha de poder ser obtenido por mezcla aditiva a partir de los otros tres. La propiedad del sistema visual humano que hace posible este hecho recibe el nombre de *trivarianza cromática* y las cantidades de cada uno de los tres primarios necesarias para igualar un color dado se llaman *valores triestímulos*.

Si consideramos el paralelismo con el Álgebra queda claro que el conjunto de tres primarios constituiría lo que en esa disciplina se denomina una "base".

Traduciendo al lenguaje matemático estas propiedades podemos establecer una importante relación conocida como *ecuación tricromática*

$$cC = lR + mV + nA$$

donde los coeficientes  $c$ ,  $l$ ,  $m$  y  $n$  representan magnitudes fotométricas como luminancias o flujos mientras que  $C$ ,  $R$ ,  $V$  y  $A$  no tienen por el momento ningún significado cuantitativo.

Se cumple la relación  $c = l + m + n$  y se dice que  $l$ ,  $m$  y  $n$  son las componentes tricromáticas de  $c$ . Si tenemos en cuenta las leyes de Grassmann y dividimos entre  $c$  a ambos miembros obtenemos

$$1C = rR + vV + aA$$

donde  $r = \frac{l}{l+m+n}$ ,  $v = \frac{m}{l+m+n}$  y  $a = \frac{n}{l+m+n}$  se denominan *coordenadas tricromáticas*.

## 2.5- Observadores patrón

Cuando se escogen como primarios un rojo de 700 nm, un verde de 546,1 nm y un azul de 453,8 nm decimos que estamos trabajando en Sistema RGB. Las coordenadas tricromáticas en este sistema se denominan por r, g y b.

Las unidades de estos estímulos primarios se fijaron de forma que el iluminante equienergético E tuviese la ecuación

$$1E = 0,333R + 0,333G + 0,333B$$

o, lo que es igual, para obtener el espectro equienergético, las cantidades de lúmenes que tendríamos que aplicar de rojo, verde y azul guardarían la relación

$$L_R : L_G : L_B = 1 : 4,59 : 0,61$$

De este sistema y mediante un simple cambio de coordenadas derivan los conocidos como CIE 1931 o CIE 1964 que son los que utilizaremos en este trabajo.

## 1.5- Funciones de mezcla. Aplicaciones en el Sistema CIE 1931.

Sea una luz con longitud de onda  $\lambda$  y flujo energético unidad. Si hacemos una mezcla aditiva de primarios, las cantidades de cada uno de estos que tendremos que tendremos que aplicar para la longitud de onda  $\lambda$  se llamarán valores triestímulos. En el sistema CIE 1931, estos valores se representarán por  $\bar{x}_\lambda$ ,  $\bar{y}_\lambda$  y  $\bar{z}_\lambda$ . Este sistema tiene la particularidad de que  $\bar{y}_\lambda$  se escoge de forma que coincide con el factor de visibilidad  $V_\lambda$ . De este modo, para una luz dada, la suma extendida a todo el espectro del valor triestímulo  $\bar{y}_\lambda$  coincide con el flujo o con la luminancia, en el intervalo que estemos considerando.

Si medimos el flujo espectral en un intervalo dado, podemos calcular los valores triestímulos mediante

$$X = \sum_i \bar{x}_{\lambda_i} F_{ei} ; Y = \sum_i \bar{y}_{\lambda_i} F_{ei} ; Z = \sum_i \bar{z}_{\lambda_i} F_{ei}$$

Como hemos visto anteriormente, el cálculo de las coordenadas tricromáticas a partir de los triestímulo será inmediato.

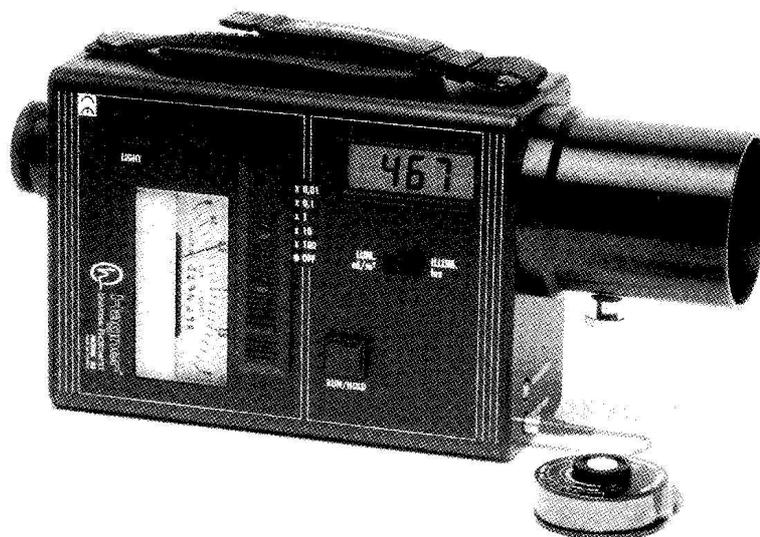
Así, cuando trabajamos en el sistema CIE 1931, podemos a partir de una magnitud espectral como la radiancia y estas funciones (que están perfectamente tabuladas) determinar el color de una luz con suma facilidad. Todo esto será rigurosamente cierto siempre que nos movamos dentro de aperturas menores de los 4º, que es el campo de aplicación de este sistema.

## **APÉNDICE 4: FICHAS TÉCNICAS DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA**



## Universal photometer/radiometer

# Model **S3**



**For measurement of luminance and illuminance.  
Also, using special detectors, for measurement of  
other photometric and radiometric quantities.**

**UNIVERSAL  
PHOTOMETER/RADIOMETER,  
MODEL S3**

provisional description

HAGNER UNIVERSAL PHOTOMETER/RADIOMETER,  
MODEL S3

Description  
and  
Instruction manual

The manufacturer reserves the right to alter the design without notice.

The instrument is protected by patents in several countries.

B. Hagner AB  
S-171 02 Solna  
Sweden

CONTENTS	PAGE
General Description	1
Instruction for Use	4
Measurement of Luminance	4
Measurement of Illuminance	4
Measurement at Range $\times 0.01$	5
Measurement of Angles and Solid Angles	5
Measurement of Reflection Factors	5
Measurement of Transmission Factors	6
Measurement of Contrast	7
Measurement with External Instruments	7
Measurement with Oscilloscope	7
Battery and External Power Supply	8
Measurement with Special Detectors	9
Measurement under Extreme Temperature Conditions	10
Maintenance and Calibration	10
Instrument Data	11
Figures and Photographs	

## General description

The Hagner Universal Photometer, model S3 is an easy to use precision instrument with automatic zeroing function for the measurement of:

Luminance  $1^{\circ}$  0.01 - 200,000 cd/m<sup>2</sup> (standard design) and Illuminance 0.01 - 200,000 lx (standard design). Angles and solid angles can also be measured, using the scales in the viewing field. Other photometric dimensions can be measured with the use of special detectors.

Detectors are available for:

- luminance with other measuring angles
- illuminance with hemi-cylindric angular response
- illuminance with fully cylindric angular response
- illuminance with hemispheric angular response

Also:

- extra sensitive illuminance detectors
- extra low-sensitive illuminance detectors
- detectors for measurement of UV-A radiation
- detectors for measurement of UVB "
- detectors for measurement of UVC "
- detectors for measurement of IR "
- detectors for measurement of bilirubin radiation
- detectors for photosynthetic radiation
- detectors for measurement of spectral lines (e.g. mercury lines)
- cooled and non-cooled detectors for measurement of radiation up to 16  $\mu$  wavelengths
- fibre optic (light guide) detectors
- water proof detectors
- detectors with tailor-made spectral and angular response
- etc.

Luminance ( $1^{\circ}$ ) is measured (with the selector switch in position "LUM.cd/m<sup>2</sup>") through the single-eyed viewing/measuring optical system. This gives a very clear and bright image of approx.  $11^{\circ}$  circular, while the  $1^{\circ}$  measurement sight point is seen as a darker area (fig. 2). This sight-point is identical with the opening in mirror B (see fig. 3) where light enters to the detector. Together with the viewing field an analogue instrument is seen (fig. 2), which can be observed also from the outside of the photometer. This is intended to be an approximate indicator. The precise measured

value is indicated on a digital display visible from the outside of the photometer. The displayed value can be locked and released by a run/hold button (fig. 1). The display also has an indication "BAT" for low battery voltage. The hold-button and the range-switch are manœvered with the right hand, while the sight point is aimed towards the target in the viewing field (fig. 6).

The luminance detector is a silicon photodiode with colour correction filters, placed behind the opening in mirror (B), (see fig. 3). The filtered detector has a spectral response very close to that of the human eye (photopic) as defined by CIE (see fig. 4). The area actually measured is the same as the one seen as a dark spot (1° circular) in the viewing field.

As the opening in mirror (B) is of clear glass, almost perpendicular to the direction of the light entering it, **all polarised light will be measured correctly** regardless of degree of polarisation or polarisation plane.

The objective lens (A) is large (diam. 52 mm) and single (focal length 120 mm). It can be focused to an object distance from 500 mm to infinity **without correction factors involved**.

(If measurements according to the CIBSE LG 3 are carried out, it is recommended to fix focus the meter at approx. 2 metres. This will give a correct reading of luminance at all distances, but the luminance is measured on a spot 1,4° diameter at 1 metre and 3 metres distance, which normally has very little significance. Measurements at short distances should however always be carried out with proper focusing.)

Mirror (B) forms its surface close to the objective's spheric image plane. The two spheric mirrors (B) and (C) (see fig. 3) give together a relatively plain and undistorted picture of the viewing field and the 1° sight point represented as a dark spot at the field lens (D). The image and analogue instrument at (D) are studied through the eye piece (E).

The eye piece is not adjustable, but it is of sufficient size to enable persons wearing spectacles to keep them on when using the instrument. For the protection of spectacles, the eye piece is surrounded by a rubber ring.

**Note:**

If intensive directional light enters through the eye piece, which is only possible when luminance is read from the outside of the instrument, this light may influence the reading when low luminance levels are measured. This can be avoided by shading the eye piece with the hand or with the eye piece plug supplied.

A scale on the bottom cover (fig. 1B) makes it possible, with an attached pendulum (provided), to read the elevation angle of the photometer. This is specially useful when the photometer is mounted on a tripod, e.g. when measuring in accordance with CIBSE LG 3.

#### **Scale illumination**

If luminance measurements are taken under dark conditions (e.g. when street surface luminance is measured at night) it may happen that light conditions do not allow a convenient reading of the analogue instrument. If button "light" is depressed the analogue internal and external scales are illuminated. After the button is released the illumination continues for approx. 15 seconds. If you need more than 15 seconds just keep the button depressed. The timing is intended to spare battery capacity. The digital display will not be illuminated.

When very low luminance is measured, readings have to be done on the lower part of the scale, but the resolution of the digital instrument is still accurate within  $\pm 1$  digit.

Illuminance (illumination) is measured with the standard external detector provided, (while the selector switch under the digital display shall be set to "ILLUM. lux"). The standard detector is  $V_{\lambda}$ -filtered (photopic) and cosine-corrected as defined by CIE (see fig. 4A and 4B). It is marked with an absolute sensitivity in pA/lux. Other photometric/radiometric quantities can be measured with optional special external detectors. Each special detector is calibrated to absolute sensitivity described as A/unit and can thus be calibrated to the photometer with a simple mathematical calculation (see chapter "Special detectors").

The photometer cannot be damaged by excessive light or radiation on any range.

The distance between photometer and external detector can be increased by use of extension cables of desired length.

#### **Please note:**

If, when the photometer is switched on, the display shows -1, this indicates that the hold button is not released. The meter will function again when the button is released.

#### **Metric - imperial units**

For conversion between metric and imperial units the following factors should be used:

1 cd/m<sup>2</sup> = 0,292 footlambert (fL)  
1 fL = 3,43 cd/m<sup>2</sup>  
1 lux = 0,0929 lm/ft<sup>2</sup> (footcandle, fc)  
1 fc = 10,76 lux

The model S3 photometer can be supplied, calibrated in imperial units, on request at time of purchase.

**The electronic system**

A simplified sketch of the electronic design is shown in fig. 5. It demonstrates that the detector generates current towards a virtually shortened circuit. This makes the response linear well within the photometer's range and the influence of ambient temperature insignificant.

**Instruction for use**

**Measurement of luminance**

Set the selector switch in position "LUM. cd/m<sup>2</sup>". Guide the sight point to the object to be measured.

Adjust the objective lens to a position where the object is seen distinctly. (The focusing is correct when the sight point is fix relative the object even when the eye is moved across the eye piece.)

While observing the object, move the range switch to a position where a convenient reading on the analogue instrument is obtained. Use the hold button to "freeze" the digital display. Read the display and multiply with range used. The luminance displayed represents the average luminance within the target represented by the dark spot. The analogue instrument will continue to move with changing light but has no longer any significance. Under no circumstances can the instrument be overloaded.

Please note: Directing the sight point towards the sun will not damage the photometer but may damage the operator's eye!

**Measurement of illuminance (illumination)**

Set the selector switch in position "ILLUM. lux". Connect the standard external detector carefully! (The connector should be pushed perpendicular to the panel without using force. The centre pin is delicate and must not be bent!)

Place the detector in position and move the range switch to a convenient reading. Read the digital display and multiply with the range used. The reading represents the average illuminance (illumination) on the white cosine correction disc (Ø 10 mm). When the hold button is depressed, the analogue instrument will continue to move with changing light, but has no longer any significance.

After use, when the detector is disconnected, please grip the connector - not the cable!!! The detector should be rotated rather than the cable being wound round the detector to avoid twisting the cable. (A twisted cable does not affect the reading as long as it transmits a signal.)

When measurements are made on the most sensitive range (x 0.01), the instrument pointer can "jump" because of capacitive influence from the cable. The effect disappears as soon as the cable is lying still.

**Measurement of illuminance and luminance at range x 0.01**

When respective detector is completely darkened, it may happen that the instrument displays a low value plus or minus. This can not be trimmed from the outside of the meter but can be eliminated as follows:

**Illuminance:**

Darken external detector with darkening cap provided. Read offset value, say -002. Read measured value, say 114. True illuminance is  $(114 + 002) \times 0.01 = 1.16$  lux.

**Luminance:**

To check the zero offset at range x 0.01, it is recommended to darken the internal (luminance) detector as follows: Enter an area where the illumination is less than 100 lux. Shade eye-piece with plug or hand. Press the shade against a dark surface and switch to range x 0.01. Read the offset value, say (+) 003. As long as illuminance on instrument side of meter is less than 100 lux, which is usual when this range is used, (i.e. in streets at night etc.), the influence of disturbing light is less than  $0.01 \text{ cd/m}^2$ . Example: A spot of a street surface at night is measured to  $009 \times 0.01 \text{ cd/m}^2$ . Zero offset is determined to 003 at same range. True luminance is then  $(9 - 3) \times 0.01 = 0.06 \text{ cd/m}^2$ . The zero offset value is constant over long time as long as temperature variations are not extremely high.

If ambient light is high and range x 0.01 is used, the analogue instrument must be shaded with a dark material, and - if meter is used on tripod - the eye-piece must be darkened with plug.

Scale illumination does not affect reading.

**Measurement of angles and solid angles**

In the viewing field two perpendicular scales can be observed. The division of the scales is  $1^\circ$ . Please observe that the sight point represents  $1^\circ$  and should be included when an angle is measured. The solid angle of an object can easily be determined with the knowledge that, for relatively small objects (e.g. light-sources in the viewing field) a surface with an area of  $1^\circ \times 1^\circ$  represents a solid angle of  $3,05 \times 10^{-4}$  steradians (sr). The total solid angle of an object can then be determined with simple geometric calculations.

The measurement of angles and solid angles is especially important when glare factors and glare indices are measured. The angular displacement of a light source can be determined from the linear scales in the viewing field, applying a summation technique, if necessary.

**Measurement of reflection factors**

Measurement of reflection factors with the Hagner photometer consists mainly of a comparison between two measured luminance values.

Direct the Hagner photometer (which may be placed on a tripod) towards the surface of which the reflection factor is to be measured, and note the luminance. Then place a reference surface (optional) over the measured surface and record the new measurement value. Please note that the illuminance and the measurement geometry must remain unchanged. The reference surface must be matt and have a known reflection factor. The reflection factor can now be determined by the formula

$$\rho_x = \frac{\rho_R \cdot L_x}{L_R}$$

$\rho_x$  = The reflection factor of the examined surface

$\rho_R$  = The reflection factor of the reference surface

$L_x$  = The luminance of the examined surface

$L_R$  = The luminance of the reference surface

The measurement method described above applies to matt surfaces only. Polished surfaces must be measured with care, as a mirror reflection can distort the result completely. In the latter case the reflection factor is in the viewing direction under the lighting conditions in question.

#### **Measurement of transmission factors**

**Clear materials:** The transmission factor of a clear material can be measured by comparing two measured luminance values. The photometer is directed towards a surface of uniform luminance, whereupon the luminance value is read both when the instrument is measuring directly and when it is measuring through the material examined. The surface luminance and the measurement geometry must not be altered during the procedure.

The transmission factor  $\tau$  is

$$\tau = \frac{\text{surface luminance measured through the examined material}}{\text{surface luminance}}$$

**Diffusing materials:** An approximate method for measuring the transmission factor of a diffusing material is to place the external detector of the Hagner meter parallel to and close to a large surface of uniform emitted luminance and then measure the illuminance directly with a section of the transmitting material placed in front of the detector. The lighting and measurement conditions must not be changed during the procedure.

The transmission factor is then

$$\tau = \frac{\text{illuminance with material placed in front of the detector}}{\text{illuminance measured directly}}$$

Before measuring diffusing materials, some appropriate literature should be studied.

**Measurement of contrast**

Contrast is in fact a difference between the luminance (L) of an object and the luminance of the background (L<sub>b</sub>). The smallest difference (L-L<sub>b</sub>) which can be registered is largely dependent on the luminance of the background, which means that the actual value is better described by giving the contrast relatively as

$$\frac{L - L_b}{L_b}$$

Thus the contrast can be determined from two measurements of luminance.

**Measuring of light or radiation by means of external instruments**

Model S3 has a terminal (fig. 1) to which external instruments can be connected. The external instruments should have a minimum input resistance of 1 kΩ . The output signal is 0-2V in steps of 1 mV per displayed unit. Light fluctuations can be registered on recorder or voltmeter. Rapid light fluctuations can be displayed on oscilloscope.

**Measurement of fast light variations with use of oscilloscope**

The analogue output terminal can be connected to an oscilloscope with consideration taken to the following rise/fall times.

Range	Rise/fall time
x 100	20 μS
x 10	40 μS
x 1	400 μS
x 0,1	4 mS
x 0,01	40 mS

If low level light with rapid variations is to be studied it may be necessary to exchange the standard detector for an extra sensitive or unfiltered detector in order to be able to use a range with a sufficient rise time.

During long-term recording it is recommended that the battery condition is regularly checked or that the external power supply is used.

**Battery**

The display has an indication "BAT" for low battery voltage. After the "BAT" sign is displayed, the photometer can still be used for approx. 20 hours before the battery has to be replaced (provided that the scale lighting is not used). Provided that an alkaline battery is used, the battery lifetime is approx. 110 hours.

**External power supply** (see fig. 1).

With each S3-instrument one plug "DIN 45323" with a connected 2 m cable is provided. This may be used for direct connection to any DC-source 9-12V.

When connecting the plug to the instrument, the instrument's own battery is automatically disconnected. The battery can therefore be kept in place while the instrument is operated from external power source, but the battery will not be charged.

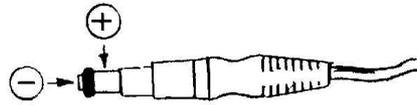
Caution:

Do not connect plug direct to mains!

Check polarity before connection!

Minus to centerpole (see sketch below)!

Wrong polarity makes the instrument's reading erratic, but does not cause permanent damage.



**The use of special detectors**

The absolute sensitivity of the standard detector is marked (embossed) on the rim as a figure  $S_N$  pA/Lx. Hagner special detectors are also marked with an absolute sensitivity  $S_{spec}$  A/unit. The unit can either be lux, cd/m<sup>2</sup>, W/m<sup>2</sup> or  $\mu$ W/cm<sup>2</sup> depending on which detector is used. A correction (multiplying) factor for the special detector can easily be calculated as

$$\frac{S_N}{S_{spec}}$$

Example 1:

Your standard external detector has an absolute sensitivity of 105 pA/lx. You want to measure the UV-B intensity on the skin in a solarium for psoriasis therapy. The UV-B detector is marked 50 nA/W/m<sup>2</sup> (= 50,000 pA/W/m<sup>2</sup>). With the UV-B detector you measure 602 x 1. The correct measured value is

$$\frac{105}{50,000} \times 602 = 1.26 \text{ W/m}^2 \text{ UV-B.}$$

Example 2:

The density of a photographic film is to be measured at a certain spot. A Hagner fiber optic (light guide) detector with absolute sensitivity 12 pA/cd/m<sup>2</sup> is used.

Luminance of viewing table is measured to

$$444 \times 10 = \frac{105}{12} \times 4440 = 38,850 \text{ cd/m}^2.$$

Luminance of film exposed is measured to

$$381 \times 0.1 = \frac{105}{12} \times 38.1 = 333.4 \text{ cd/m}^2.$$

The density of the film is then  $^{10}\log \frac{38,850}{333.4} = 2.07$

#### **Measurement under extreme temperature conditions**

The amplifier is well temperature compensated ( $\pm 0.05\%/^{\circ}\text{C}$ ). It is however wise to check the zero-setting by darkening the detector when measuring at extreme temperatures. The calibration is carried out at  $25^{\circ}\text{C}$ . The sensitivity is approx. 1 % higher at  $0^{\circ}\text{C}$  and 1 % lower at  $50^{\circ}\text{C}$ . At approx.  $-5^{\circ}\text{C}$  the digital display darkens, but recovers again at higher temperature.

#### **Maintenance and calibration**

The objective lens should occasionally be cleaned with a slightly dampened soft cloth or a soft brush.

The standard detectors cosine-correction disc should occasionally be cleaned with a slightly dampened cloth.

Please observe that the sensitivity is somewhat higher before the moisture has evaporized.

The filters and silicon diodes used are extremely longterm stable, wherefore recalibration should not be required more often than, say, every fifth year.

The instrument has no facilities for calibration from the outside. If there is doubt about the calibration, please return the instrument to agent or to B. Hagner AB for check or calibration.

#### **Battery**

The battery is replaced by opening the battery compartment below the eyepiece. Please note the battery's polarity indication.

### **Instrument data for Hagner Universal Photometer, model S3**

#### **Measurement functions:**

Measurement of luminance with a measurement angle of  $1^\circ$  (circular), 0.01 - 200,000  $\text{cd/m}^2$  in 5 ranges.  
Measurement of illuminance (illumination) with a cosine corrected detector 0.01 - 200,000 lux in five ranges.  
Measurement of angles and solid angles.  
Measurement of elevation angles.  
Measurement with special detectors (accessories).  
Output terminal for external instruments.

#### **Indicating instruments**

Moving coil instrument with linear scale.  
LCD display 3  $\frac{1}{2}$  digit.  
Pendulum for elevation angles.  
Reading:  
Moving coil instrument: external or through the view-finding optical system.  
Digital instrument: external.

#### **Standard detectors**

Two silicon diodes which have been filtered to close agreement with the spectral sensitivity of the human eye, standardized by CIE.

The illuminance detector is cosine corrected and has a sensitive surface of 10 mm diameter.  
The illuminance detector is connected to the Hagner photometer by means of a Suhner 11 SMS-50-1-10/111 plug.

#### **Ranges:**

x 0.01	0.01	-	20.00	$\text{cd/m}^2$	or lux
x 0.1	0.1	-	200.0	"	" "
x 1	1	-	2,000	"	" "
x 10	10	-	20,000	"	" "
x 100	100	-	200,000	"	" "

The lowest detectable value is 0.01  $\text{cd/m}^2$  or lux ( $\pm 1$  digit).

#### **Accuracy:**

Better than  $\pm 3\%$  for all common light sources and daylight.

#### **External instruments:**

The S3 photometer is fitted with an output terminal to allow connection to external instruments with minimum input resistance of 1 k $\Omega$ .

The direct signal obtained is 0 - 2V in steps of 1 mV per displayed unit.

Rapid fluctuations can be recorded with the following rise times:

	<u>Approx. rise time</u>
Range x 100	20 $\mu$ S
" x 10	40 $\mu$ S
" x 1	400 $\mu$ S
" x 0,1	4 mS
" x 0,01	40 mS

**Temperature range:**

- 5°C to + 50°C.

**Power source:**

9 volt standard battery, type PP3, alkaline. Lifetime approx. 110 hours.

Battery eliminator 9-12V (optional).

**Dimensions:**

270 x 130 x 70 mm.

**Weight:**

1,4 kgs.

2,0 kgs with case.

**Storage and transport:**

The instrument is supplied with a field carrying case which measures 320 x 280 x 110 mm.

**Tripod mounting:**

The instrument chassis is fitted with two camera threads (1/4 "). The external detector is also fitted with such a thread.

**Optional accessories:**

- special detectors
- reflection reference
- different adaptors

**Standard accessories:**

- plug with 2 m cable for analog output (Belling-Lee type L1465A)
- extra plug (Belling-Lee type L1465B)
- darkening cap for external detector
- eye piece cover
- pendulum
- external detector (standard SD2)

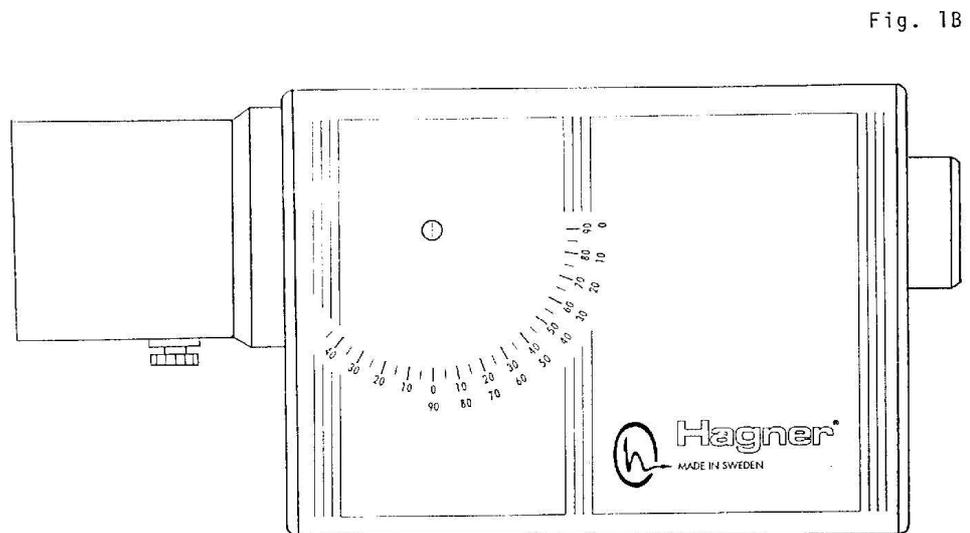
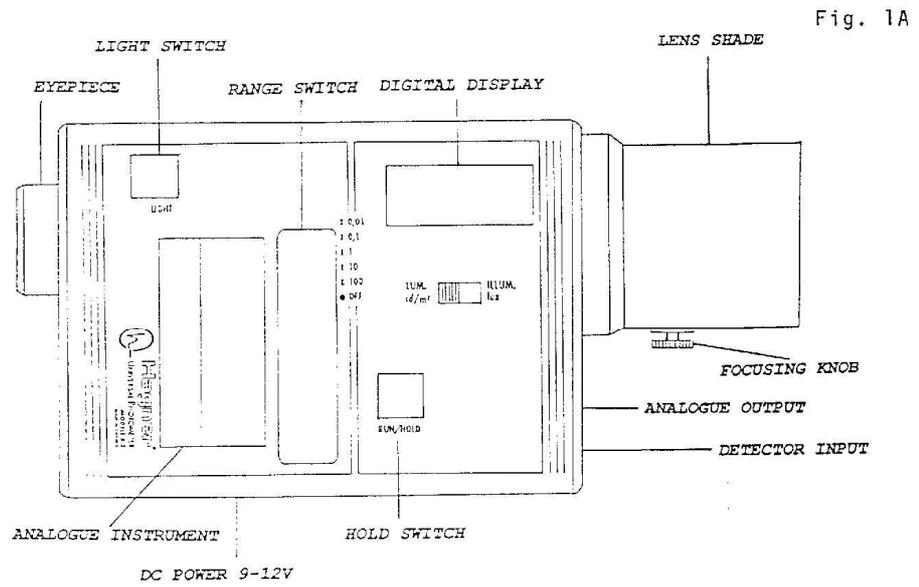


Fig. 2

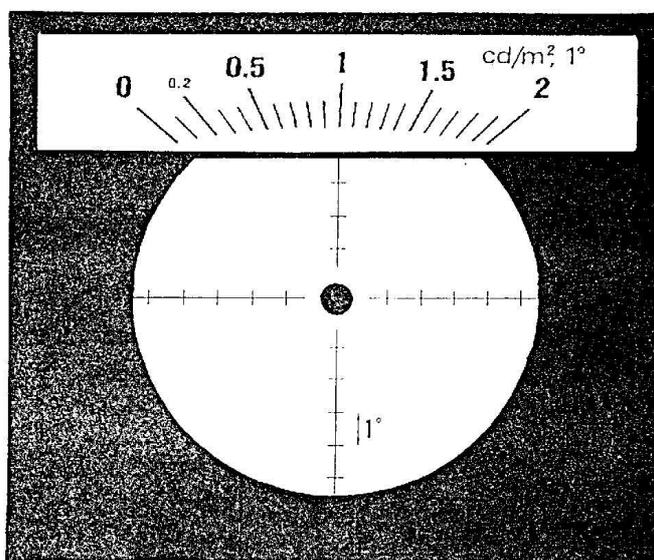
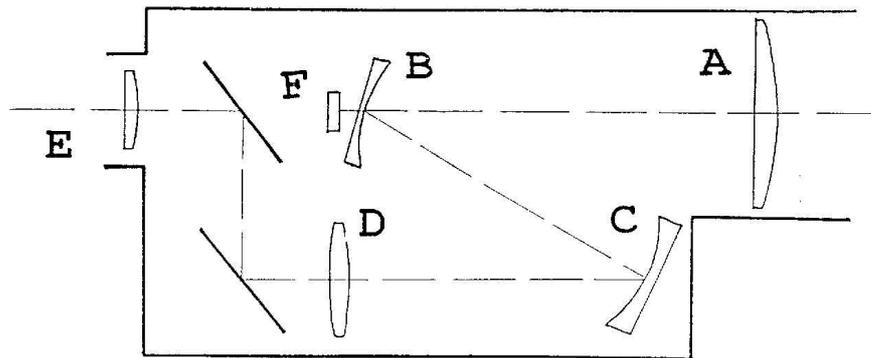


Fig. 3



A OBJECTIVE LENS

D FIELD LENS

B SPHERIC MIRROR

E EYEPIECE

C SPHERIC MIRROR

F FILTERED PHOTODIODE

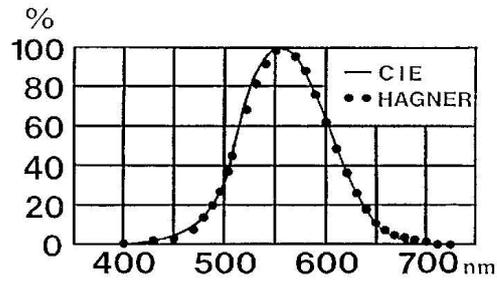


Fig. 4A

*The spectral sensitivity of the Hagner luxmeter closely relates to the visibility curve of the CIE standard observer.*

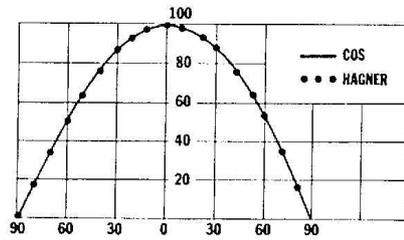


Fig. 4B

*The cosine correction compensates for measuring errors owing to oblique incident light.*

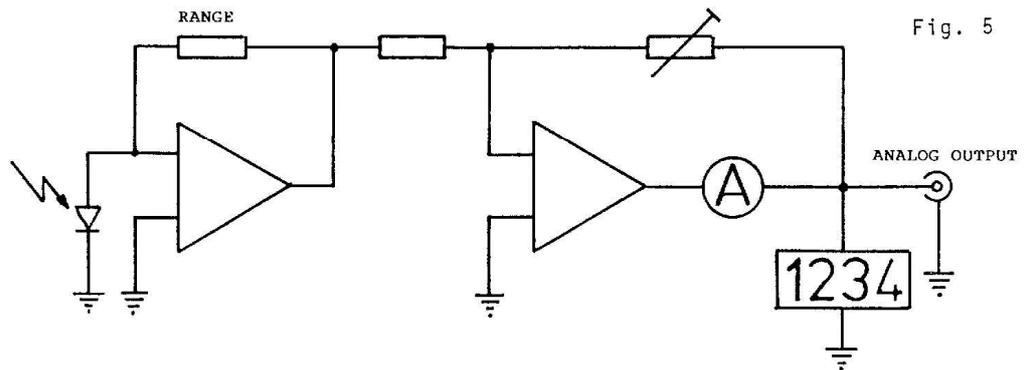


Fig. 5

Fig. 6



B. Hagner AB, Box 2256, SE-169 02 Solna, Sweden  
Phone: +46 8 83 61 50. Fax: +46 8 83 93 57  
E-mail: [hagner@hagner.se](mailto:hagner@hagner.se). Internet: [www.hagner.se](http://www.hagner.se)

## **APÉNDICE 5: PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN (1):**

**Energy Production and Management in the 21st Century, Vol. 1 511:** Strategies for the optimization of binomial energy saving landscape integration in road tunnels.

## **Strategies for the optimization of binomial energy saving landscape integration in road tunnels**

J. C. López<sup>1,2</sup>, A. L. Grindlay<sup>2</sup>, M. Carpio<sup>3</sup> & A. Peña-García<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*CEMOSA Engineering and Control, Spain*

<sup>2</sup>*Department of Urban and Regional Planning ETSICCP, University of Granada, Spain*

<sup>3</sup>*Department of Building Construction, University of Granada, Spain*

<sup>4</sup>*Department of Civil Engineering, ETSICCP, University of Granada, Spain*

### **Abstract**

The treatment of the zones above the entrance portal to road tunnels (plant cultivation, structures, etc.) is a topic of major interest due to the far-reaching implications from the perspectives of landscape integration, energy savings in the electric lighting and, definitively, its environmental sustainability. This work analyzes these perspectives with special attention to the optimization of the binomial “landscape integration-energy savings” and analyzes some proposals from an applied point of view; that is, considering direct action on real road tunnels. The huge energy consumption due to the electrical lighting of long road tunnels and its financial and environmental impact make this topic one of the priorities of tunneling and lighting technology. In fact, this impact does not concern only energy consumption, but also the consumption of electrical materials (the more lighting that is installed, the higher the consumption), the recyclability of these materials, etc. Although the treatment of the tunnel environment and the introduction of vegetation of the appropriate species can decrease such consumption, the integration of this species with the landscape is a very important topic frequently ignored. In this work, both aspects are optimized. *Keywords: energy savings, road tunnels, electrical lighting, tunnel forestation.*



## 1 Introduction

One of the critical aspects in the construction of road tunnels and their subsequent maintenance is the environmental and landscape integration. This importance concerns the landscape, but also the operation and functionality of the tunnel itself, for example in the matter of energy demands for the electrical lighting.

However, the landscape integration of vegetation (meadow and so on) is not an easy task. Specific rules cannot be given on how these transitions should be, nor how the environment should be resolved in what we might call the “frontier of the tunnel” (Estany i Serra and Esteyco [1]) given that it concerns a very particular design decision, but dependent on functional and structural necessities, on orography, the environment and the landscape, socio-environmental conditions, the construction process, the availability of space and traffic diversions, etc...

The zone above and around the so-called portal gate, is, perhaps, the most identifiable area of the tunnel, that which brings it visibility and identification. It is the area that can be appreciated from a wide perspective on approaching from the exterior and therefore that which lends itself to an aesthetic evaluation of its own configuration and as it is the transition element between the tunnel and the environment, in its final aim to integrate itself in some way with the landscape. Because of its elevated visibility, the satisfactory resolution of these frontier environs is the reflection of the integration not only of the structure itself but also, by extension, of the whole design of a route.

According to Estany i Serra and Esteyco [1] there is a basic rule that should be addressed in all cases: the integration of the tunnel mouth into the orography that contains it and into the landscape that frames it.

This concept of integration in itself is very wide and difficult to realise, it could be defined as the maximum effort to be made by professionals of different disciplines: geologists, biologists, engineers, landscape architects ... to minimize the effect of this new scar on the landscape. In this sense, the introduction of plant species is considered a highly relevant solution, given its impact both on the landscape and the energy consumption itself of the tunnels, as we shall see in this paper.

One of the problems in a road tunnel project is the lighting design. Although it is not a complicated task for night-time conditions, it becomes more complicated for daytime conditions [2, 3] because the time needed for visual adaptation from a daylight environment to the darkness of a tunnel is longer during daytime than in night-time conditions. In particular, the luminance in the first part of the threshold zone,  $L_{th}$ , is the part of the tunnel with the highest energy consumption [4].

For the design of a tunnel lighting installation, engineers need to know the highest value of the luminance ( $\text{cd/m}^2$  -candelas per square meter-). There are several approximation methods to estimate the luminance in the access to tunnels. In this work the so called  $L_{20}$  method has been used according to CIE Publ. 88 [4].



The  $L_{20}$  value is the luminance in the  $20^\circ$  conical field of view defined at a distance equal to the safety distance (SD) as defined in CIE Publ. 88 [4] from the tunnel entrance as shown in Figure 1. According to this CIE standard, the value of  $L_{20}$  is obtained from a sketch of the tunnel-entrance surroundings as:

$$L_{20} \approx \gamma L_S + \rho L_R + m L_M + b L_B \quad (1)$$

In equation (1)  $L_S$ ,  $L_R$ ,  $L_M$  and  $L_B$  are the average luminances of sky, road, surrounding meadow and surrounding buildings, respectively, whereas, as shown in Figure 1,  $\gamma$ ,  $\rho$ ,  $m$  and  $b$  are the respective percentages of sky, road surrounding meadow and buildings (concrete zones are included here) in the  $20^\circ$  cone. These coefficients obviously fulfil the relationship  $\gamma + \rho + m + b = 1$ .

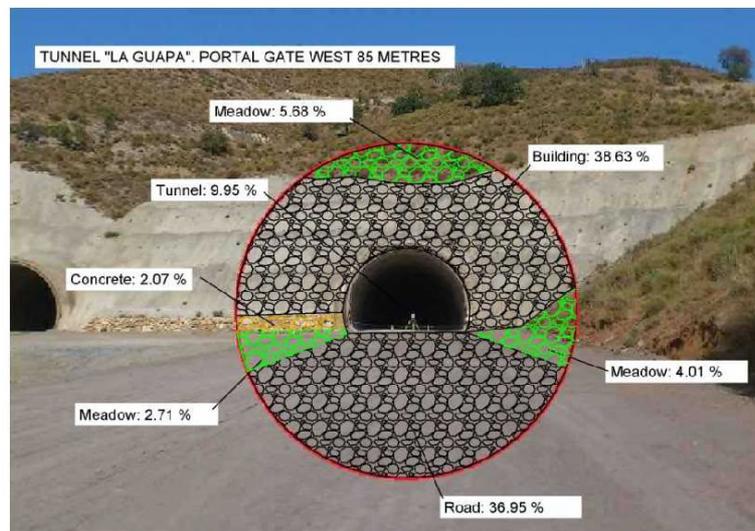


Figure 1: Road tunnel parallel to the Mediterranean coast in the southeast of Spain.

Thus, equation (1) gives the  $L_{20}$  value at the tunnel entrance. Given that the values of the relevant luminances strongly vary depending on the season of the year, the orientation of the tunnel, the atmospheric conditions and other circumstances, the standard CIE Publ. 88 [4] provides average values that help us to calculate the  $L_{20}$  according to equation (1).

A careful look at Table 1 shows that the more extensive the zone with meadow and vegetable species, the lower the contribution to  $L_{20}$ . For example, the cultivation of the built zone, would make the contribution from 8, 6 or 4  $\text{kcd/m}^2$  to only 2  $\text{kcd/m}^2$ .



In summary, according to the arguments above, minimizing the  $L_{20}$ , which also means a decrease in  $L_{th}$ , because they are proportional, the requirements for the electrical lighting of the tunnel will be lower, thus achieving remarkable energy savings. In this sense, many different philosophies have been studied in recent years such as tension structures [5], pergolas [6] and light-pipes [7]. These ways to save energy deal with the use of sunlight and thus decrease the weight of

Table 1: Contribution to  $L_{20}$  of the different sections of the  $20^\circ$  cone according to CIE Publ. 88 [4].

Driving direction (North Hem.)	$L_c$ (kcd/m <sup>2</sup> )	$L_r$ (kcd/m <sup>2</sup> )	$L_e$ (kcd/m <sup>2</sup> )			
			Concretes	Buildings	Snow	Meadow
N	8	8	3	8	15	2
E-W	12	4	2	6	10 (V) 15 (H)	2
S	16	5	1	4	5 (V) 15 (H)	2

electrical lighting. However, not very much has been done in order to decrease directly the requirements for the electrical lighting itself.

In this work, a strategy consisting of the cultivation of the portal gate of road tunnels is considered in order to decrease  $L_{20}$  according to the figures in Table 1.

## 2 Materials and methods

Four climbing species are considered for their possible integration into the areas surrounding the entrance portals/ways of the tunnels by its characteristics: *Hedera helix*, *Carpobrotus edulis*, *Jasminum nudiflorum* and *Macfadyena unguis-cati*.

Next follows a brief summary of the main characteristics of these species.

### 2.1 Common Ivy (*Hedera helix*)

Common Ivy, or *Hedera helix* is a botanical species of ivy native to the humid forests of West, Central and Southern Europe, North Africa and Asia from India to Japan. It is a relict plant and one of the few survivors in Europe of the laurel forest of the tertiary era. It is believed that its easy dispersion, affected by birds, helped it to colonize large areas from which it had disappeared during the glaciations.

#### 2.1.1 Characteristics and habitat

Amongst the main characteristics of this species and its habitat, we may include the following:

- Its leaves are evergreen, resistant and tough, of a coriaceous nature. The colour is bright green and between 5–10 cm in diameter. There are two types of leaf on the same plant, those of non-flowering branches with lobed leaves and those lacking lobes on the flowering branches.



- The flowers are small and green, the fruit is a pea-sized poisonous black berry.
- It is a climber, non-parasitic, fast-growing, reaching up to 50 metres in length, it can last longer than the tree over which it climbs.
- Temperatures between 10° and 20° C, although good cold resistance.
- Best suited to humid conditions.
- They grow more in shade, but once developed they need more direct sunlight.
- Thrive in fertilized, well-drained alkaline soils, tolerating various substrates, but the most suitable are those between ph 6 and 7.



Figure 2: *Hedera helix*.



516 Energy Production and Management in the 21st Century, Vol. 1

## 2.2 *Carpobrotus edulis*

*Carpobrotus edulis* is a species of plant from the Aizoaceae family. One of the reasons for its introduction was its use as a rectification method in public works to consolidate slopes and thus slow down erosion caused by run-off or desertification, however, today measures are taken to avoid affecting native flora.



Figure 3: *Carpobrotus edulis*.

### 2.2.1 Characteristics and habitat

Amongst the main characteristics of this species and its habitat, we may include the following:

- Trailing and succulent appearance; with a tendency to cover large areas
- Forming dense carpets, the stem length can reach up to 2 metres, only around 15cm from the ground.
- The leaves are evergreen, thick, bright green, sometimes purple at the extremities, and tapered with a waxy texture and a triangular cross-section,



- curved upwards, and the size of an index finger. In highly saline soils it can have a kind of saline crust that gives them a whitish surface.
- It is used as a ground cover or for covering very high walls, re-vegetating dry and steep slopes in coastal areas.
  - Reproduces easily, in any season, planting about 7 to 10 cuttings per square metre.
  - Tolerates edaphic characteristics very well which are unsuitable for other plants, such as salinity, so that it grows very well in poor, dry and inadequate soils. It is very drought resistant.
  - It needs a lot of light and full sun. The minimum temperature of resistance is from  $-6^{\circ}\text{C}$ .
  - It really does not need any special care as, where many other plants would not survive, it thrives.

### 2.3 *Jasminum nudiflorum*

*Jasminum nudiflorum* or Jasmine is a kind of shrub from the Oleaceae family. It originates from southeastern Tibet.



Figure 4: *Jasminum nudiflorum*.

#### 2.3.1 Characteristics and habitat

- It is a deciduous climbing plant with a quadrangular stem. It has pinnate and opposed dark green, trifoliate and elliptical leaves.
- The solitary flowers have six pale yellow petals growing from the axillas, appearing on leafless branches in winter on the previous year's branches. Due to its early flowering, it is advisable to combine it with other climbers that provide their touch of colour at other times of the year, such as roses, clematis or honeysuckle. However, the density and beautiful deep green hue of its branches ensures a beautiful effect for the rest of the year.
- It can tolerate full sun, but it grows very well in partial shade, especially in regions with very hot summers. It resists frost very well.
- Irrigation needs to be regular, not copious, once or twice a week depending on whether the specimen is cultivated in open ground or in a pot. Do not water on frosty days.



518 Energy Production and Management in the 21st Century, Vol. 1

- Main uses are for covering walls, trellises or fences.
- It grows in a wide variety of soils, preferably fertilized, well-drained humus-rich soils, which can be limey.
- It grows without difficulty from cuttings of semi hard wood with leaves, taken at the end of summer and rooted in the greenhouse. Should be pruned in spring after flowering.

#### 2.4 *Macfadyena unguis-cati*

*Macfadyena unguis-cati*, (Cat's Claw), is a type of flowering plant from the Bignoniaceae family. It is native to the dry tropical forest of Central and South America and the Caribbean, and is present throughout the world, except for Antarctica. It affects all layers of plants in forest ecosystems, for its rapid vertical and horizontal diffusion in contact with the herbaceous canopy.



Figure 5: *Macfadyena unguis-cati*.

##### 2.4.1 Characteristics and habitat

- It is a vigorous, woody plant with slender stems, being one of the few climbers that are truly adhesive, it clings to almost any surface using in addition to tendrils, small aerial roots on its branches. It has a high density of small, very bright semi-evergreen leaves. In protected, frost-free locations it persists, and where frosts usually occur, it is partially lost. Its green leaves are opposed, bi-foliate, ending in tendrils of 3 hooked branches. The leaves are 3 to 4 cm long. In spring or the beginning of summer it is covered in a blanket of yellow, trumpet-shaped flowers, although of short duration, which can grow singly or in groups of 2 or 3. They have a diameter of 4 to 5 cm. The fruits are smooth brown capsules. They are 20 to 40 cm in length by 1 to 1.5 cm diameter.



- Other important characteristics are as follows:
- Be wary of its invasive character. It is voracious and difficult to eradicate, growing very quickly from seeds and also from cuttings.
- Its use is ideal for covering high walls with its abundant flowering, although only lasting a few weeks.
- It needs a lot of light and exposure to full sun, being well adapted to dry, hot climates, its large and fleshy roots allow it to survive drought and withstand temperatures down to -8°C.
- The soil should be well drained and cool with some organic matter. Watering should be regular but with moderate amounts of water, avoiding irrigation in winter, fertilizing with manure in spring and towards the end of summer.
- Prune lightly towards the end of winter to strengthen the plant and encourage side shoots.

### 3 Impact on energy consumption in tunnels

Given that the object of this paper is the integration of one of the species into a tunnel environment in the southeast of Spain, close to the Mediterranean Sea, with the aim of reducing energy consumption for its illumination, we should focus on the characteristics of these species best adapted to this habitat.

In view of the four climbing species studied for the potential integration over the entrance portals of the tunnels, *Hedera helix*, *Carpobrotus edulis*, *Jasminum nudiflorum* and *Macfadyena unguis-cati*, at first appraisal *Hedera helix* or *Macfadyena unguis-cati* seem most promising, taking into account that the location of these will be in a coastal zone and Mediterranean climate.

*Macfadyena unguis-cati* has abundant flowering though its invasive character involves special maintenance. However, its resistance to drought and its growth in soil of characteristics related to the Mediterranean climate is what leads us to consider it.

With *Hedera helix*, we have in its favour the need for light, its rapid growth, evergreen leaves (fundamental in its implementation in public road works), resistant and hardy, its climbing nature will help to cover larger areas around and above the tunnel, thereby improving the lighting parameters relevant to the aim of this paper, requiring little maintenance. The need for excessive moisture, frustrates our initial choice, being an indispensable quality, our coastal Mediterranean climate may be too dry to sustain it. However, as the orientation of the tunnels in the whole of the Mediterranean area is East-West, West-East, planting it in the northern area could reduce the necessary water requirements in an early stage of its development, solar light being indispensable after this.

Beyond these hydrological and agricultural considerations, according to the requirements of the Introduction, the chosen species must be compatible with the integration into the landscape.

Therefore, *Hedera helix* seems a good choice, in our aim of reducing the energy consumption in the artificial illumination of the tunnels.



520 Energy Production and Management in the 21st Century, Vol. 1

#### 4 Conclusions

Several conclusions can be taken from the considerations in the paragraphs above:

1. One of the most relevant topics when considering landscape integration of road tunnels is the choice of vegetation to cover the zones surrounding the portal gate.
2. Very high luminance levels are required in the first part of road tunnels, also called the threshold zone. This requirement arises from the remarkable lapse of time needed for the human eye to become adapted from bright to darker environments.
3. The only way to decrease these huge consumptions consists of the use of sunlight as a complement to electrical lighting or, as dealt with in this work, decreasing the  $L_{20}$  at the portal gate of road tunnels.
4. An effective measure to decrease this  $L_{20}$  consists on the replacement of concrete or built surroundings of the portal gate by cultivated zones.
5. Among several candidates for the models tunnels in the south-east of Spain, very close to the Mediterranean Sea, the *Hedera helix* seems to be the most suitable candidate, due to its optimal adaptation to the climate and hydrological conditions of this zone.
6. Future research will be focused on determining the reflective coefficients of all these species and this research will be extended to other climates where other species could be more suitable.

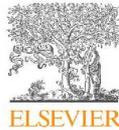
#### References

- [1] Estany i Serra, A., Esteyco, S.A.P., La frontera del túnel. *V Simposio de Túneles de Carretera: Seguridad para los túneles del siglo XXI*. Bilbao, 2010.
- [2] Adrian, W., Investigations on the required luminance in tunnel entrances, *Lighting Res. Technol.* 14, pp. 151–159, 1982.
- [3] Schreuder, D.A., Tunnel entrance lighting: a comparison of recommended practice. *Lighting Research Technology* 3, pp. 274–278, 1971.
- [4] Commission Internationale de l'Éclairage, CIE., *Guide for the lighting of road tunnels and underpasses*, CIE Publ. 88, Vienna, 2004.
- [5] Gil-Martín, L.M., Peña-García, A., Hernández-Montes, E., & Espín-Estrella, A., Tension structures: A way towards sustainable lighting in road tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, pp. 223–227, 2011.
- [6] Peña-García, A., Gil-Martín, L.M., Study of pergolas for energy savings in road tunnels. Comparison with tension structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, pp. 172–177, 2013.
- [7] Gil-Martín, L.M., Peña-García, A., Jiménez, A. & Hernández-Montes, E., Study of Light-pipes for the use of sunlight in road tunnels: from a scale model to real tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, pp. 82–87, 2014.



## **APÉNDICE 6: PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA INVESTIGACIÓN (2):**

**Tunnelling and Underground Space Technology:** Decrease of energy demands of lighting installations in road tunnels based in the forestation of portal surroundings with climbing plants.



Contents lists available at ScienceDirect

## Tunnelling and Underground Space Technology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/tust](http://www.elsevier.com/locate/tust)

## Decrease of energy demands of lighting installations in road tunnels based in the forestation of portal surroundings with climbing plants

A. Peña-García<sup>a,b,\*</sup>, J.C. López<sup>b,c</sup>, A.L. Grindlay<sup>d</sup><sup>a</sup>Department of Civil Engineering, University of Granada, 18071 Granada, Spain<sup>b</sup>Research Group "Lighting Technology for Safety and Sustainability", University of Granada, 18071 Granada, Spain<sup>c</sup>CEMOSA Ingeniería y Control, 29004 Málaga, Spain<sup>d</sup>Department of Urban and Regional Planning, University of Granada, 18071 Granada, Spain

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 4 September 2014

Received in revised form 28 October 2014

Accepted 30 November 2014

## Keywords:

Road tunnel  
Lighting  
Energy savings  
Sustainability  
Tunnel forestation

## ABSTRACT

The lighting installations demand the biggest part of the energy consumed in road tunnels. This demand is much higher during daytime, when the visual adaptation of the drivers coming from bright environments, requests very intense illumination levels, especially in the first part of the tunnel, the so called threshold zone. The lighting necessities in road tunnels depend on three main critical parameters: maximum speed allowed in the tunnel, tunnel orientation and the characteristics of the portal gate surroundings. In this work, actions on this last parameter have been evaluated: four different species of climbing plants have been tested as candidates to forest the surroundings of portal gates in an environment of Mediterranean climate. The lighting demands in the threshold zone arising from the choice of each species have been quantified by luminance measurement. As a result, the common ivy (*Hedera helix*) is proposed as the best candidate to fully forest the surroundings of portal gates optimizing the binomial energy consumption-landscape integration in a Mediterranean climate.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

It is well known that lighting installations demand most of the energy consumed in road tunnels. Paradoxically, the required lighting levels are much higher during daytime (Adrian, 1982; Schreuder, 1971; CIE Publ. 88, 2004). This is due to the slow visual adaptation to darkness of humans. When we develop our visual tasks in bright environments (photopic conditions of vision), the visual process is carried out by the retinal cells called cones. Cones allow a high visual acuity and color perception, but they are completely blind when the illumination levels decrease under a certain threshold. When the visual tasks are carried out in environments with low illumination levels, the visual process is carried out by other retinal cells called rods. Rods allow the detection of faint objects, but are unable to detect colors and cannot work under intense illumination levels. The problem arises when we suddenly go from bright environments to darker ones. Fig. 1 shows the time needed to achieve visual adaptation as a function of the lighting levels.

\* Corresponding author at: Department of Civil Engineering, University of Granada, 18071 Granada, Spain.

E-mail address: [pgarcia@ugres](mailto:pgarcia@ugres) (A. Peña-García).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2014.11.010>

0886-7798/© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

The analysis of this figure highlights the nature of the main problem in tunnel lighting: when the illumination levels quickly decrease, people are visually unadapted during several minutes. Even a not complete but relatively accurate visual adaptation to low illumination levels takes around 8 min, which is absolutely unacceptable in driving, where, vehicles travelling at 100 km/h, are running 28 m in one single second. It means that any single delay in visual reaction time can cause an accident.

Thus, the illumination levels in road tunnels during daytime (when drivers come from bright environments), must be high enough, especially during the first meters of the tunnel (Mashimo, 2002; CIE Publ. 88, 2004), to ensure a correct visual adaptation. The consequence in this first part of the tunnel, called "threshold zone" (starting in the portal gate and with a length between one and two times the safety distance, that is, 100–200 m) (Adrian, 1982; CIE Publ. 88, 2004) is a huge energy consumption of the lighting installations. Besides the use of the most accurate electrical light sources (Wencheng et al., 2008) and lighting distribution (Pachamanov and Pachamanova, 2008; Yang and Wang, 2010) or special systems to optimize the work of the lighting installation (Ceriotti et al., 2011), the reduction of this consumption, especially in the threshold zone, has become a matter of strong interest and the research has followed two directions.

There are two ways, compatible among them, to save energy in the lighting of road tunnels:

1. Use of sunlight to complement the electrical lighting, so that the luminaries must not work at 100% during all the daytime. There are two ways to use sunlight in the threshold zone of a road tunnel:
  - (a) Shifting the threshold zone out of the road tunnel by means of a semitransparent structure (Hernández-Montes et al., 2006; Gil-Martín et al., 2011; Peña-García et al., 2012) or a pergola (Peña-García and Gil-Martín, 2013). This philosophy requires the enlargement of the tunnel, but allows really remarkable savings in terms of electrical energy, light sources and luminaries with low investments and almost no maintenance in the case of pergolas. It is necessary to remark that shifting the threshold zone does not mean to enlarge the threshold zone (which would be counterproductive), but to displace it in such way that one part of the threshold zone is inside the tunnel and the other part is out of the tunnel, thus making possible to use sunlight by partial transmission through a semitransparent medium (tension structures) or total transmission between alternative opaque elements (pergolas). The use of the ESTS equation (Energy Saving under Tension Structures), also applicable to pergolas, allows us to evaluate the potential savings and even decide the best way to implement the structure before building it (Peña-García et al., 2012; Peña-García and Gil-Martín, 2013).
  - (b) Guide and distribution of sunlight by means of optical devices such as light-pipes (Gil-Martín et al., 2014). This way to use sunlight does not require to enlarge the tunnel, but directly introduces and distributes it inside the tunnel. The capitation system and the optimal distribution are currently matters of active research.
2. Decrease the lighting levels requests: according to the CIE recommendations (Onaygil et al., 2003; CIE Publ. 88, 2004), the lighting requirements in one road tunnel are determined by  $L_{20}$ . It is the luminance (luminous flux emitted per square meter and solid angle in one given direction, measured in candelas per square meter,  $\text{cd}/\text{m}^2$ ) of the surroundings of the portal gate within a cone of  $20^\circ$  measured from the safety distance (see Fig. 2) according to Eq. (1):

$$L_{20} \approx \gamma L_S + \rho L_R + e L_E \quad (1)$$

$L_S$ ,  $L_R$  and  $L_E$  in (1) are the average luminances of sky, road, and surroundings respectively, whereas  $\gamma$ ,  $\rho$ , and  $e$  are the respective

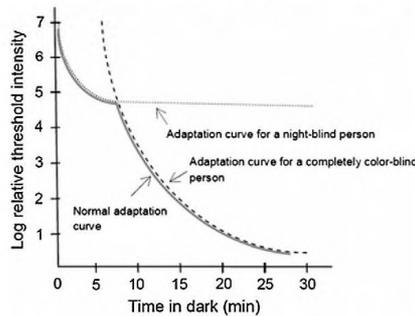


Fig. 1. Adaptation curve from bright to dark environments. From (Peña-García et al., 2012).

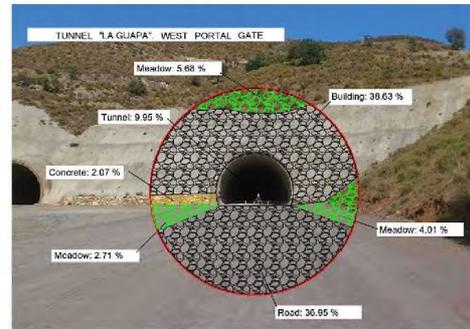


Fig. 2. Cone of  $20^\circ$  seen from the safety distance in a road tunnel in the Southeast of Spain.

percentages of sky, road and surroundings. Note that the surroundings can be very different according to the sunlight reflected (rocks, snow, meadow, buildings...). Thus, the contribution of surroundings to the tunnel lighting (Ye et al., 2012) are always considered according to their nature and have different contributions to the  $20^\circ$  cone as shown in Fig. 2.

The contribution of each zone within the  $20^\circ$  cone to  $L_{20}$ , is given in Table 1.

According to Table 1, the introduction of vegetation in the surroundings of the portal gate will remarkably decrease the lighting levels required in the road tunnel whatever its orientation. However, tunnels are generally forested with species that do not fully cover all the surroundings of the portal gate because the nature of the plants used (trees, bushes...) do not easily allow this total covering that would allow the proper consideration of  $2 \text{ kcd}/\text{m}^2$  (Table 1) for the illumination levels required for the road tunnel. In this work, climbing plants are considered in order to achieve a complete forestation of the surroundings.

$L_{20}$ , which takes account of the lighting conditions before going into the tunnel, is related to the luminance necessary in the first part of the threshold zone (that is, the first zone with electrical lighting),  $L_{th}$ , which is the most consuming zone of the tunnel by Eq. (2):

$$L_{th} = k L_{20} \quad (2)$$

where  $k$  is a constant depending on the maximum speed allowed in the tunnel. In a tunnel with maximum speed  $v_{\text{max}} = 120 \text{ km}/\text{h} \Rightarrow k = 0.10$ , whereas in one tunnel with  $v_{\text{max}} = 80 \text{ km}/\text{h} \Rightarrow k = 0.06$ .

The considerations above, together with a careful analysis of Table 1, highlight that an accurate design of the tunnels portal and surroundings is extremely important to decrease the  $L_{20}$  and, thus, achieve the lowest consumption from the lighting installation. Hence, the architectural and landscape aspects related to tunnel portals become very important as the awareness of environment protection by designers gives rise to elevated concerns of integrating an infrastructure with its surroundings (Peila and Pelizza, 2002).

On the other hand, the actuation on portal and surroundings to decrease  $L_{20}$  gives the designer two different possibilities: to mimic its surroundings or to be signified with prominent works. This difficult choice is summarized by Fei et al. (2012): landscaping tunnel portals is a comprehensive art, involving creativity, landscape architecture, architecture, local culture, bionomics, psychology, environment protection, optical techniques, safety techniques, and the application of new materials and new technical arts.

**Table 1**  
Contribution to  $L_{20}$  of the different sections of the 20° cone according to CIE Publ. 88 (2004).

Driving direction (N. Hem.)	$L_S$ (kcd/m <sup>2</sup> )	$L_R$ (kcd/m <sup>2</sup> )	$L_E$ (kcd/m <sup>2</sup> )			
			Rocks	Buildings	Snow	Meadow
N	8	3	3	8	15	2
E-W	12	4	2	6	10 (V) 15 (H)	2
S	16	5	1	4	5 (V) 15 (H)	2

The objective of this work is the quantitative determination of the lighting requirements (and hence energy savings) in a road tunnel whose surroundings have been totally forested with some candidates climbing plants satisfying the hydrological and climate requirements of the zone. The comparison of the lighting requirements arising from the potential forestation of tunnel surroundings with each of these plants will identify the one which requires the lowest energy consumption from the lighting installation. Besides this target, it is also important to highlight the advantages of identifying species with a contribution below 2 kcd/m<sup>2</sup> and consider lower contributions to the  $L_{20}$  in each zone of the world.

## 2. Materials and methods

Four species of climbing plants: honeysuckle (*Lonicera caprifolium*), cat's claw (*Macfadyena unguis-cati*), jasmine (*Jasminum nudiflora*) and common ivy (*Hedera helix*) (Roskov et al., 2014) have been planted together in a wall located in the open air parking of the Faculty of Civil Engineering of the University of Granada (South of Spain) as shown in Fig. 3.

Although they are climbing plants, they have been planted falling from the upper part of the wall to avoid reflections on the guiding wires when they are not very dense. The target of planting all of them together was to be able to measure the luminance under the same circumstances, which allows an objective comparison.

In order to determine the most accurate climbing plant, it is necessary to evaluate their capability to reflect sunlight. Hence, the one with lowest luminance (that is, the luminous flux per unit of surface and solid angle reflected from the sunlight) in the most critical conditions for visual adaptation, will be the most accurate to forest the surroundings of the portal gate of road tunnels as long as its characteristics makes it possible. It means that the chosen plants can not be just dark ones, but must be well adapted to the region where the tunnel is located.



**Fig. 3.** Climbing species planted together to determine their contribution to  $L_{20}$ . From left to right: honeysuckle (*Lonicera caprifolium*), cat's claw (*Macfadyena unguis-cati*), jasmine (*Jasminum nudiflora*) and common ivy (*Hedera helix*).

The criterion for the specific evaluation of these four species (honeysuckle, cat's claw, jasmine and common ivy) was a previous optimization including landscape integration, geographic, climatic and hydrological conditions (López et al., 2014).

The configuration of the plantation easily allows to simulate a real portal gate (Fig. 4) so that the luminance of the surroundings can be evaluated in the same way that in a real tunnel.

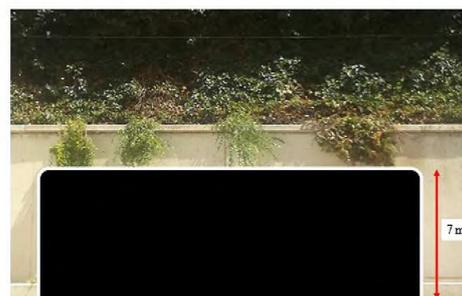
The luminances have been measured with a Hagner Universal Photometer S3 in luminance meter mode. Given that luminance is a directional quantity, the direction of measurement must be carefully controlled when measuring. For this reason, the luminance meter incorporates a telescope to look to the object whose luminance must be measured. Once the object is focused, the observer sees a black point, which covers the field whose luminance is going to be measured.

It is necessary to remark that the luminance meter allows the measurement of quite small angular fields. In fact, the measurement field is remarkably smaller than the plant. It allows to perform the measures without waiting for the plants to grow so much as they would need to grow in the definitive tunnel.

The results obtained after the measurements in this configuration of simulated tunnel are presented and analyzed in the following section.

## 3. Results

The luminance of each climbing plant has been measured in sunny days (the most unfavorable condition for energy consumption in road tunnels) between June 1st and July 31st 2014. The period chosen for the measurement campaign is the one with the highest insolation, because the higher the bright of the environment, the higher the lighting necessities for visual adaptation when entering road tunnels and, hence, the energy consumption.



**Fig. 4.** The parallel plantation of the four species allows the simulation of the portal gate of a road tunnel and the accurate comparison of the luminance from each species.

**Table 2**

Average luminances from the four climbing species measured at 12:00 and 14:00 during a two months period in Granada (South of Spain). The energy savings are referred to 14:00.

Climbing plant	L (cd/m <sup>2</sup> )		Luminance decrease respect to CIE 88:2004 (%)
	12:00	14:00	
Honeysuckle	832	1652	17.4
Cat's claw	1623	1867	6.7
Jasmine	1977	2996	-49.8
Common ivy	417	1038	47.6

In addition, the luminances have been measured in the most unfavorable times of the day. Two measurements were performed everyday: one at 12:00 and another one at 14:00. The relevant averages for each hour of the day are presented in separate columns for each climbing plant in Table 2.

The average illuminance (luminous flux received per unit of surface, measured in lux) measured on the ground at the most critical hour (14:00) was 106,000 lux, which, in spite of its high value, is common in the South of Spain and can be even higher in other countries nearer from the equator. This hour is the most critical because it corresponds to the highest position of the sun where the climbing species have been planted (37.18°N, 3.61°W). For this reason, the energy savings are referred to this hour.

A first analysis of Table 2 shows that common ivy (*H. helix*) is the most accurate climbing plant to reduce the contribution to  $L_{20}$  and, hence, the requirements of the lighting installation in terms of energy consumption. However, we will go further analyzing the consequences of fully foresting the surroundings of one real tunnel with common ivy in the following example.

### 3.1. Application: full forestation of a real tunnel with common ivy

Let us consider a road tunnel like the one in Fig. 2, ("La Guapa" Tunnel, currently under construction in the coast of Granada, South of Spain), where the surroundings of the tunnel occupy the 53.1% of the 20° cone.

The lighting necessities of the threshold zone will be calculated in three different situations: surroundings with no modification with respect to the project of the road tunnel; surroundings fully planted with vegetation as considered by the international recommendations of Table 1 and surroundings planted with common ivy and their contribution to  $L_{20}$  and  $L_{th}$  found in this work.

Values of luminance can be converted into luminous flux values (amount of luminous power obtained by electrical consumption) by means of the following relationship (Parise et al., 2007):

$$E = \frac{L\pi}{\rho B\mu} \quad (3)$$

where  $F$  is the illuminance,  $L$  the luminance,  $\rho$  the reflectance of the road surface,  $B$  the utilization factor and  $\mu$  the maintenance factor. For the tunnel considered in this work, values of  $\rho = 0.25$ ,  $B = \mu = 0.8$  have been adopted as a realistic approach.

From (3), given that the illuminance is defined as the luminous flux ( $\phi$ ) received per unit of surface, in a road tunnel with width  $w$  and length of the first half of the threshold zone  $l$ , will be given by (4):

$$\phi = \frac{L\pi lw}{\rho B\mu} \quad (4)$$

The results for the example tunnel, which has maximum speed 80 km/h, first part of threshold zone with length  $l = 50$  m and width  $w = 10$  m are shown in Table 3.

In addition, it is possible to make a good approach to the number of luminaries needed just to highlight the advantages of fully

**Table 3**

Comparison of lighting parameters and savings in three different situations for the example tunnel: current project, forestation as recommended by CIE and proposed fully forestation with climbing plants.

	$L_{20}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$L_{th}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (lumen)	Savings (%)
No modification	4180	251	2,462,938	-
Standard meadow (CIE 88:2004)	2540	152	1,491,500	39.4
Common ivy ( <i>Hedera helix</i> )	2030	122	1,197,125	51.4

**Table 4**

number of luminaries needed in the first half of the threshold zone of a road tunnel with maximum speed of 80 km/h as a function of the surroundings.

	Number of luminaries (first part of threshold zone)
No modification	62
Standard meadow (CIE 88:2004)	38
Common ivy ( <i>Hedera helix</i> )	30

foresting the portal gate surroundings with climbing plants with low luminance. A typical High Pressure Sodium lamp for tunnel lighting can have a luminous flux of 40,000 lm. Hence, we can calculate the number of luminaries dividing the fourth column of Table 3 by 40,000 as shown in Table 4.

The results in Tables 3 and 4 show the interest and remarkable savings fully foresting the surroundings of road tunnels with this kind of plants. These savings do not affect only energy consumption, but also luminaries, with the subsequent economical and environmental advantages.

Given that the surroundings denominated as meadow or vegetation are considered to contribute to the  $L_{20}$  with 2 kcd/m<sup>2</sup> whatever the tunnel orientation (see Table 1), the results obtained strongly suggest that the values in this table could be decreased for certain plants as long as their requests (climatic, hydrological, landscape integration...) allow it. In this case, the forestation with these species is feasible due to the characteristics of the tunnel portal as well as the climatic and hydrological conditions of the zone.

## 4. Conclusions

Several conclusions can be deduced from the results above:

1. A comparison in terms of luminance reflected from the sun by four climbing plants in a situation simulating the surroundings of the portal gate of a road tunnel has been carried out in order to determine which species is most accurate to decrease the requests of the tunnel in terms of electrical lighting.
2. The common ivy (*H. helix*) has the lowest luminance. The contribution to the  $L_{20}$  luminance of this species is the middle of the one considered by the CIE document (CIE Publ. 88, 2004). It means that the forestation of the surroundings of road tunnels with this species, as long as it is permitted by the climatic and hydrological conditions of the zone where the tunnel is built, would reduce the luminic requirements to just 50% of the most optimistic.
3. The most accurate species for each tunnel depend on its location, hydrological conditions of the zone, landscape integration and other factors. Hence, the choice of forestation cannot depend only on lighting criteria.
4. The choice of climbing plants allows full and dense forestation as opposite to the current situations in many tunnels were the mountain reflections affect  $L_{20}$ .

5. The methodology followed to determine the best species in the South of Spain (Mediterranean climate) can be easily repeated for other areas or the world or even for other micro climates, thus contributing to a global saving in the electrical consumption of road tunnels.
6. The results obtained could lead to a new consideration of the luminance tables in the different regulations or design guidelines. Given the wide range of luminances even in plants together at the same hour, it could be reasonable to spread the set denominated "meadow" in more elements with different contributions to  $L_{20}$ .
7. The decrease of energy consumption in road tunnels completely forested does not only save energy: given that the introduction of species like common ivy lead to lower  $L_{20}$  requests, the lighting levels in the threshold zone are now lower. It could be a good opportunity to introduce LED lighting in this zone of the tunnel where the main lighting is still performed with more consuming technologies that, in addition, do not allow more than two or three levels of intensity.
8. In summary, more research with other species in other micro-climates is needed in order to determine the most suitable plants for full forestation of portal gates and thus, reconsider the contribution of vegetation to  $L_{20}$  and energy consumption in road tunnels.

#### Acknowledgements

The plantation of the climbing species has been supported by the Energy and Installations Office of the University of Granada. We thank Mr. Alfonso Guerrero and Mr. Juan Dugo, from the gardening service for their outstanding implication in the plantation.

#### References

- Adrian, W., 1982. Investigations on the required luminance in tunnel entrances. *Light. Res. Technol.* 14, 151–159.
- Cerioti, M., Corrà, M., D'Orazio, L., Doriguizzi, R., Fachin, D., Guna, S., Jesi, G., Lo Cigno, R., Mottola, L., Murphy, A.L., Pescalli, M., Picco, G.P., Pregolato, D., Torghelle, C., 2011. Is there light at the ends of the tunnel? wireless sensor networks for adaptive lighting in road tunnels. In: Proceedings of the 10th International Conference on Information Processing in Sensor Network (IPSN), pp. 187–198.
- Commission Internationale de l'Éclairage, CIE, 2004. Guide for the lighting of road tunnels and underpasses, CIE Publ. 88, Vienna.
- Fei, Y., Chuan, H., Shi-min, W., Jin-long, Z., 2012. Landscape design of mountain highway tunnel portals in China. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 29, 52–68.
- Gil-Martín, L.M., Peña-García, A., Hernández-Montes, E., Espín-Estrella, A., 2011. Tension structures: a way towards sustainable lighting in road tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 26, 223–227.
- Gil-Martín, L.M., Peña-García, A., Jiménez, A., Hernández-Montes, E., 2014. Study of Light-pipes for the use of sunlight in road tunnels: from a scale model to real tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 41, 82–87.
- Hernández-Montes, E., Jurado-Piña, R., Bayo, E., 2006. Topological mapping for tension structures. *J. Struct. Eng. ASCE* 132, 970–977.
- López, J.C., Grindlay, A.L., Carpio, M.C., Peña-García, A., 2014. Strategies for the optimization of binomial energy saving landscape integration in road tunnels. *WIT Trans. Ecol. Environ.* 190, 511–520.
- Mashimo, H., 2002. State of the road tunnel safety technology in Japan. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 17, 145–152.
- Onaygil, S., Güler, Ö., Erkin, E., 2003. Determination of the effects of structural properties on tunnel lighting with examples from Turkey. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 18, 85–91.
- Pachamanov, A., Pachamanova, D., 2008. Optimization of the light distribution of luminaries for tunnel and street lighting. *Eng. Opt.* 40, 47–65.
- Parise, G., Maritano, L., Pierdomenico, S., 2007. An adaptive criterion to design the lighting system in the road tunnels. In: 42nd IEEE-IAS Annual Meeting, pp. 1244–1248.
- Peña, D., Pelizza, S., 2002. Criteria for technical and environmental design of tunnel portals. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 17, 335–340.
- Peña-García, A., Escribano, R., Gil-Martín, L.M., Espín-Estrella, A., 2012. Computational optimization of semi-transparent tension structures for the use of solar light in road tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 32, 127–131.
- Peña-García, A., Gil-Martín, L.M., 2013. Study of pergolas for energy savings in road tunnels. Comparison with tension structures. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 35, 172–177.
- Roskov, Y., Kunze, T., Orrell, T., Abucay, L., Paginawan, L., Culham, A., Bailly, N., Kirk, P., Bourgoin, T., Baillargeon, G., Decock, W., De Wever, A., Didžiulis, V. (Eds.), 2014. Species 2000 & ITIS Catalogue of Life, 2014 Annual Checklist. Species 2000: Naturalis, Leiden, The Netherlands <[www.catalogueoflife.org/annual-checklist/2014](http://www.catalogueoflife.org/annual-checklist/2014)>.
- Schreuder, D.A., 1971. Tunnel entrance lighting: a comparison of recommended practice. *Light. Res. Technol.* 3, 274–278.
- Wencheng, C., Zheng, H., Liping, G., Yandan, L., Dahua, C., 2008. Performance of induction lamps and HPS lamps in road tunnel lighting. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 23, 139–144.
- Yang, C., Wang, Z., 2010. Simulation experiments on counter beam lighting in highway tunnel. *J. Chongqing Univ. Eng. Ed.* 9, 139–145.
- Ye, F., He, C., Wang, S., Zhang, J., 2012. Landscape design of mountain highway tunnel portals in China. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 29, 52–68.