

2ª Edición

LIBRO BLANCO FOTOCATÁLISIS

de la

Hacia la habitabilidad sostenible

Coordinador: David Almazán Cruzado





A Raquel y Santiago.

Este libro, editado por la [Asociación Ibérica de la Fotocatálisis](#), entidad sin ánimo de lucro, es de **distribución gratuita**. Queda prohibida la reproducción de todo o parte de sus contenidos con propósito comercial. Los usos de reproducción no comercial deberán en todo caso contar con autorización de la Asociación, citar a la obra conjunta ([Libro Blanco de la Fotocatálisis](#)), su editor (Asociación Ibérica de la Fotocatálisis) y al autor o autores específicos de los fragmentos citados.

Diseño y Maquetación: [Andrea Cuervo Carrión](#)

ISBN: 978-84-09-64076-8
DEPÓSITO LEGAL: M-21220-2024
Segunda Edición, Septiembre 2024





2ª Edición

LIBRO BLANCO DE LA FOTOCATÁLISIS



ÍNDICE

AUTORES	1
SOCIOS DE AIF	5
PRÓLOGO	9
INTRODUCCIÓN	15
1. BREVE HISTORIA DE LA FOTOCATÁLISIS	19
1.1 INTRODUCCIÓN	19
1.2 HISTORIA DE LA FOTOQUÍMICA Y LA FOTOCATÁLISIS	21
2. LA ASOCIACIÓN IBÉRICA DE LA FOTOCATÁLISIS: MISIÓN Y OBJETIVOS	24
2.1 ÁMBITO DE APLICACIÓN Y OBJETIVOS DE AIF	25
2.2 VENTAJAS DE PERTENECER A AIF ACTIVIDADES QUE SE ORGANIZAN	26
2.3 LA PLATAFORMA TECNOLÓGICA DE FOTOCATÁLISIS	27
3. PANORAMA DE LA CONTAMINACIÓN	28
3.1 INTRODUCCIÓN	28
3.2 CONTAMINACIÓN EXTERIOR	29
3.3 CONTAMINACIÓN INTERIOR	32
3.3.1 PANORÁMICA GENERAL	32
3.3.2 INTRODUCCIÓN A LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR	33
4. LA FOTOCATÁLISIS Y SUS APLICACIONES	35
4.1 QUÉ ES LA FOTOCATÁLISIS: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	35
4.2 APLICACIONES GENERALES	37
4.3 APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN	38
4.3.1 PAVIMENTOS	42
4.3.1.1 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS PERCOLADOS	43
4.3.1.2 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES FOTOCATALÍTICOS A PARTIR DE EMULSIONES	44
4.3.1.3 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS A PARTIR DE PINTURAS	46
4.3.1.4 PAVIMENTOS DE BALDOSAS O ADOQUINES HIDRÁULICOS FOTOCATALÍTICOS PREFABRICADOS	47
4.3.1.5 PAVIMENTOS CERÁMICOS FOTOCATALÍTICOS PREFABRICADOS	48
4.3.2 TÚNELES	48
4.3.3 ENVOLVENTES DE EDIFICACIÓN	49
4.3.3.1 REVESTIMIENTO DE FACHADAS CON CERÁMICAS FOTOCATALÍTICAS	49
4.3.3.2 PANELES Y MORTEROS BASE CEMENTO FOTOCATALÍTICOS	49

4.3.3.3 CUBIERTAS IMPERMEABILIZANTES FOTOCATALÍTICAS	50
4.3.3.4 REVESTIMIENTOS CON PANELES DE ACERO VITRIFICADO FOTOCATALÍTICO	50
4.3.3.5 PINTURAS MINERALES CON BASE SILICATO FOTOCATALÍTICAS	51
4.3.3.6 PINTURAS MINERALES CON BASE CAL FOTOCATALÍTICAS	52
4.3.4 OTRAS APLICACIONES	53
4.3.5 CONCEPTO DE ISLA FOTOCATALÍTICA	53
4.4 APLICACIONES EN LA DEPURACIÓN DE AGUAS	55
4.4.1 LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA	55
4.4.2 CONTAMINANTES QUE SE PUEDEN ELIMINAR POR FOTOCATÁLISIS	57
4.4.3 FOTOCATALIZADOR EN POLVO	60
4.4.4 FOTOCATALIZADOR SOPORTADO	62
4.4.5 CASOS DE ÉXITO EN ESCALA REAL	63
4.4.6 PROCESOS RELACIONADOS CON LA FOTOCATÁLISIS	65
4.5 APLICACIONES EN ESPACIOS INTERIORES	66
4.5.1 INTRODUCCIÓN	66
4.5.1.1 PINTURAS PARA MEJORA DEL AIRE INTERIOR	67
4.5.2 ANTECEDENTES	67
4.5.3 IMPLEMENTACIÓN DE FOTOCATÁLISIS EN AMBIENTES INTERIORES	68
4.5.4 CASOS DE ESTUDIO Y EVIDENCIA CIENTÍFICA	70
4.5.5 DESAFÍOS Y LIMITACIONES. FUTURO DE LA FOTOCATÁLISIS EN INTERIORES	71
4.5.6 CONCLUSIONES	73
4.5.7 FUTURO DE LA FOTOCATÁLISIS EN INTERIORES	74
4.6 APLICACIONES FOTOCATALÍTICAS EN SANIDAD	75
4.6.1 LA FOTOCATÁLISIS FRENTE A HONGOS, BACTERIAS Y VIRUS	75
4.6.2 CASO DE ÉXITO: LA FOTOCATÁLISIS FRENTE AL VIRUS SARS-COV-2	77
5. LEGISLACIÓN SOBRE CALIDAD DEL AIRE	80
5.1 LEGISLACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE EXTERIOR	80
5.2 LEGISLACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE INTERIOR	84
6. LEGISLACIÓN RELATIVA A LA CALIDAD DEL AGUA	86
6.1 LEGISLACIÓN RELATIVA A LA CALIDAD DEL AGUA	86
7. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA	89
7.1 NORMATIVA DE ENSAYOS DE LABORATORIO	89
7.2 NORMATIVA DE ENSAYOS “IN SITU”	93
7.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN A ESCALA REAL	95
7.3.1 ESTACIONES DE CALIDAD DEL AIRE FIJAS (OFICIALES)	95
7.3.2 ESTACIONES DE CALIDAD DEL AIRE MÓVILES	96

7.3.3 CAPTADORES PASIVOS	96
7.3.4 SENSORES DE BAJO COSTE	97
7.3.5 CONCLUSIONES	97
7.4 MODELOS DE PREDICCIÓN	98
7.5 CERTIFICADO DE EFICIENCIA DE MATERIAL FOTOCATALÍTICO	98
8. CASOS DE ESTUDIO	99
8.1 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS	99
8.1.1 PROYECTO VILLAVERDE (MADRID)	99
8.1.2 PROYECTO LIGHT2CAT (VALENCIA)	100
8.1.3 PROYECTO LIFE EQUINOX (MADRID)	102
8.1.4 PROYECTO LIFE MINOX STREET. ALCOBENDAS (MADRID)	104
8.1.5 PROYECTO LIFE PHOTOSCALING (MADRID)	110
8.1.6 PAVIMENTOS DESCONTAMINANTES: EXPERIENCIAS NACIONALES	116
8.1.6.1 EXPERIENCIAS EN ZONA URBANA (BARCELONA)	116
8.1.6.2 EXPERIENCIAS EN AUTOPISTA C-31 (BARCELONA)	119
8.1.7 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS: EXPERIENCIAS INTERNACIONALES	125
8.1.7.1 AEROPUERTO DE MALPENSA (MILÁN)	125
8.1.7.2 APARCAMIENTO EN ROSKILDE (DINAMARCA)	128
8.1.7.3 AEROPUERTO DE COPENHAGUE (DINAMARCA)	129
8.2 OTROS ACTIVOS DEL TRANSPORTE FOTOCATALÍTICOS	131
8.2.1 CUNETAS, ELEMENTOS DE CONTENCIÓN Y PAVIMENTOS EN AUTOVÍA DE LOS LLANOS (ALBACETE)	131
8.2.2 ELEMENTOS DE CONTENCIÓN EN CARRETERA BI-637 (VIZCAYA)	134
8.2.3 TÚNELES FOTOCATALÍTICOS (MADRID)	138
8.2.4 TELAS DESCONTAMINANTES (VALENCIA)	140
8.3 ENVOLVENTES DE EDIFICACIÓN	142
8.3.1 CUBIERTAS FOTOCATALÍTICAS (MADRID)	142
8.3.2 REVESTIMIENTOS CERÁMICOS FOTOCATALÍTICOS PARA FACHADAS (VALENCIA)	143
8.3.3 PINTURAS PARA FACHADAS EN ALCOBENDAS (MADRID)	145
8.3.4 PINTURAS AUTOLIMPIANTES EN DARMSTADT (ALEMANIA)	148
8.4 INTERIORES FOTOCATALÍTICOS	149
8.4.1 OFICINAS (REINO UNIDO)	149
8.4.2 AULAS UNIVERSITARIAS (MADRID)	150
8.4.3 SANIDAD	152
8.4.3.1 FRENTE AL VIRUS SARS-COV-2. COVID-19 (MADRID)	152
8.4.3.2 FRENTE AL HUMO DEL TABACO (GALICIA)	152

8.4.3.3 FRENTE A CONTAMINACIÓN MICROBIANA (MADRID)	154
8.5 INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS FOTOCATALÍTICAS	159
9. CRITERIOS DE DISEÑO Y APLICACIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS	162
9.1 DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES. EMISIÓN E INMISIÓN	162
9.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DINÁMICA DE DISPERSIÓN	163
9.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS EMISIONES	163
9.2.2 CONDICIONES ATMOSFÉRICAS	164
9.2.3 CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS Y GEOGRÁFICAS	165
9.3 DURABILIDAD DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS	167
9.3.1 LIMPIEZA DE PAVIMENTOS E IMPACTOS SOBRE E.D.A.R	167
9.3.2 INFLUENCIA DE LA HUMEDAD RELATIVA	169
9.3.3 ABRASIÓN SUPERFICIAL (SOLO PARA PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS)	169
9.3.4 LUZ	169
9.3.5 COLOR	170
9.3.6 HERRAMIENTAS DE AYUDA A LA SELECCIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS	171
9.4 GUÍA DE USO DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS – FOTOAIR	172
10. AVANCES EN FOTOCATÁLISIS EN ESPAÑA DURANTE EL SIGLO XXI	179
10.1 CERTIFICADO DE EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA	180
10.2 ISLA FOTOCATALÍTICA	183
10.3 INCLUSIÓN EN PLIEGOS DE ADMINISTRACIONES PÚBLICAS	184
10.4 GRUPO DE TRABAJO CON MINISTERIO DE TRANSPORTES	186
10.5 APOYO INSTITUCIONAL	187
10.6 COLABORACIONES PÚBLICO-PRIVADAS	188
10.7 TRANSFERENCIA DEL CONOCIMIENTO	189
10.8 GUÍA DE APLICACIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS EN ACTIVOS DEL TRANSPORTE	190
11. PREGUNTAS FRECUENTES (FAQ)	191
11.1 ¿CÓMO INFLUYE LA FOTOCATÁLISIS EN LA RESISTENCIA MECÁNICA DE PAVIMENTOS?	191
11.2 ¿CÓMO INFLUYE LA FOTOCATÁLISIS EN LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO DE PAVIMENTOS?	191
11.3 ¿CUÁL SERÍA LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE ESTOS TRATAMIENTOS COMO ALTERNATIVA A LOS PAVIMENTOS EXISTENTES?	194
11.4 ¿CUÁL ES LA EFICACIA DESCONTAMINANTE DE LOS PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS?	195
11.5 INFLUENCIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS	196
11.6 POTENCIAL AUTOLIMPIANTE DE PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS	196
11.7 DURACIÓN DE LA ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA	197
11.8 CONDICIONES DE MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS	197
11.9 ¿EN QUÉ RANGO DE LONGITUDES DE ONDA SE OBTIENEN LAS MEJORES EFICIENCIAS?	197

11.10 ¿SE PODRÍAN EMPLEAR REVESTIMIENTOS FOTOCATALÍTICOS EN TÚNELES?	198
11.11 INFLUENCIA DE CONDICIONES METEOROLÓGICAS, HUMEDAD, VIENTO, LUZ, ETC	198
11.12 INFLUENCIA DEL COLOR EN LA EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA	199
11.13 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA DE MEDIDA AL FOCO CONTAMINANTE	199
11.14 GENERACIÓN DE EFECTOS ADVERSOS A LA SALUD HUMANA	200
11.15 AFECCIONES DE LOS LIXIVIADOS A LAS ESTACIONES E.D.A.R	202
11.16 DIFERENCIAS DE RESULTADOS ENTRE LABORATORIOS	203
11.17 ¿EN QUÉ MATERIA SE TRANSFORMAN LOS NO _x , SO _x Y COV, TRAS LA FOTOCATÁLISIS Y CÓMO SE EVACUAN?	204
11.18 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS	205
11.19 ¿SE GENERA O ₃ O PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN CON LA FOTOCATÁLISIS?	205
11.20 ¿CUÁNTO CUESTAN LOS MATERIALES FOTOCATALÍTICOS?	205
11.21 ¿DÓNDE SE PUEDEN COMPRAR ESTOS PRODUCTOS?	206
12. SEGURIDAD Y SALUD	207
12.1 FICHAS DE SEGURIDAD DE CADA PRODUCTO	207
12.2 SEGURIDAD Y SALUD DURANTE LA FABRICACIÓN Y LA APLICACIÓN	207
12.3 IMPLICACIONES EN REACH	208
12.4 LA UNIÓN EUROPEA Y EL DIÓXIDO DE TITANIO	209
13. CONCLUSIONES Y RETOS	210
14. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	212
 APÉNDICE: GUÍA DE APLICACIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS EN ACTIVOS DEL TRANSPORTE PARA LA MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE	 225
1. INTRODUCCIÓN	225
2. FUNDAMENTOS BÁSICOS	226
3. MARCO NORMATIVO	227
4. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN (2011-2019)	229
5. CAMPOS DE APLICACIÓN	230
6. TIPOS DE APLICACIONES	231
7. RECOMENDACIONES DE DISEÑO, APLICACIÓN Y SEGUIMIENTO DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS, A PARTIR DE MICROEMULSIONES CON BASE ACUOSA	232
7.1 DEFINICIÓN DEL TRATAMIENTO	232
7.2 CRITERIOS BÁSICOS DE DISEÑO Y APLICACIÓN	232
7.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	235
7.4 EJECUCIÓN	236

7.5 CONTROL DE CALIDAD	237
7.5.1 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA DESCONTAMINANTE	237
7.5.1.1 ENSAYOS DE LABORATORIO	237
7.5.1.2 SISTEMAS DE EVALUACIÓN <i>IN SITU</i>	239
7.5.1.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN DIRECTA	240
7.5.1.4 MODELOS DE PREDICCIÓN	242
7.5.1.5 CERTIFICACIÓN	242
7.5.2 RECOMENDACIONES FINALES SOBRE EL CONTROL DE CALIDAD	243
7.6 CRITERIOS DE RECEPCIÓN	244
8. RECOMENDACIONES DE DISEÑO, APLICACIÓN Y SEGUIMIENTO DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS, A PARTIR DE LECHADAS PERCOLADAS EN BASE CEMENTO (SÓLO PARA PAVIMENTOS)	245
8.1 DEFINICIÓN DEL TRATAMIENTO	245
8.2 CRITERIOS BÁSICOS DE DISEÑO Y APLICACIÓN	246
8.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	246
8.4 FABRICACIÓN Y EJECUCIÓN	248
8.5 CONTROL DE CALIDAD	249
8.5.1 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE EFICIENCIA DESCONTAMINANTE	250
8.6 CRITERIOS DE RECEPCIÓN	250
9. REFERENCIAS	251

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Variación del número de publicaciones sobre fotocatalisis y fotoquímica en los últimos cincuenta años. Los datos proceden de la base de datos SCOPUS. Búsqueda: photocat* OR photochem*.	20
Figura 2: Acontecimientos históricos de la fotoquímica y la fotocatalisis ordenados cronológicamente.	21
Esquema 1: Santonina y su producto derivado. El comienzo de la fotoquímica en Italia.	22
Figura 3: Contaminación ambiental originada por el tráfico. Fuente: DGT.	28
Figura 4: Evolución de las medias anuales de NO ₂ (2001-2022) por tipo de área.	30
Figura 5: Evolución de las medias anuales de SO ₂ (2001-2022) por tipo de área.	30
Figura 6: Evolución de las medias anuales de PM ₁₀ (2001-2022) por tipo de área.	30
Figura 7: Evolución de las medias anuales de PM _{2,5} (2008-2022) por tipo de área.	31
Figura 8: Evolución de las medias anuales de los percentiles 93,2 de O ₃ (2004-2022) por tipo de área.	31
Figura 9: Esquema de funcionamiento de un material fotocatalítico en exteriores. Fuente: ICOPAL.	35
Figura 10: Aplicaciones miembros AIF. Fuente: AIF.	38
Figura 11: Aplicaciones por sectores de miembros AIF. Fuente: AIF.	38
Figura 12: Imágenes de una superficie tratada con TiO ₂ en contacto con agua antes (A) y después (B) de irradiarla con luz UV.	41
Figura 13: Esquemas de aplicación y acabados de las tecnologías fotocatalíticas más habituales en la actualidad. Fuente: Politécnico de Milán.	42
Figura 14: Proceso de extendido y percolación de lechada fotocatalítica sobre un pavimento drenante. Fuente: Eurovía.	43
Figura 15: Percolación de lechada especial sobre la capa de mezcla bituminosa drenante. Fuente: Eurovía.	43
Figura 16: Esquema de acabados antes y después de granallado. Fuente: Eurovía y Eptisa.	44
Figura 17: Carril Bus (Málaga). Fuente: Heidelberg Materiales.	44
Figura 18: Descripción y ejecución de técnica de pulverización sobre rodadura existente y estado final de la misma después de la aplicación. Fuente: Impresa Bacchi.	44
Figura 19: Esquema de acabado del tratamiento superficial a partir de micro-emulsión fotocatalítica, antes y después de la apertura al tráfico. Fuente: Impresa Bacchi y Eptisa.	45

Figura 20: Proceso de pulverización de spray fotocatalítico sobre pavimento existente (Izda.). Detalle de acabado de extendido de spray fotocatalítico en aceras en Milán (Dcha.). Fuente: Impresa Bacchi.	45
Figura 21: Discriminación por zonas de desgaste del tratamiento superficial fotocatalítico, una vez abierto al tráfico. Fuente: Impresa Bacchi y Eptisa.	46
Figura 22: Aplicación fotocatalítica sobre pavimento de adoquines y losetas hidráulicas en una calle del Ayuntamiento de Madrid. Fuente: Proquicesa.	46
Figura 23: Aplicación de loseta fotocatalítica en High Line Sants, Barcelona. Fuente: Breinco.	47
Figura 24: Plaza de Conresa. Mislata, Valencia. Fuente: Heidelberg Materials.	47
Figura 25: Túnel del Espinillo en Villaverde (Madrid). Fuente: Ayuntamiento de Madrid.	48
Figura 26: Pabellón Real Madrid. Madrid. (España). Fuente: Heidelberg Materials.	49
Figura 27: Palacio Expo 2015. Milán (Italia). Italia. Fuente: Heidelberg Materials.	49
Figura 28: Edificio Cajamar Pita. Almeria (España). Fuente Heidelberg Materials.	49
Figura 29: Ejemplo de aplicación de cubiertas de impermeabilización fotocatalíticas en edificios urbanos. Fuente BMI.	50
Figura 30: Ejemplo de posible aplicación en túneles.	51
Figura 31: Ejemplo de posible aplicación en estaciones de metro.	51
Figura 32: Ejemplo de posible aplicación en Terminales aeroportuarias.	51
Figura 33: Fachada con pintura fotocatalítica en el Hotel Atlántico de la C/ Gran Vía de Madrid. Fuente: KEIM.	51
Figura 34: Fachada con pintura fotocatalítica en el Edificio Santa Lucía. Sevilla (España). Fuente: KEIM.	51
Figura 35: Fachada con pintura fotocatalítica en Ingeniero La Cierva. Cádiz (España). Fuente: KEIM.	52
Figura 36: Fachada del Pabellón Antonio García Martínez en Mairena del Alcor. Sevilla. Fuente: Graphenstone.	52
Figura 37: Pintura fotocatalítica sobre monumentos históricos (izda) en comparación con otro sin tratar (dcha). Fuente: Levenger.	53
Figura 38: Simulación de aplicación del conjunto de materiales fotocatalíticos sobre un barrio genérico de una ciudad, creando una Isla Fotocatalítica.	53
Figura 39: Resumen grupos de contaminantes que se ha descrito su eliminación mediante el uso de fotocatálisis.	57
Figura 40: Vistas parciales de un CPC empleado para la fotocatálisis solar en la eliminación de contaminantes en agua (Spasiano et al. 2010).	63
Figura 41: CPC instalado en la EDAR de Beniel en Murcia.	64
Figura 42: otorreactor desarrollado por el consorcio PHOTOPUR.	64

Figura 43: Pintura de interior en guardería. Fuente: Levenger.	67
Figura 44: Pintura de interior en gimnasio. Fuente: Levenger.	67
Figura 45: Imagen del interior del prototipo: Nuevo prototipo filtrante dotado de 3 niveles de filtración. De abajo arriba: Nivel 1. Monolitos de carbón activado impregnado en su parte interna con Sol-gel FOTOAIR. Nivel 2. Filtros de polarización activa con sus caras internas de fibra natural (FN) impregnadas con Sol-gel FOTOAIR. Las dos caras internas más la inferior soportada sobre el carbón activado son irradiadas por una lámpara UVA. El sistema se completa con una etapa filtrante denominada Nivel 3. Filtro final ePM1>80 % antes de alcanzar los ventiladores de impulsión que movilizan todo el flujo de aire a través de todo el equipo. Este equipo está diseñado para ser incluido en el falso techo de los edificios en número, según necesidades.	78
Figura 46: La doctora Cristina Canela, responsable del Departamento de Química Ambiental de la Universidad UENF de Brasil, junto con el doctor Benigno Sánchez, jefe del grupo FOTOAIR del CIEMAT y responsable del proyecto, han colaborado activamente en el desarrollo del prototipo final implantado a escala real.	79
Figura 47: Marco normativo legal español en materia de calidad ambiental en exteriores según el RD 34/2023.	82
Figura 48: Niveles recomendados de las directrices sobre calidad del aire y metas intermedias de la OMS (2021).	83
Figura 49: Comparativa de condiciones de ensayo de las Normas Francesa (XP), Italiana (UNI) e Internacional (ISO). Fuente: Eptisa-Aidico.	90
Figura 50: Certificación de Proyecto de Investigación y Desarrollo, para la realización de ensayos <i>in situ</i> , concedido a la Empresa Eptisa, Servicios de Ingeniería.	93
Figura 51: Ejemplo de muestras embebidas en la superficie de tratamiento fotocatalítico (en este caso una cuneta), para posterior seguimiento en laboratorio, por métodos normalizados. Fuente: AIF.	94
Figura 52: Ejemplo de muestra colocada en la superficie de tratamiento fotocatalítico (en este caso un elemento de contención de una carretera), para posterior seguimiento en laboratorio, por métodos normalizados. Fuente: AIF.	94
Figura 53: Distrito de Villaverde – áreas de aplicación de los productos fotocatalíticos. Fuente: Ayto. de Madrid.	99
Figura 54: Analizador automático en continuo para la determinación en el aire ambiente de óxidos de nitrógeno (NO, NO ₂ , NOx) y de ozono (O ₃) puesto en la plaza de Ágata. Fuente: Eptisa.	100
Figura 55: Localización de la calle donde se desarrollaría el piloto a escala real. Fuente: Light2cat.	101
Figura 56: Equipo de medición de la calidad del aire en C/ Félix Pizcueta. Valencia. Fuente: Light2cat.	101

Figura 57: Suministro de baldosas prefabricadas con hormigón fotocatalítico.	
Fuente: Light2cat.	101
Figura 58: Resultados de lecturas de parámetros en Proyecto Light2cat.	102
Figura 59: Detalle de sensor instalado en zona de aplicación del tratamiento superficial fotocatalítico. Fuente: Cartif.	103
Figura 60: Codificación de muestras y aspecto. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.	105
Figura 61: Reducción de NOx, antes de envejecimiento. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.	106
Figura 62: Reducción de NOx, tras envejecimiento. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.	106
Figura 63: Influencia en la sensibilidad al agua. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.	106
Figura 64: Influencia en la deformación permanente. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.	106
Figura 65: Influencia en el contenido de huecos. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.	107
Figura 66: Influencia en el módulo de rigidez. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.	107
Figura 67: Influencia en la resistencia al deslizamiento y a la macrotextura.	
Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.	108
Figura 68: Presentación de muestras ensayadas con tratamiento fotocatalítico sobre loseta hidráulica.	108
Figura 69: Resultados de eliminación de NOx sobre loseta hidráulica. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.	108
Figura 70: Caracterización de loseta patrón (M8Cp) (patrón) y M8C (material con Coverlite®). Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.	109
Figura 71: Ubicación de las estaciones de muestreo. Fuente: Breinco.	116
Figura 72: Planta. Zona de actuación.	119
Figura 73: Detalle de instalación de muestras testigo en arcén, antes del comienzo de los trabajos de tratamiento fotocatalítico. Fuente: Eptisa.	120
Figura 74: Estación de calidad del aire instalada en obra por Cartif, situada en el tramo dirección Barcelona. Fuente: Cartif.	120
Figura 75: Resumen de resultados de eficiencia descontaminante, realizados en el Laboratorio de Eptisa.	121
Figura 76: Estado de la Autopista durante la aplicación del tratamiento fotocatalítico. 11 de agosto de 2023. Calzada Derecha. Fuente: Eptisa.	121
Figura 77: Representación gráfica Rendimiento eliminación NOx y horas de luz mensual. Fuente: Fundación Cartif.	124
Figura 78: Representación gráfica Rendimiento eliminación NOx y precipitaciones. Fuente: Fundación Cartif.	124
Figura 79: Aplicación de micro-emulsión fotocatalítica, mediante el prototipo patentado por "Impresa Bacchi", en la Terminal 1 del Aeropuerto de Malpensa (Milán).	125

Figura 80: Estación móvil para la medida instalada en el Aeropuerto de Malpensa (Milán).	
Fuente: Impresa Bacchi.	126
Figura 81: Aplicación de micro-emulsión fotocatalítica en las aceras del Edificio de la Región Lombardía (Milán). Fuente: Impresa Bacchi.	126
Figura 82: Ensayo de resistencia al deslizamiento aplicado sobre las superficies de rodadura tratadas y sin tratar. Fuente: Impresa Bacchi.	127
Figura 83: Evolución del abatimiento de concentraciones de NOx bajo ensayos normalizados realizados sobre testigos tallados de aglomerado. Fuente: Impresa Bacchi.	128
Figura 84: Pavimento fotocatalítico en Roskilde (Dinamarca). Fuente: Photocat.	128
Figura 85: Pavimento fotocatalítico en Roskilde (Dinamarca). Fuente: Photocat.	129
Figura 86: Gráficas que muestran la eficiencia descontaminante (curva de color rojo) del pavimento adoquinado fotocatalítico, según la intensidad de luz y la franja horaria. Fuente: Photocat.	129
Figura 87: Cuneta fotocatalítica con incorporación de muestras testigo en el hormigón. Fuente AIF.	132
Figura 88: New Jersey fotocatalítica: Aplicación y estado final. Fuente AIF.	132
Figura 89: Resumen de resultados de eficiencia fotocatalítica. Fuente: Eptisa.	133
Figura 90: Planta de localización de aplicaciones. Carretera BI-637 (Túneles de la Avanzada). Fuente: Esptisa.	134
Figura 91: Sección de uno de los tramos de aplicación. Fuente: Google Maps.	135
Figura 92: Resumen de resultados de caracterización de los productos participantes. Fuente Eptisa.	136
Figura 93: Limpieza previa de la superficie de aplicación. Fuente: Eptisa.	137
Figura 94: Aplicación de tratamiento fotocatalítico sobre elemento de contención. Fuente: Eptisa.	137
Figura 95: Resultados de degradación de NOx en el tiempo, con el método de instalación de muestras <i>in situ</i> . Fuente: Eptisa.	138
Figura 96: Aplicación en el túnel de El Espinillo de Villaverde (Madrid). Fuente: Ayuntamiento de Madrid.	139
Figura 97: Cambio de luminarias existentes a LED, para activación del fotocatalizador, en el túnel del El Espinillo. Fuente: Ayuntamiento de Madrid.	139
Figura 98: Proceso de cambio de luminarias en el túnel. Fuente: Ayuntamiento de Madrid.	139
Figura 99: Resultados de seguimiento de actividad descontaminante en el periodo septiembre de 2014 a febrero de 2015. Fuente: Ayuntamiento de Madrid.	140
Figura 100: Izquierda, Imagen de cámara Euphore. Derecha, Comparativa de resultados de reducción de concentraciones de NOx, con y sin textil fotocatalítico. Fuente: Photocitytex.	141

Figura 101: Izquierda, comparativa de resultados de reducciones de NO _x , con y sin tela fotocatalítica en túnel de la Autovía A3. Derecha, comparativa de reducciones de ozono, con y sin toldo fotocatalítico en Colegio. Fuente: Photocitytex.	141
Figura 102: Cubiertas impermeabilizantes fotocatalíticas en centro logístico de Amazon. Getafe (Madrid). Fuente: BMI.	142
Figura 103: Análisis horario de concentraciones medias de contaminantes entre 2004 y 2009 en una calle de Valencia. Fuente: Ceracasa.	143
Figura 104: Vista de la Cámara Euphore. Fuente: CEAM.	144
Figura 105: Fechas, horas y ciclos de experimentación.	144
Figura 106: Presentación de pinturas de fachada bajo el código de muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET.	145
Figura 107: Eliminación de NO _x . muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET.	146
Figura 108: Concentraciones de nitritos y nitratos. muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET.	146
Figura 109: Envejecimiento en cámara de envejecimiento acelerado. muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET.	146
Figura 110: Envejecimiento a la intemperie y efecto de lavados. muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET.	147
Figura 111: Presentación de pinturas para ladrillos cerámicos. muestras 25 y 26. Fuente: LIFE MINOX STREET.	147
Figura 112: Eliminación de NO _x . muestras 25 y 26. Fuente: LIFE MINOX STREET.	147
Figura 113: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.	148
Figura 114: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.	148
Figura 115: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.	148
Figura 116: Comparativa de microfotografías tomadas sobre los paneles tratados y no tratados con fotocatalisis, tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.	148
Figura 117: Comparativa de resultados de microfotografías tomadas sobre los paneles tratados y no tratados con fotocatalisis, tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.	148
Figura 118: Porcentajes de reducción de concentraciones de NO ₂ (diagrama de barras, eje izquierdo), obtenido a partir de captadores pasivos. Temperatura media semanal (curva de puntos discontinua, eje izquierdo) y humedad relativa (Curva continua, eje derecho). Fuente: Nieto-Márquez y col. 2023.	151
Figura 119: Placa PPFCA. Fuente: AIF y Levenger.	152

Figura 120: Resultados promedios de mejora de la calidad del aire interior, obtenidos en el experimento 1, tras 8 horas de funcionamiento de la placa fotocatalítica. Fuente: M. García Rueda, C. Rábade Castedo, C.A. Jiménez-Ruiz.	153
Figura 121: Resultados promedios de mejora de la calidad del aire interior, obtenidos en el experimento 2, entre las 8 y 16 horas de funcionamiento de la placa fotocatalítica. Fuente: M. García Rueda, C. Rábade Castedo, C.A. Jiménez-Ruiz .	153
Figura 122: Metodología empleada.	156
Figura 123: Ejemplo de estado de conservación de panel fotovoltaico, antes de la limpieza. Fuente: Biorisk.	160
Figura 124: Estado final, tras la aplicación con tratamiento fotocatalítico. Fuente: Biorisk.	160
Figura 125: Limpieza de paneles fotovoltaicos. Fuente: Biorisk.	160
Figura 126: Influencia de la dirección del viento en los niveles de contaminación. Fuente: Italcementi. Resultados científicos. Proyecto PICADA.	164
Figura 127: Isla de calor producida en las áreas urbanas. En ausencia de lluvias y vientos da lugar a una cúpula de contaminantes.	165
Figura 128: Potenciales redox a pH 7 frente al electrodo normal de hidrógeno de las bandas de valencia (inferior) y de conducción (superior) de algunos semiconductores potencialmente utilizables como fotocatalizadores, comparados con los de algunas semirreacciones relevantes. Los valores dentro de las barras coloreadas indican la anchura de banda prohibida (band gap) de cada material. Adaptada de Fresno y col., 2018.	170
Figura 129: Algunos ejemplos de gamas cromáticas de productos fotocatalíticos.	170
Figura 130: Eliminación fotocatalítica de NOx mediante el uso de materiales fotocatalíticos en diferentes emplazamientos. Fuente: Fotoair.	172
Figura 131: Dr. Akira Fujishima, director del Centro Internacional de Fotocatálisis en Tokio, y el presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, David Almazán, en un Congreso de Fotocatálisis celebrado en Copenhague en abril de 2018. Fuente: AIF.	179
Figura 132: Iglesia Dives in Misericordia. Roma (Italia), construida con elementos prefabricados de hormigón blanco con cemento fotocatalítico de Heidelberg	180
Figura 133: Resultados de ensayos realizados por EPTISA durante los años 2011 y 2013, con la Norma ISO 22197-1. Cement Group y cuyo arquitecto fue Richard Meier.	180
Figura 134: Resultados de ensayos realizados por EPTISA durante los años 2011 y 2013, con la Norma UNI 11247.	181
Figura 135: Tendencia de mejora de eficiencia de materiales fotocatalíticos entre los años 2011 y 2013, según la Norma ISO. Fuente: Laboratorio de EPTISA.	181
Figura 136: Tendencia de mejora de eficiencia de materiales fotocatalíticos entre los años 2011 y 2013, según la Norma UNI. Fuente: Laboratorio de EPTISA.	181

Figura 137: Imagen de prototipo multiensayo. Fuente: Eptisa.	182
Figura 138: Certificado de Eficiencia de Producto Fotocatalítico. Fuente: AIF.	182
Figura 139: Imágenes que muestran el estado del barrio de La Rosilla (distrito de Vallecas. Madrid) antes y después de convertirlo en Ecobarrio. Fuentes: Ezquiaga Arquitectura y Eptisa.	184
Figura 140: “La calidad del aire en la Escuela: Un deber de todos, una derecho de los niños”, reconoce el empleo de tecnología fotocatalítica como mejora de la calidad del aire. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente italiano.	184
Figura 141: Portadas de documentos del Ayuntamiento de Barcelona, relacionados con los criterios de sostenibilidad puntuables en licitaciones de Proyectos y Obras, y una Guía de Contratación de Compra Pública Innovadora, donde se recogen los materiales fotocatalíticos.	185
Figura 142: Abajo a la izquierda, el ministro de Innovación y Ciencia, D. Pedro Duque, interviene en la Jornada X Aniversario AIF, reconociendo sus aportaciones a la sociedad. Arriba a la izquierda, la Secretaria de Estado del Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, D ^a . Isabel Pardo de Vera Posada, recibe el premio X Aniversario AIF en reconocimiento de esta cartera al apoyo a la tecnología fotocatalítica. A la derecha, D. David Almazán, en la ceremonia de entrega de la Medalla de Honor de la Carretera, cuyo galardón fue entregado por D. Miguel Ángel Carrillo, presidente del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.	187
Figura 143: Comparativa de resultados de tramos de autovía, tratados (lado dcho, en verde) y no tratados (lado izdo en azul) con fotocatalisis a nivel de adherencia neumático-pavimento (CRT). Fuente UTE Eiffage-ELSAN y AIF.	193
Figura 144: Espectro de longitudes de onda para distintas fuentes de luz.	197

FIGURAS APÉNDICE

Figura 1.A: Niveles recomendados de las directrices sobre calidad del aire y metas intermedias de la OMS (2021).	227
Figura 2.A: Marco normativo legal español en materia de calidad ambiental en exteriores según el RD 34/2023.	228
Figura 3.A: Certificado de Eficiencia Fotocatalítica de Producto.	232
Figura 4.A: Relación entre dotaciones en seco, es decir, de fotocatalizador residual, y eficiencias descontaminantes de varios fabricantes, aplicados sobre un sustrato de hormigón.	233
Figura 5.A: Relación entre dotaciones en seco, es decir, de fotocatalizador residual, y eficiencias descontaminantes de varios fabricantes, aplicados sobre un sustrato bituminoso con granulometría discontinua.	233
Figura 6.A: Relación entre dotaciones en húmedo, es decir, de micro-emulsión en base acuosa, y eficiencias descontaminantes de un fabricante genérico del mercado, aplicado sobre un sustrato de hormigón.	233

Figura 7.A: Colocación de muestras testigo sobre New Jersey de Autovía de Los Llanos (Izda.) y arcén de Autopista C-31 (Dcha.). Fuente: Eptisa. 239

Figura 8.A: Estación de calidad del aire instalada en la Autopista C-31 para seguimiento de eficiencia fotocatalítica. Fuente: Fundación Cartif. 241

Figura 9.A: Arriba izda. Lechada fotocatalítica base cemento. Fuente: Trabit (Eurovia). Arriba dcha. Percolación con rastra. Dcha centro. Acabados de pavimento. Fuente: Grupo Heidelberg Materials Hispania. Abajo dcha. Helipuerto Nuovo S.Gerardo - Monza (Italia). Fuente: Grupo Heidelberg Materials Hispania. Abajo izda. C/Martín de los Heros. Madrid. Fuente: Trabit (Eurovia). 245

Figura 10.A: Características mecánicas recomendadas de los pavimentos percolados con lechadas fotocatalíticas en base cemento. 247

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	
Compuestos fotodegradados en fase gas con materiales basados en TiO_2	39
Tabla 2	
Fotocatalizadores más empleados en procesos de desinfección en agua bajo luz visible	61
Tabla 3	
Fotocatalizadores más empleados y contaminantes estudiados	61
Tabla 4	
Los diferentes niveles de limpieza	77
Tabla 5	
Valores recomendables de algunos contaminantes en interiores	84
Tabla 6	
Rasgos tipo según VOCs totales: UNE 171330: 2024 (criterios IDA del RITE)	85
Tabla 7	
Norma UNE 127197-1:2013 para clasificación de producto según el rendimiento de la purificación de aire NO_x en prefabricados de hormigón	91
Tabla 8	
Resumen de normas internacionales para evaluación de aplicaciones fotocatalíticas en exteriores e interiores	92
Tabla 9	
Comparativa de reducción de NO_x	117
Tabla 10	
Comparativa de reducción de Ozono	117
Tabla 11	
Comparativa de reducción de SO_x	118
Tabla 12	
Comparativa de reducción de CO	118
Tabla 13	
Comparativa de reducción de todos los contaminantes analizados	118
Tabla 14	
Cálculo del rendimiento de eliminación de NO, NO_2 y NO_x	125
Tabla 15	
Comparativo de resultados de eficiencia descontaminante. Fuente: BMI	142

Tabla 16

Recuento (UFC/m ³ y Log UFC/m ³) de bacterias y hongos en la intervención de ensayo y cambio en la contaminación ambiental (CCA, en Log UFC/m ³)	157
---	-----

Tabla 17

Clasificación propuesta para la actividad fotocatalítica inicial de materiales evaluados según norma ISO	176
--	-----

Tabla 18

Cálculo del rendimiento de eliminación de NO, NO ₂ y NO _x y evaluación de movilización de partículas en la Autopista C-31	201
---	-----

TABLA APÉNDICE**Tabla 1.A**

Clasificación de producto según la Norma UNE 127193-1: 2013	237
---	-----





AUTORES

1. INTRODUCCIÓN A LA FOTOCATÁLISIS

Daniel González · Experto en nanociencia y CEO de Nanostine.

2. LA ASOCIACIÓN IBÉRICA DE LA FOTOCATÁLISIS: MISIÓN Y OBJETIVOS

David Almazán · Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera, **Raúl Crespo** · Vicepresidente Científico-Técnico de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y Responsable de I+D+i de Heidelberg Materials Hispania, **Fabien Remaut** · Managing Director Iberia BMI Group, **Gemma Pagés** · Consultora independiente, **Ramón Viñas** · Asesor en DKSH.

3. PANORAMA DE LA CONTAMINACIÓN

David Almazán · Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera, **Fernando Fresno** · Científico Titular del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC, **Gianni Rovito** · Jefe de Proyectos. Departamento de Firms de EPTISA, **José Feroso Domínguez** · Investigador de Centro tecnológico CARTIF (Introducción a la calidad del aire interior), **Francisco Verdugo** · Investigador CARTIF (Introducción a la calidad del aire interior), **Alicia Aguado** · Ingeniera Química CARTIF (Introducción a la calidad del aire interior), **Sandra Rodríguez** · Investigadora CARTIF (Introducción a la calidad del aire interior), **Silvia Suárez** · Investigadora de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Introducción a la calidad del aire interior), **Alberto Rodríguez** · Investigador de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Introducción a la calidad del aire interior), **Juan Gilaranz** · Investigador de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Introducción a la calidad del aire interior), y **Benigno Sánchez** · Jefe de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Introducción a la calidad del aire interior).

4. LA FOTOCATÁLISIS Y SUS APLICACIONES

David Almazán · Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera, **Fernando Fresno** · Científico Titular del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC, **Gianni Rovito** · Jefe de Proyectos. Departamento de Firms de EPTISA, **Henrik Jensen** · CTO y Co-Fundador en PHOTOCAT (Apartado la fotocatalisis frente a hongos, bacterias y virus), **Pernille D. Pedersen** · Experta en Química Atmosférica y Computacional (Apartado la fotocatalisis frente a hongos, bacterias y virus), **Patricia García-Muñoz** y **Jorge Rodríguez-Chueca** · Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid (Aplicaciones en la depuración de aguas), **José Feroso Domínguez** · Investigador de

Centro tecnológico CARTIF (Apartado LIFE Equinox y aplicaciones en espacios interiores), **Francisco Verdugo** · Investigador CARTIF (Apartado aplicaciones en espacios interiores), **Alicia Aguado** · Ingeniera Química CARTIF (Apartado aplicaciones en espacios interiores), **Sandra Rodríguez** · Investigadora CARTIF (Apartado aplicaciones en espacios interiores), **Silvia Suárez** · Investigadora de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado aplicaciones en espacios interiores), **Alberto Rodríguez** · Investigador de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado aplicaciones en espacios interiores), **Juan Gilaranz** · Investigador de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado aplicaciones en espacios interiores), y **Benigno Sánchez** · Jefe de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado aplicaciones en espacios interiores).

5. LEGISLACIÓN SOBRE CALIDAD DEL AIRE

David Almazán · Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera, **Fernando Fresno** · Científico Titular del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC, **Gianni Rovito** · Jefe de Proyectos. Departamento de Firms de EPTISA, **José Feroso Domínguez** · Investigador de Centro tecnológico CARTIF (Apartado Legislación de calidad del aire interior), **Francisco Verdugo** · Investigador CARTIF (Apartado Legislación de calidad del aire interior), **Alicia Aguado** · Ingeniera Química CARTIF (Apartado Legislación de calidad del aire interior), **Sandra Rodríguez** · Investigadora CARTIF (Apartado Legislación de calidad del aire interior), **Silvia Suárez** · Investigadora de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado Legislación de calidad del aire interior), **Alberto Rodríguez** · Investigador de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado Legislación de calidad del aire interior), **Juan Gilaranz** · Investigador de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado Legislación de calidad del aire interior), y **Benigno Sánchez** · Jefe de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado Legislación de calidad del aire interior).

6. LEGISLACIÓN RELATIVA A LA CALIDAD DEL AGUA

Patricia García-Muñoz y **Jorge Rodríguez-Chueca** · Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.

7. MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA

David Almazán · Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera, **José Feroso Domínguez** · Investigador de Centro tecnológico CARTIF, **Fernando Fresno** · Científico Titular del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC y **Gianni Rovito** · Jefe de Proyectos. Departamento de Firms de EPTISA.

8. CASOS DE ESTUDIO

David Almazán · Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera, **José Feroso Domínguez** · Investigador de



Centro tecnológico CARTIF (Apartado LIFE Equinox y C-31), **Marta Castellote** · Investigadora Científica del Instituto Eduardo Torroja del CSIC (Apartado LIFE Photoscaling), **Eva Jiménez** · Investigadora Científica del Instituto Eduardo Torroja del CSIC (Apartado LIFE Photoscaling), **Fernando Fresno** · Científico Titular del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC, **Gianni Rovito** · Jefe de Proyectos. Departamento de Firmes de EPTISA, **Rubén Sánchez-Gómez** · Facultad de Enfermería, Fisioterapia y Podología. Universidad Complutense de Madrid (Apartado frente a contaminación microbiana), **David Sevillano Fernández**, **Luis Alou Cervera** y **Natalia González Hidalgo** · Microbiología-Departamento de Medicina, Facultad de Medicina. Universidad Complutense de Madrid. Investigación y Proyectos Microbiológicos S.L. (Apartado frente a contaminación microbiana), **Marcos García Rueda** · Unidad de Tabaquismo. Servicio de Neumología. Hospital Regional Universitario de Málaga (Apartado frente al humo del tabaco), **Carlos Rábade Castedo** · Unidad de Tabaquismo. Servicio de Neumología. Hospital Clínico Universitario Santiago de Compostela (Apartado frente al humo del tabaco), **Carlos A. Jiménez-Ruiz** · Unidad Especializada en Tabaquismo. Hospital Clínico San Carlos. Madrid y presidente de la Sociedad Española de Neumología y Cirugía Torácica, SEPAR (Apartado frente al humo del tabaco), **Jirko Bezdicek** · Director gerente de Levenger Nanotecnología, **Antonio Villanueva** · Director de operaciones en Biorisk-ATC y Asesor Técnico en Laborat y **Conrado González** · Ecooo Energía Ciudadana. S. Coop.

9. CRITERIOS DE DISEÑO Y APLICACIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS

David Almazán · Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera, **José Feroso Domínguez** · Investigador de Centro tecnológico CARTIF, **Benigno Sánchez** · Jefe de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado Guía de Uso de Materiales Fotocatalíticos), **Silvia Suárez** · Investigadora de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado Guía de Uso de Materiales Fotocatalíticos), **Carlos Martínez** · Investigador de la Unidad Fotoair del CIEMAT (Apartado Guía de Uso de Materiales Fotocatalíticos), **Fernando Fresno** · Científico Titular del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC y **Gianni Rovito** · Jefe de Proyectos. Departamento de Firmes de EPTISA.

10. AVANCES EN FOTOCATÁLISIS EN ESPAÑA DURANTE EL SIGLO XXI

David Almazán · Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera, **Gianni Rovito** · Jefe de Proyectos. Departamento de Firmes de EPTISA, **Fabien Remaut** · Managing Director Iberia BMI Group, **Ángel Díaz** · Director de I+D+i en PROQUICESA, **Santiago Ramos** · Director de Operaciones en PROQUICESA, **Peter Mayer** · Departamento Técnico Pinturas KEIM, **Gemma Pagés** · Consultora independiente, **Raúl Crespo** · Vicepresidente Científico-Técnico de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y Responsable de I+D+i de Heidelberg Materials Hispania, **José Antonio Ibáñez** · Investigador Clúster Nanotecnología. División de Construcción en TECNALIA y **Alicia Andreu** · Investigadora Senior en el Área de Sostenibilidad del Instituto de Tecnología Cerámica.

11. PREGUNTAS FRECUENTES (FAQ)

David Almazán · *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera, Fernando Fresno* · *Científico Titular del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC, José Antonio Ibáñez* · *Técnico Clúster Nanotecnología. División de Construcción en TECNALIA, Raúl Crespo* · *Vicepresidente Científico-Técnico de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y Responsable de I+D+i de Heidelberg Materials Hispania y Gianni Rovito* · *Jefe de Proyectos. Departamento de Firms de EPTISA.*

12. SEGURIDAD Y SALUD

David Almazán · *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera, Fernando Fresno* · *Científico Titular del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC, Gianni Rovito* · *Jefe de Proyectos. Departamento de Firms de EPTISA y Jirko Bezdicek* · *Director gerente de Levenger Nanotecnología.*

13. CONCLUSIONES Y RETOS

David Almazán · *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera.*

APÉNDICE

David Almazán · *Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, Director Técnico Adjunto de EPTISA y Consejero Directivo de la Asociación Española de la Carretera.*

COLABORADORES

Gonzalo García (EPTISA), **Beatriz Delgado** (EPTISA), **Jirko Bezdicek** (Levenger), **Pilar Juárez** (EPTISA), **Estrella Sanz** (EPTISA), **Miriam García** (EPTISA), **Desirée Di Nitto** · AIF/PTF y **Alberto Goytre** · Reportarte.



SOCIOS DE AIF

SOCIOS INDUSTRIALES

breinco

Breet

CLEANIX


ELCARMEN
PACKAGING SOLUTIONS

 Heidelberg
Materials

 KEM

 LEVENGER
nanotecnología

 LIDERKIT

 Macy

 Montalbán y Rodríguez

 nanopINTURAS®

 2G
NanoTech

 P AVIGESA®
Pavimentos del Genil, S.A.

 Pavimentos
Pel Peco

PHOTOCAT

 PROQUICESA

 TERRAZOS RUIZ, S.A.

SOCIO APLICADOR

 greenin
SUSTAINABLE OHH

 LABORAT
APARATOS Y MATERIAL PARA LABORATORIOS, S.L.

SOCIOS INGENIERÍAS



SOCIOS CENTROS TECNOLÓGICOS



SOCIOS UNIVERSIDADES



SOCIO PATROCINADOR





SOCIOS INDIVIDUALES

Margarita Alcalá · Arquitecto

Vasco Rodrigues · ICCP Consultor

Joaquim L. Faria · Profesor asociado Departamento Ingeniería Química de la Universidad de Oporto

Francisco Javier López Rivadulla · Arquitecto de la Universidad de Coruña

Daniel González Muñoz · CEO Nanostine

Fernando Fresno García · Científico Titular de OPI, Instituto de Catálisis y Petroleoquímica, CSIC

Cristina Adán Delgado

Almudena Gutiérrez Batista

Elena Cerro Prada

Prof. Regina de Fátima Peralta Muniz Moreira

M. Auxiliadora Barbudo Muñoz

Virgínia Ferreira

Sitio Web: <https://www.fotocatalisis.org>

Sitio web: <http://www.ptfotocatalisis.es>

Contacto: contacto@fotocatalisis.org

Biblioteca multimedia: <https://www.fotocatalisis.org/biblioteca/>

EMPRESAS COLABORADORAS



CONAMA

PATROCINADORES LIBRO BLANCO

El Libro Blanco de la Fotocatálisis agradece la generosa colaboración de sus patrocinadores



PADECASA



TRABIT

AYUDA PTR2022-001336, FINANCIADA POR:



PRÓLOGO

AKIRA FUJISHIMA

Tokyo University of Science, Tokyo, Japan

Durante las últimas tres décadas, se han dedicado grandes esfuerzos a la investigación de dos campos estrechamente relacionados, la fotoelectroquímica de semiconductores y la fotocatálisis, con el objetivo de profundizar en sus conceptos fundamentales y sus aplicaciones prácticas. Los principios investigados, desarrollados y los resultados obtenidos mediante los estudios fotoelectroquímicos en el dióxido



de titanio, han conducido al campo de la investigación de la fotocatálisis heterogénea, donde su gran capacidad fotooxidativa se ha aplicado a la mejora de la calidad del aire ambiental y a la depuración del agua. Además, descubrimos la capacidad superhidrofílica fotoinducida y propusimos el concepto de autolimpieza.

Hoy en día, muchos científicos y expertos están trabajando arduamente para estudiar los múltiples usos de los fotocatalizadores y sus aplicaciones, con el objetivo de hacer que nuestra vida sea más saludable.

A continuación, me gustaría listar algunas ideas básicas de aplicaciones fotocatalíticas realizadas, agrupadas por tipo de industria o sector, que podrán encontrar en la siguiente ilustración: **“La historia del Sol y la fotocatálisis”**. ([Ver páginas siguientes](#))

Por último, me gustaría que cada lector de este libro pensara en cómo y dónde la fotocatálisis podría emplearse en nuestra vida diaria, porque en breve se hará realidad.

EDIFICACIÓN Y ENERGÍA

- 1 CRISTALES
- 2 PIEZAS PREFABRICADAS
- 3 TOLDOS
- 4 FACHADAS
- 5 CUBIERTAS
- 6 OTROS MATERIALES/PLACAS FOTOVOLTAICAS

INDUSTRIA DE AUTOMOCIÓN

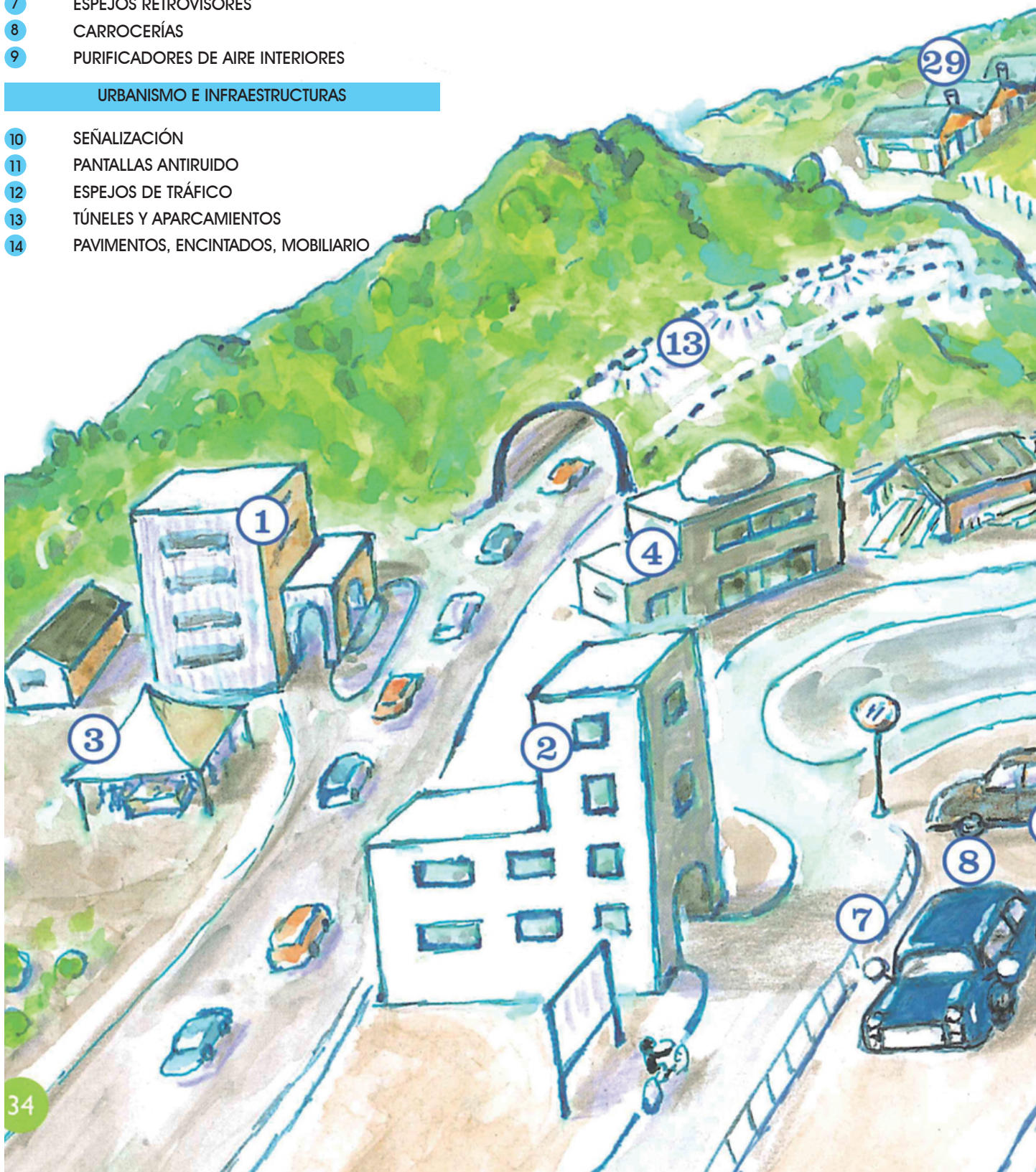
- 7 ESPEJOS RETROVISORES
- 8 CARROCERÍAS
- 9 PURIFICADORES DE AIRE INTERIORES

URBANISMO E INFRAESTRUCTURAS

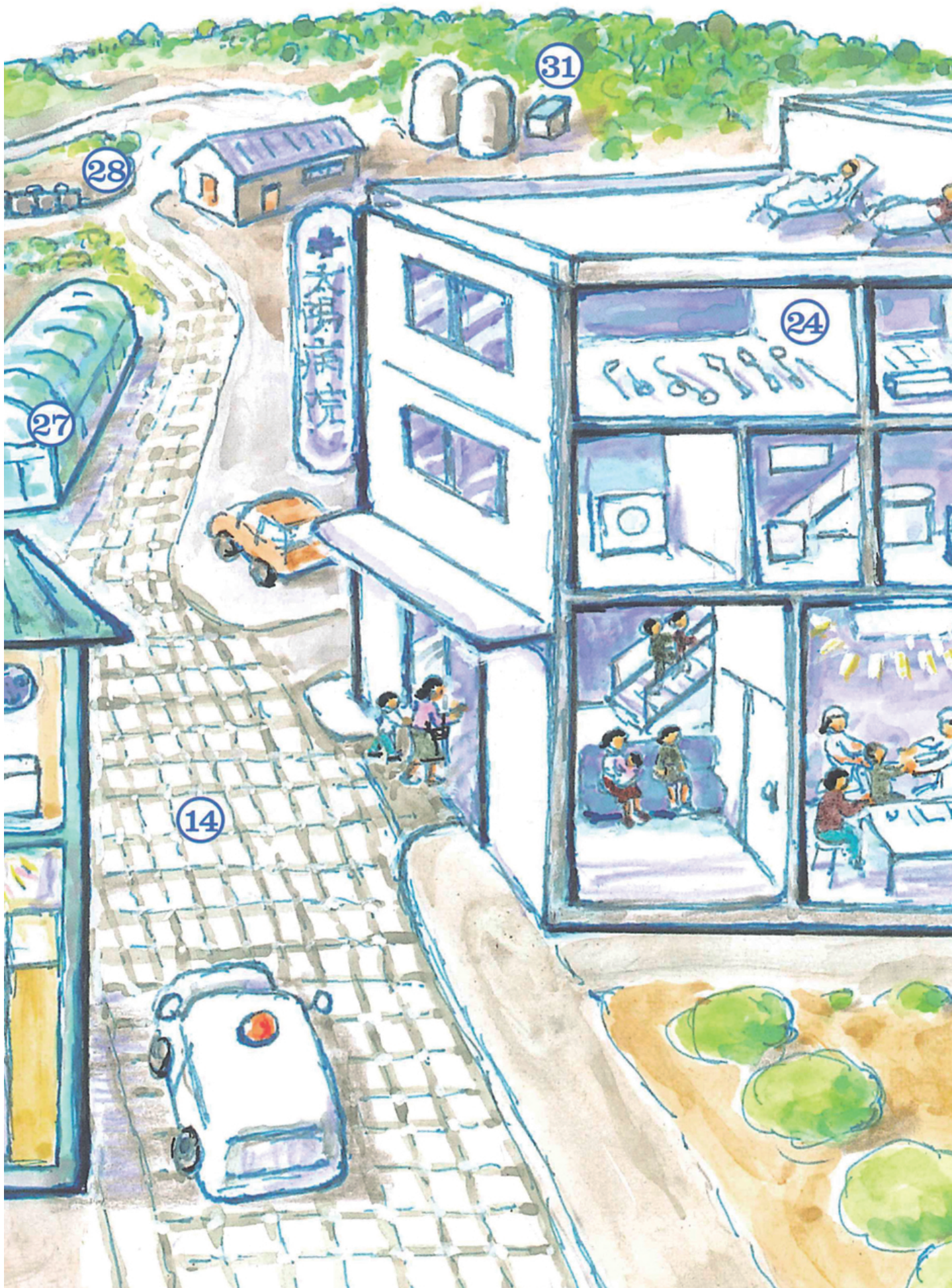
- 10 SEÑALIZACIÓN
- 11 PANTALLAS ANTIRUIDO
- 12 ESPEJOS DE TRÁFICO
- 13 TÚNELES Y APARCAMIENTOS
- 14 PAVIMENTOS, ENCINTADOS, MOBILIARIO

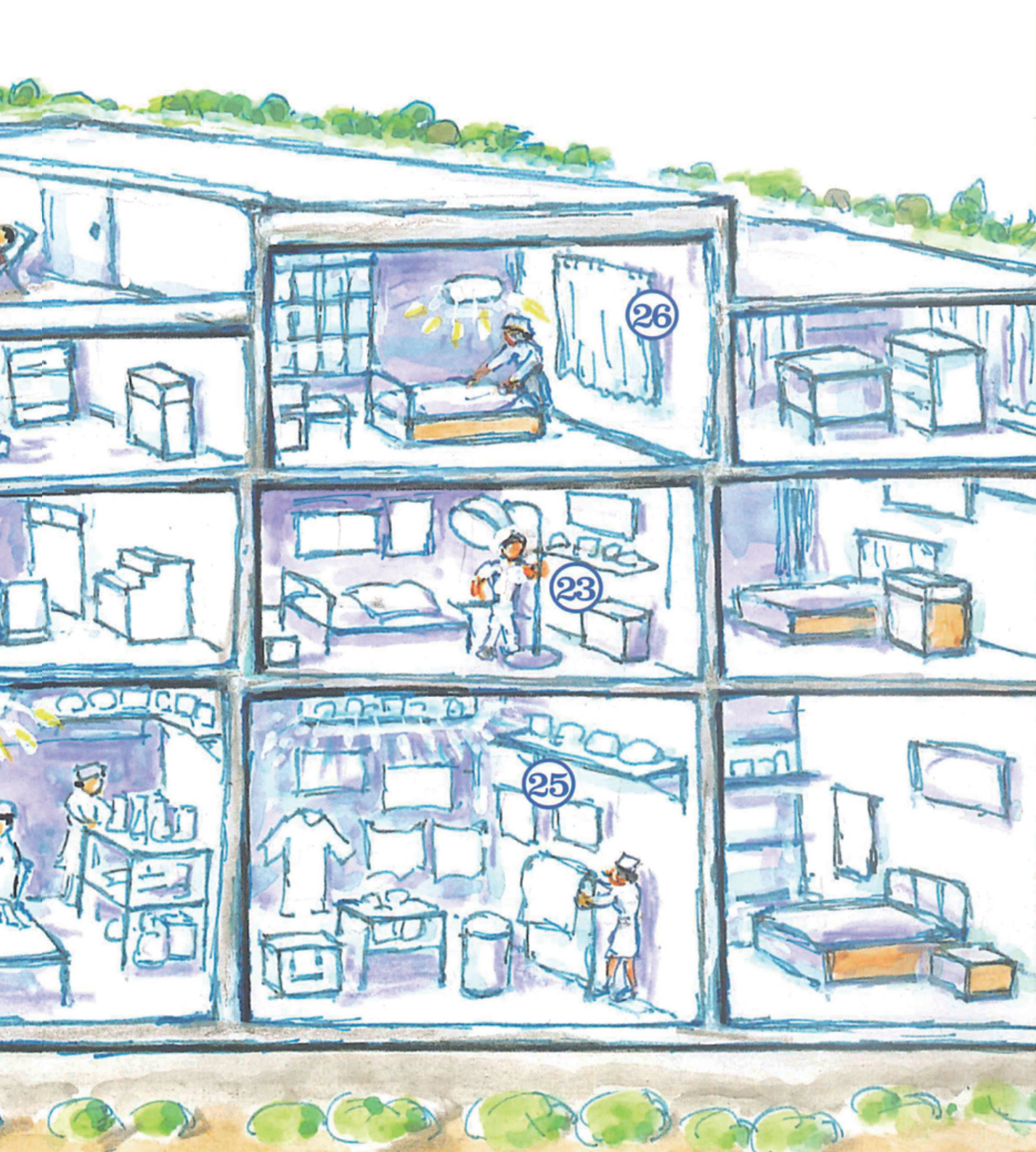
OFICINAS Y HOGARES

- 15 CORTINAS/PERSIANAS
- 16 UTENSILIOS DE COCINA
- 17 BAÑOS
- 18 LÁMPARAS
- 19 MOBILIARIO DE HABITACIONES
- 20 CLIMATIZACIÓN/AIRES ACONDICIONADOS
- 21 NEVERAS
- 22 PURIFICADORES DE AIRE









HOSPITALES Y CENTROS DE SALUD

- 23 ESTERILIZACIÓN PAREDES DE QUIRÓFANOS
- 24 ESTERILIZACIÓN Y DESINFECCIÓN DE EQUIPOS MÉDICOS
- 25 ELIMINACIÓN DE OLORES
- 26 CORTINAS

SECTOR AGROPECUARIO

- 27 CONSERVACIÓN DE VERDURAS Y FRUTAS
- 28 PURIFICACIÓN DE SOLUCIONES NUTRITIVAS
- 29 ESTERILIZACIÓN Y DESINFECCIÓN DE GRANJAS
- 30 ELIMINACIÓN DE LIXIVIADOS PELIGROSOS
- 31 ELIMINACIÓN DE DESECHOS ANIMALES

Ref.: A STORY OF THE SUN AND PHOTOCATALYSTS, Akira Fujishima, Satoshi Kako et al, KAISEI-SHA, 2011



INTRODUCCIÓN

DAVID ALMAZÁN

Presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, director técnico adjunto en EPTISA y consejero directivo de la Asociación Española de la Carretera.

La idea originaria de redactar El Libro Blanco de la Fotocatálisis, surge como respuesta a las demandas del mercado para actualizar y dar continuidad a la Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas, que la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis publicó en el Congreso Nacional de Medioambiente en el año 2012.

Pero el último impulso para comenzar definitivamente la redacción de la primera edición nos la dio el antiguo Ministerio de Fomento (actual Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible), a través de su Dirección General de Carreteras. Mediante la Iniciativa E4L2_5, dentro del Plan de Innovación para el Transporte y las Infraestructuras 2017-2020 -que aunque por determinados motivos no llegó a completarse- creó un grupo de trabajo que aunó expertos en la materia y responsables de infraestructuras muy diversas, cuyo objetivo era muy similar a esta publicación: elaborar un documento que sirviera de referencia a la hora de prescribir o contratar un material fotocatalítico. Pues bien, una buena parte de ese grupo de trabajo, liderado por la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (en adelante, AIF), de alguna manera, continuó con carácter altruista esta iniciativa hasta convertirlo en la primera edición del Libro Blanco de la Fotocatálisis.



Tras el surgimiento de la pandemia del COVID-19, la fotocatalisis cobra un protagonismo sin precedentes, por su capacidad de abatir contaminantes, virus y bacterias, tanto en aire como en agua y superficies, desarrollándose en los últimos años multitud de materiales fotocatalíticos y aplicaciones en muy distintos sectores, tales como, el sanitario, el transporte, el industrial y el energético. Como consecuencia de estos grandes avances producidos en este último periodo, la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, con el apoyo del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, ha estimado oportuno la inclusión de los mismos, en una nueva edición del Libro Blanco de la Fotocatálisis.

Para ello, se creó un grupo de trabajo específico, dentro de la reciente creación en 2023, de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis (en adelante, PTF), financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, donde se contó con una buena parte de los autores de la primera edición, pero también con los científicos más relevantes en nanociencia de la actualidad.

Como bien señala el Profesor Fujishima en el prólogo -vaya por delante nuestro agradecimiento por sus palabras e ilustración-, la fotocatálisis está presente ya en muchos de los elementos urbanos que componen nuestra cotidianeidad, tanto en espacios exteriores como interiores. Y desde ellos ejerce sus funciones benéficas de mejora de la calidad del aire, del agua y autolimpieza de superficies. Contribuye a la higiene y la salud colectiva, en tiempos que -como hemos vivido y estamos viendo- van a darles cada vez más valor.

Su funcionamiento básico -a efectos divulgativos- puede explicarse con sencillez: las superficies tratadas con agentes fotocatalíticos, gracias a la luz (solar o artificial) descomponen y mineralizan numerosos compuestos contaminantes presentes en el aire. La reacción química que se produce cuando se dan cita los tres elementos básicos -luz, oxígeno y fotocatalizador- contribuirá a degradar contaminantes nocivos para el ser humano, tales como los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre o compuestos orgánicos volátiles.

Por sus virtudes, a la fotocatálisis se la ha comparado -con humildad, pero con acierto- con la fotosíntesis, ese fabuloso mecanismo natural resultado de la alianza entre el sol y el manto vegetal, gracias al cual se genera vida.

En las páginas de esta nueva edición del Libro Blanco de la Fotocatálisis, el lector encontrará muchos más detalles sobre el funcionamiento, aplicaciones, sistemas de medición e investigaciones en el área fotocatalítica. Y es que su objetivo principal es poner a disposición de Administraciones públicas, empresas privadas y ciudadanos en general, las bondades -y también las limitaciones- del empleo de estos nuevos materiales como herramienta de mejora de la calidad de vida en nuestra sociedad.

La nueva edición del libro comienza ilustrando la apasionante historia de la fotocatálisis, desde sus inicios, en el siglo XVIII, hasta la actualidad.

Se continúa presentando a la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, que no cejan en el empeño de impulsar la innovación, el fomento de la colaboración público-privada, la creación de grupos de trabajo, la identificación de nuevos mercados, el apoyo a la internacionalización y la difusión de esta tecnología, y que llevan más de una década organizando encuentros en España y Portugal, generadores de conocimiento sobre esta temática. La segunda edición del Libro Blanco, que ha supuesto un gran esfuerzo de la comunidad profesional en torno a AIF y PTF, es la mejor manera de celebrar los prometedores éxitos alcanzados en los últimos años y aplicarlos en los próximos, que serán sin duda decisivos por los retos que el propio cambio climático plantea y, Dios no quiera, por nuevas pandemias.

Posteriormente, se presenta una panorámica de la contaminación en España, tanto en exteriores como en interiores, así como su legislación asociada. Se continúa con un repaso del estado del arte de la tecnología fotocatalítica, destacando los grandes avances llevados a cabo en los últimos años.

En este sentido, merecen especial mención las numerosas y recientes iniciativas encaminadas a la reducción de la probabilidad de contraer enfermedades infecciosas



-como respuesta a la pandemia originada por COVID-19- mediante el uso de materiales fotocatalíticos. Tal es el caso del proyecto internacional, SIN-CoV-2: "Destrucción fotoactiva de SARS-CoV-2 del aire interior y superficies". El **apartado 4.6** del libro blanco está dedicado precisamente a poner de manifiesto los avances de la comunidad científica en este área.

También se repasan los distintos métodos de evaluación de la actividad fotocatalítica de diferentes materiales, dependiendo de su uso y -lo que es más importante- se establecen recomendaciones generales de criterios de diseño y aplicación, así como un apéndice donde se incluye una guía sobre la aplicación de materiales fotocatalíticos en activos del transporte. Obviamente, estos habrán de adaptarse al contexto particular de cada proyecto, para lo cual puede requerirse asesoramiento experto; pero en todo caso estas páginas constituirán un adecuado punto de partida.

Por último, se ha incluido una síntesis de los trabajos de investigación, desarrollo e innovación llevados a cabo en la última década, dentro del capítulo "Casos de Estudio", así como una recopilación de las preguntas y respuestas (FAQs) que con mayor frecuencia nos hemos encontrado de manera recurrente.

Es importante concienciar a todos aquellos gestores y prescriptores que estén en posición de contratar el diseño o aplicación de materiales fotocatalíticos de que con este tipo de materiales de última generación no basta con pedir un presupuesto a una determinada empresa e incluirlo en un proyecto o en una obra. Antes es necesario solicitar documentación actualizada que acredite, mediante ensayos normalizados y homologables, la actividad fotocatalítica del producto comercializado, y el uso que se le vaya a dar. Después, habrá que definir un protocolo de caracterización del material acorde al uso y prestaciones finales. Evidentemente, estas acciones tendrán que estar amparadas por una partida económica que, en definitiva, no deja de ser un sistema de control para garantizar la inversión prevista, pues de lo contrario podría ocurrir que las prestaciones finales no respondieran a las expectativas. La Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, organización sin ánimo de lucro, presta servicios de asesoramiento en este sentido y lucha contra el fraude, a través del Certificado de Eficiencia Fotocatalítica de Producto, que, como en todas las actividades industriales y económicas, puede registrarse en el campo fotocatalítico.

No me gustaría terminar esta introducción sin agradecer la gran generosidad mostrada por todos y cada uno de los autores y autoras que han participado en la redacción de esta nueva edición del libro blanco, así como al resto de colaboradores, colegas y amigos, que, de una u otra forma, han contribuido de manera definitiva a ponerle el broche final. Gracias también por el apoyo recibido por todos los socios de AIF y PTF; Administraciones locales, regionales y estatales, destacando especialmente la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y al Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible; entidades públicas y privadas de investigación científica e industrial; escuelas de ingeniería y arquitectura; colegios profesionales; medios de comunicación y ciudadanos, en general, interesados en mejorar la calidad del aire que respiramos, en la degradación de contaminantes en agua o en la producción de nuevos combustibles, a través de tecnologías tan interesantes, como la fotocatálisis.

Además de los anteriores agradecimientos generales, quiero también específicamente citar a algunas de las personas que han ayudado de manera muy cercana en la coordinación de los contenidos y preparación de este libro. Tal es el caso de Fernando Fresno (Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC), Alberto Goytre (Reportarte), Desirée Di Nitto (AIF/PTF), Gonzalo García (Eptisa), Estrella Sanz (Eptisa) y Beatriz Delgado (Eptisa).

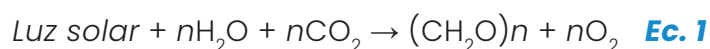
Por sus virtudes, a la fotocatálisis se la ha comparado –con humildad, pero con acierto– con la fotosíntesis, ese fabuloso mecanismo natural resultado de la alianza entre el sol y el manto vegetal, gracias al cual se genera vida.

1 BREVE HISTORIA DE LA FOTOCATÁLISIS

1.1 INTRODUCCIÓN

El estudio de la luz y sus aplicaciones se está convirtiendo en uno de los temas con más repercusión entre la comunidad científica. Motivados por los problemas derivados del cambio climático y la escasez de recursos (Himanshu et al., 2019; Melchionna et al., 2020), los científicos están buscando nuevas formas de obtener energía y desarrollar procesos industriales de manera más sostenible. Si hablamos de una fuente de energía abundante, limpia y accesible en la Tierra, no hay nada comparable con la que nos llega de nuestra estrella. La energía que llega a la superficie de la Tierra procedente del Sol es de 8×10^{13} kW, y esto implica que, en dos horas, nuestro planeta recibe el equivalente al consumo mundial de energía durante todo un año (Chakrabarti et al., 2019). Por ello, comprender el comportamiento de la luz y su interacción con la materia es uno de los retos más prometedores a los que nos enfrentamos hoy en día. Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías como las luces LED, que permiten irradiar con mayor eficacia y consumir menos energía (Akasaki et al., 2015; Amano, 2015; Nakamura, 2015), o las aplicaciones en nanotecnología (Sulabha et al., 2015), que están permitiendo mejorar las propiedades de innumerables materiales, las aplicaciones solares están asentándose como alternativas muy prometedoras a los problemas tecnológicos de nuestra sociedad.

Durante cientos de años, la ciencia ha podido avanzar gracias a nuestra capacidad de observar la naturaleza y describir los fenómenos que rigen su comportamiento. La mejor forma de aprender a aprovechar la energía del Sol es observar el reino vegetal y el proceso de fotosíntesis que se produce en el interior de las plantas. En general, la fotosíntesis es una reacción capaz de convertir la energía solar en energía química. Utiliza dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y luz solar para sintetizar materia orgánica (que las plantas utilizan como alimento) y oxígeno (O_2) ([ecuación 1](#)). Esta reacción química es el motor de la vida en la Tierra y, por ello, científicos de todas las disciplinas han aunado esfuerzos para comprender los secretos de este proceso (Nelson et al., 2004; Dogutan et al., 2019).



En este sentido, la idea de poder imitar artificialmente el proceso de fotosíntesis, y desarrollar reacciones químicas mediante la acción de la luz, aparece como una herramienta muy prometedora. La fotocatalisis es la disciplina que se encarga de imitar este proceso, utilizando fotocatalizadores, que son sustancias (Crisenza et al., 2020) capaces de absorber la energía de la luz y transferir esa energía a otras moléculas para llevar a cabo reacciones químicas. Estos procesos vienen determinados por las leyes de la fotoquímica, que es la rama de la química que estudia los efectos químicos de la luz. El interés que está mostrando la comunidad científica por la fotocatalisis y la fotoquímica se ilustra en la **figura 1**, donde podemos ver el crecimiento exponencial de las publicaciones que se han realizado en este campo en las últimas décadas.

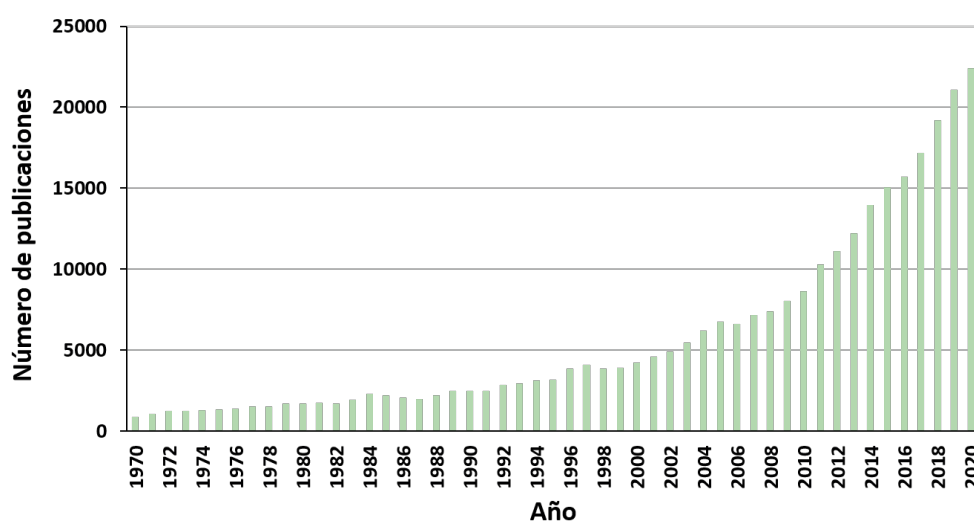
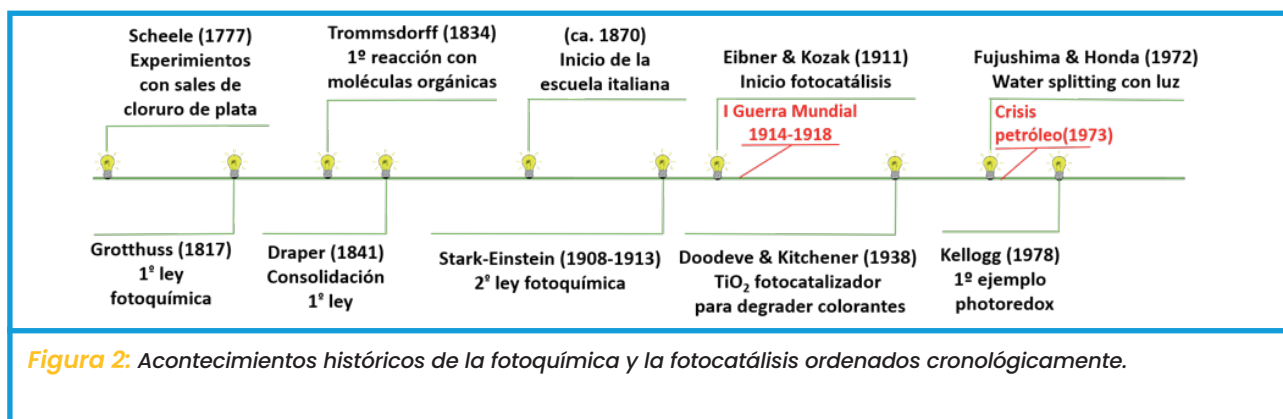


Figura 1: Variación del número de publicaciones sobre fotocatalisis y fotoquímica en los últimos cincuenta años. Los datos proceden de la base de datos SCOPUS. Búsqueda: photocat* OR photochem*.

1.2 HISTORIA DE LA FOTOQUÍMICA Y LA FOTOCATÁLISIS

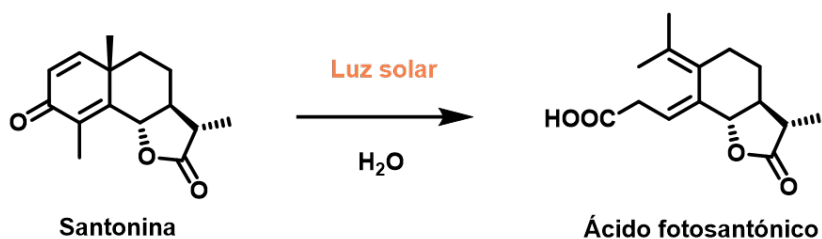
Vamos a hacer un viaje al pasado para recorrer algunos de los acontecimientos más importantes de la historia de la fotocatálisis. Para encontrar el primer estudio en el que se vio que la luz podía inducir un cambio en la materia, hay que remontarse a 1777, donde Carl W. Scheele observó que la luz ultravioleta oscurecía las sales de cloruro de plata (**figura 2**). Sin embargo, fue Theodor von Grothuss quien estableció, en 1817, el siguiente postulado que daría lugar a la primera ley de la fotoquímica: “sólo la luz absorbida por la materia es eficaz para producir un cambio fotoquímico (Balzani et al., 2014)”. Casi veinte años más tarde, Hermann Trommsdorff publicó la primera reacción fotoquímica llevada a cabo en una molécula orgánica. Estudió el cambio de color que se producía al exponer la molécula de santonina a determinadas longitudes de onda (**esquema 1**). Curiosamente, cuando la santonina se expone a la luz ultravioleta o azul (hoy sabemos que esta luz es más energética) adquiere un color amarillento. Sin embargo, no se observa ningún cambio cuando la santonina se expone a luz verde, amarilla o roja (Trommsdorff, 1834). Sólo siete años más tarde, John W. Draper retomó la idea de Grothuss sobre la luz y la consolidó, estableciendo la primera ley de la fotoquímica: la ley Grothuss-Draper (Balzani et al., 2014).



A finales del siglo XIX, surgió en Italia una escuela de científicos que haría que el campo de la fotoquímica fuese considerado como una rama muy prometedora de la química (Balzani et al., 2014). El primer científico de este movimiento, considerado el fundador de la fotoquímica en Italia, fue Fausto Alessandro Sestini (König et al., 2013), que continuó estudiando la fotoquímica de la santonina. Identificó el ácido fotosantónico (**esquema 1**), uno de los productos derivados de la irradiación de la santonina con luz solar. Sestini inició a otro de los grandes fotoquímicos de la época, Stanislao Cannizzaro, con quien trabajó durante años. A finales del siglo XIX y principios del XX, Cannizzaro formó a los dos fotoquímicos más importantes de la época: Paul Silber y Giacomo Ciamician (König et al., 2013). Especialmente hay que destacar a Ciamician, que además de ser un gran científico, supo comunicar sus

estudios de forma muy divulgativa. Estaba convencido de que las plantas poseían el secreto de cómo llevar a cabo reacciones químicas de forma más eficiente, llegando incluso a poder sintetizar moléculas imposibles de imaginar por los científicos de este período. Tal era su visión vanguardista y su confianza en la fotoquímica que nos dejó una serie de afirmaciones que bien podrían pertenecer a un científico de nuestro tiempo:

“En las tierras áridas surgirán colonias industriales sin humo y sin chimeneas; bosques de tubos de vidrio se extenderán por encima de las plantas y edificios de cristal se levantarán por doquier. En su interior tendrán lugar los procesos fotoquímicos que hasta ahora han sido el secreto mejor guardado de las plantas, pero que ya habrán sido dominados por el ser humano. Y si en un futuro lejano se agota por completo el suministro de carbón, la civilización no se verá frenada por ello, ¡pues la vida y la civilización continuarán mientras brille el sol!” (Ciamician, 1912).



Esquema 1: Santonina y su producto derivado. El comienzo de la fotoquímica en Italia.

En este punto es importante ser conscientes de los conocimientos de la época. Todavía no se tenía información muy avanzada de la estructura de los átomos y Einstein no había desarrollado su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico, que explicaba el comportamiento de la materia al interactuar con la luz. Esto nos lleva al periodo comprendido entre 1908 y 1913, en el que, de forma independiente, Johannes Stark y Albert Einstein formularon la segunda ley de la fotoquímica: *“Existe una relación 1:1 entre el número de moléculas que se descomponen y el número de fotones que se absorben”*. Actualmente, sabemos que esta afirmación no siempre es cierta, ya que la absorción de un fotón puede dar lugar a otros procesos secundarios (Wayne et al., 1996).

Hasta entonces, todas las reacciones químicas investigadas habían sido procesos fotoquímicos. En esa misma década aparece por primera vez el término fotocatalisis. En 1911, Alexander Eibner lo utilizó para describir el blanqueamiento que experimentaba el azul de Prusia en presencia de ZnO (Eibner, 1911). Al mismo tiempo, Bruner y Kozak utilizaron el término fotocatalisis en la degradación del ácido oxálico en presencia de sales de uranio (Bruner et al., 1911). Parecía que el campo de la fotoquímica y la fotocatalisis iban por el buen camino y empezarían a crecer en el ámbito científico, pero los posibles avances se vieron truncados por la llegada de la Primera Guerra Mundial, cuando la química de la luz pasó a un segundo plano. Tuvieron que pasar varias décadas para que los científicos retomaran esta rama de la ciencia.



Si hablamos de fotocatálisis, el óxido de titanio (TiO_2) es el fotocatalizador más utilizado, ya que se ha empleado en todas las aplicaciones y ha demostrado una gran eficacia. En 1938, Doodeve y Kitchener fueron los primeros en demostrar su actividad. Observaron que el TiO_2 en presencia de oxígeno era capaz de degradar colorantes (Doodeve, 1938). Pero si hay un momento que propició el desarrollo de la fotocatálisis, es el comienzo de la década de 1970. Akira Fujishima y Kenichi Honda publicaron en 1972 un artículo en el que demostraron la posibilidad de llevar a cabo la electrólisis del agua para producir hidrógeno utilizando la luz solar y el TiO_2 como fotocatalizador (Fujishima et al., 1972). Al principio se trató como una aplicación anecdótica, ya que el mercado energético estaba dominado por los combustibles fósiles. Sin embargo, en 1973 llegó la primera crisis del petróleo. Se empezó a tomar consciencia de que el petróleo podía agotarse y su precio empezó a fluctuar, lo que llevó a los científicos a plantearse nuevas alternativas energéticas (Coronado et al., 2013). Por último, cabe destacar el trabajo de Kellogg publicado en 1978 (Hedstrand et al., 1978). Fue el primer ejemplo de fotocatálisis de tipo foto rédox para la síntesis orgánica. Hoy en día, este concepto es la base para el uso de la fotocatálisis en varias aplicaciones. A pesar del gran potencial de la fotocatalisis, el interés por este campo fue decayendo. Hubo que esperar hasta la primera década del siglo XXI para que la fotoquímica y la fotocatálisis se afianzaran y se convirtiesen en la aplicación a escala industrial que conocemos hoy en día en nuestra sociedad.

Aquí acaba este viaje a través de los últimos 250 años de estudios relacionados con la luz y su interacción con la materia. La fotoquímica y la fotocatálisis son conceptos desarrollados hace más de un siglo, pero actualmente tienen aplicaciones directas en nuestra sociedad como la purificación del aire, la degradación de contaminantes en agua o la producción de nuevos combustibles. No cabe duda de que, como dijo Giacomo Ciamician, la humanidad seguirá adelante mientras el Sol brille.

Hubo que esperar hasta la primera década del siglo XXI para que la fotoquímica y la fotocatálisis se afianzaran y se convirtiesen en la aplicación a escala industrial que conocemos hoy en día en nuestra sociedad.

LA ASOCIACIÓN IBÉRICA 2 DE LA FOTOCATÁLISIS: MISIÓN Y OBJETIVOS

La Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (en adelante, AIF) es una asociación sin ánimo de lucro y de ámbito ibérico, que incluye los Estados de España y Portugal, y que tiene como vocación la congregación de personas físicas y jurídicas involucradas en aspectos científicos e industriales de la fotocatálisis y sus aplicaciones constructivas en infraestructuras, fundamentalmente urbanas.

Actualmente AIF cuenta con miembros de la comunidad universitaria, de la comunidad científica (centros tecnológicos), con ingenierías, arquitectos, empresas patrocinadoras, así como, con fabricantes y sus aplicadores.

La AIF, en colaboración con las Administraciones públicas y privadas, representa una solución complementaria al problema de la contaminación, tanto en interiores, como en exteriores o aguas; además de proponer otras bondades de efecto directo sobre el ciudadano y las empresas, como la autolimpieza de envoltentes de edificación, su carácter biocida y desodorizante en interiores o la generación de islas fotocatalíticas, en aquellos casos donde los niveles de contaminación por NOx, SOx o COV sean elevados.

Mediante este documento, la AIF pretende concienciar al potencial usuario de esta tecnología, de la importancia que tiene documentarse bien de cómo funciona, de los factores que influyen en su diseño y posteriores prestaciones, y de cómo llevar a cabo un adecuado control de calidad. En este sentido, se recomienda que, antes de realizar la compra y posterior aplicación de los productos fotocatalíticos, se verifique si la empresa fabricante o distribuidora pertenece a AIF, como primer paso.

Esta sencilla acción, fácilmente comprobable entrando en la web <https://www.fotocatalisis.org>, en el apartado socios, permite al usuario saber si los productos fotocatalíticos que comercializa la empresa en cuestión están testados por un laboratorio externo, bajo condiciones normalizadas de ensayo y presentan actividad fotocatalítica.

Además, dicho ensayo o ensayos normalizados han sido revisados por el comité científico-técnico de AIF, el cual está compuesto por varios centros tecnológicos.

Dicho requerimiento, necesario pero no suficiente, es el principal condicionante para ser miembro de AIF.

Adicionalmente se aconseja que antes de proceder a la compra de productos fotocatalíticos, se solicite su Certificado de Eficiencia a AIF y se tengan en consideración las recomendaciones de diseño y aplicación de materiales fotocatalíticos de este documento.

AIF está a disposición de todas las empresas para cualquier aclaración o información adicional que estimen oportuna, antes de la adquisición de materiales fotocatalíticos.

2.1 ÁMBITO DE APLICACIÓN Y OBJETIVOS DE AIF

El ámbito de aplicación de este documento se centra en la fotocatalisis aplicada a multitud de infraestructuras de distintos sectores: transportes, urbanismo, sanidad, edificación, industria y energía.

Los principales objetivos de AIF se resumen en los siguientes apartados:

1. Difusión de la tecnología fotocatalítica en jornadas y congresos.	7. Definir recomendaciones de uso y otorgar certificaciones.
2. Identificar y reunir agentes, investigadores e industriales trabajando en el campo de la fotocatalisis.	8. Poner en contacto los diferentes organismos públicos, profesionales o científicos que estén interesados por el desarrollo de la fotocatalisis.
3. Censar las diferentes aplicaciones fotocatalíticas ligadas a diferentes mercados.	9. Representar a los diferentes agentes, fabricantes y usuarios de la fotocatalisis ante organismos o instancias nacionales, europeos o internacionales.
4. Listar las aplicaciones existentes o potenciales de la fotocatalisis.	10. Apoyar proyectos de investigación o trabajos de interés para la fotocatalisis como por ejemplo, los que tratan aspectos eco-toxicológicos o bacteriológicos.
5. Elaborar un manual profesional, referenciar productos, soluciones y sistemas fotocatalíticos.	11. Firmar acuerdos con cualquier organismo público o profesional en vista a desarrollos implicando la fotocatalisis o alguno de sus aspectos.
6. Establecer normas y test de evaluación de sistemas fotocatalíticos a diferentes niveles, de la concepción de aplicaciones hasta las diferentes fases de industrialización.	12. Publicar aclaraciones en temas específicos.

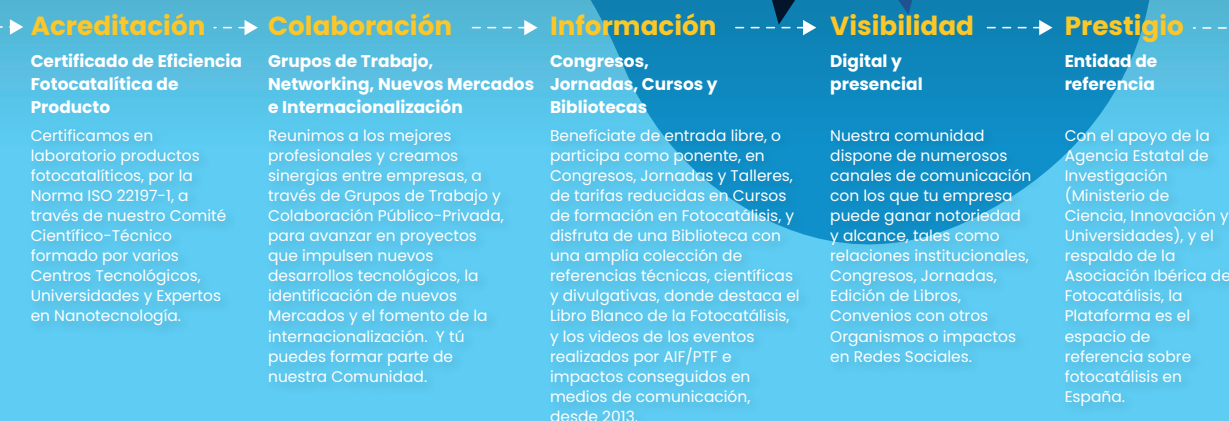
A nivel de representación internacional, los estatutos de AIF también recogen la posibilidad de establecer delegaciones o demarcaciones de la asociación en cualquier punto de la geografía ibérica o de la esfera internacional, designando los cargos directivos que se considere conveniente en cada caso. Estas delegaciones o demarcaciones se regirán por los citados estatutos y por las normas específicas que para cada una se establezcan, siempre con dependencia de la Junta Directiva de la Asociación y conservando la unidad de la misma.

En este sentido, AIF, cuenta desde hace años con representantes iberoamericanos, tales como México, Brasil o Colombia, por citar algunos ejemplos.

2.2 VENTAJAS DE PERTENECER A AIF Y ACTIVIDADES QUE SE ORGANIZAN

PLATAFORMA
TECNOLÓGICA DE
fotocatálisis

Ventajas para socios.



Con la colaboración de la ayuda PIR2022-001336, financiada por CIN/AEI/10.13039/501100011033, Agencia Estatal de Investigación, Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España



Hacia la
Habitabilidad
Sostenible



1. Capacidad de demostrar que el producto presenta actividad fotocatalítica, mediante la incorporación del certificado de eficiencia fotocatalítica de AIF con el siguiente texto asociado: "Todos los socios industriales miembros de AIF han demostrado, mediante una norma estandarizada, llevada a cabo por un laboratorio externo, y revisada por el comité científico-técnico de AIF, que el producto presenta actividad fotocatalítica." (*)

2. Actuar como plataforma de contacto de sus miembros ante empresas nacionales o Internacionales interesadas en la fotocatalisis.

3. Actualización permanente de novedades en nuevos desarrollos, productos y proyectos de investigación del sector.

4. Asesoramiento científico-técnico frente a eventuales dudas o aclaraciones solicitadas por clientes.

5. Participación en jornadas y congresos de fotocatalisis conjuntamente con Administraciones públicas y prescriptores, cuyo objetivo es la difusión de la tecnología y sus productos.

6. Participación en publicaciones, tales como el Libro Blanco de la Fotocatálisis, la Guía de Aplicación Práctica de la Fotocatálisis o redacción de pliegos de condiciones de productos.

7. Participación en proyecto de certificado de actividad fotocatalítica de producto.

8. Disponibilidad de laboratorios de control de actividad fotocatalítica.

9. Participación en campañas de comunicación con los medios (prensa, radio, televisión, redes sociales).

10. Promoción de interacción empresa-ciencia mediante plataformas de participación de I+D+i.

11. Acuerdos marco con entidades de ámbito nacional o internacional para asesoramiento, difusión y desarrollo de proyectos fotocatalíticos.

12. Organización de cursos de formación.

(*) Se han detectado en los últimos años numerosos fraudes de empresas que comercializan productos fotocatalíticos, cuando en realidad no lo son. Tratan de aprovechar las campañas de comunicación de AIF sin formar parte de las mismas. (Para más información ver **sub-apartado 10.1** de Certificado de Eficiencia Fotocatalítica de Producto)

Estas mismas empresas solicitan adherirse a AIF, pero quedan excluidas al no estar en condiciones de demostrar que sus productos poseen capacidad fotocatalítica. Cada año aumenta el número de este tipo de entidades.

2.3 LA PLATAFORMA TECNOLÓGICA DE FOTOCATÁLISIS

La Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis (en adelante, PTF) es un proyecto público, sin ánimo de lucro, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, a través de la Agencia Estatal de la Investigación (AEI), que tiene como objetivo el impulso de la innovación, la difusión de la tecnología fotocatalítica, la transferencia de conocimiento mediante la organización de jornadas, congresos y cursos especializados, el fomento de la colaboración público-privada, a través de grupos de trabajo, y la identificación de nuevos nichos de mercado, tanto a nivel doméstico como internacional.

La PTF nace en 2023 con la vocación de congregar todas aquellas personas jurídicas o físicas que tengan relación con la investigación y la aplicación de tecnologías fotocatalíticas, como empresas, administraciones, ingenieros, arquitectos, urbanistas, profesionales de la salud, etc.

La tecnología fotocatalítica puede ser una gran aliada en la mejora de la calidad del aire y del agua, en la reducción del coste sanitario, en la reducción de los costes de conservación de infraestructuras y la generación de nuevas fuentes de energía.

En la actualidad, se cuenta con numerosos grupos de trabajo activos y medio centenar de miembros asociados, nacionales e internacionales.

La PTF es el último hito de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, que ahora ocupa la secretaría técnica de la entidad. Para más información, consultar la web:

<https://www.ptfotocatalisis.es>



3 PANORAMA DE LA CONTAMINACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

Las últimas estimaciones globales de la Agencia Europea de Medio Ambiente y la Organización Mundial de la Salud sobre la repercusión sanitaria de la contaminación atmosférica son muy preocupantes. Elevan en el año 2022 hasta 238.000 las muertes prematuras en los países europeos por la mala calidad del aire y en España, las víctimas de la contaminación serían ya más de 30.000 al año, quince veces más que los accidentes de tráfico.

El coste económico de daños a la salud causados por la contaminación del aire ha sido cuantificado por el Banco Mundial en 8,1 billones de euros al año en 2021, lo que representa un 6,1% del producto interior bruto (PIB) mundial.

El origen de este problema en nuestras ciudades se encuentra principalmente en las emisiones originadas

por el tráfico rodado, a las que se suman en menor proporción las causadas por las calefacciones, el tráfico marítimo y aéreo, así como determinadas industrias y centrales energéticas.

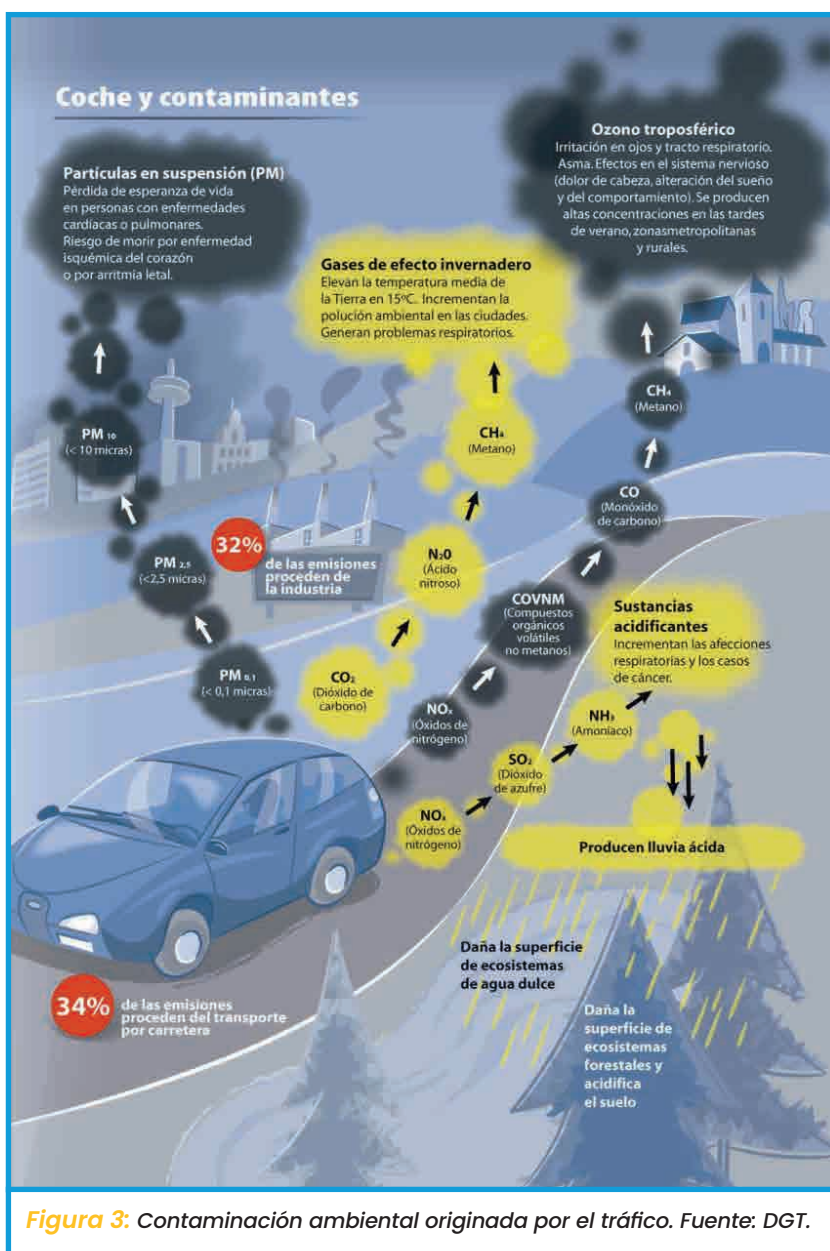


Figura 3: Contaminación ambiental originada por el tráfico. Fuente: DGT.

3.2 CONTAMINACIÓN EXTERIOR

La contaminación exterior es un término amplio usado para describir la contaminación del aire en ambientes al aire libre. La mala calidad del aire ambiental exterior ocurre cuando los contaminantes alcanzan concentraciones lo suficientemente altas como para afectar negativamente a la salud humana y/o al medio ambiente.

La exposición a altos niveles de contaminación del aire puede causar una variedad de resultados adversos a la salud, tales como infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón. De hecho, en los últimos años la propia OMS está empezando a sugerir una posible vinculación entre la contaminación atmosférica y deficiencias en el desarrollo neuronal y la función cognitiva, la diabetes e incluso la ansiedad (Castellote Armero, M. 2015. Seminario 11 Construcciones sanas para un entorno mejor: Calidad de aire interior y fotocatálisis en construcción).

Los impactos más severos de la contaminación afectan a las personas que ya están enfermas y a las comunidades más sensibles: los niños, los ancianos y la población con menos recursos son más susceptibles. Los contaminantes más nocivos para la salud, estrechamente asociados con la mortalidad prematura excesiva, son partículas finas $PM_{2,5}$ que penetran profundamente en los conductos pulmonares.

Aunque en general, la calidad del aire en los países más desarrollados ha mejorado en las últimas décadas, como puede verse en los gráficos que se muestran a continuación (caso de España), los efectos adversos de la contaminación exterior en la salud siguen siendo un problema mundial de salud pública, incluso a niveles relativamente bajos.

A continuación, se muestran los gráficos de evolución de contaminantes (óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO_x), partículas en suspensión: PM_{10} y $PM_{2,5}$ y ozono (O_3) en el ambiente, por fuentes de emisión, entre 2001-2022. Datos obtenidos de ***El informe de Tendencias de la Calidad del Aire en España 2001 – 2022, elaborado por la Subdirección General de Aire Limpio y Sostenibilidad Industrial del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.***



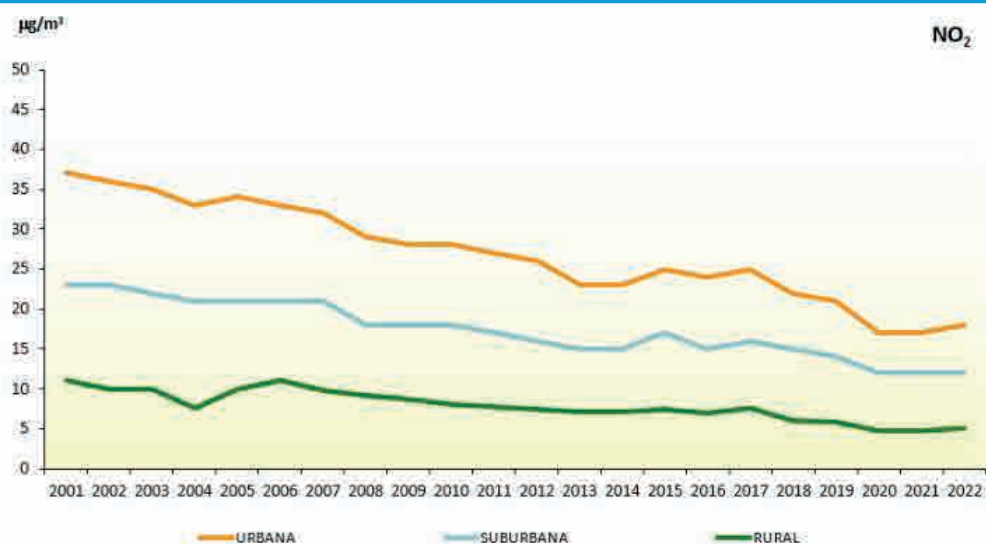


Figura 4: Evolución de las medias anuales de NO_2 (2001-2022) por tipo de área.

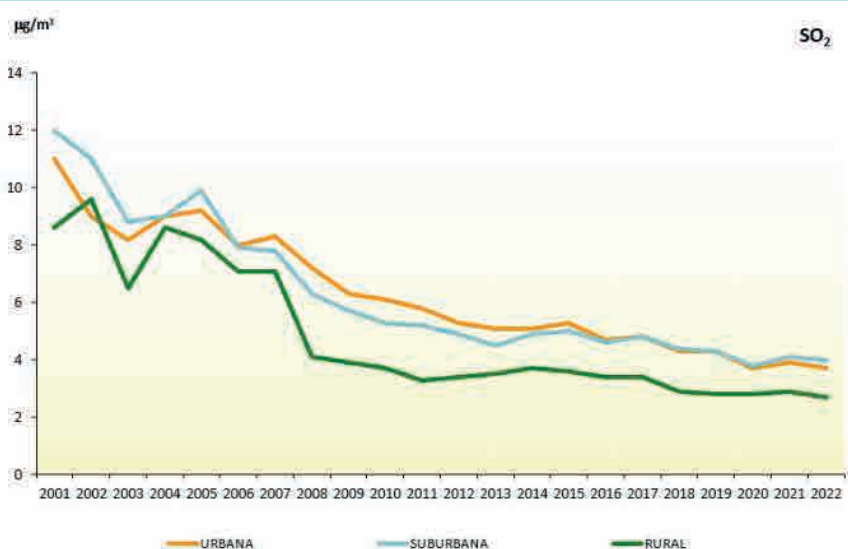


Figura 5: Evolución de las medias anuales de SO_2 (2001-2022) por tipo de área.

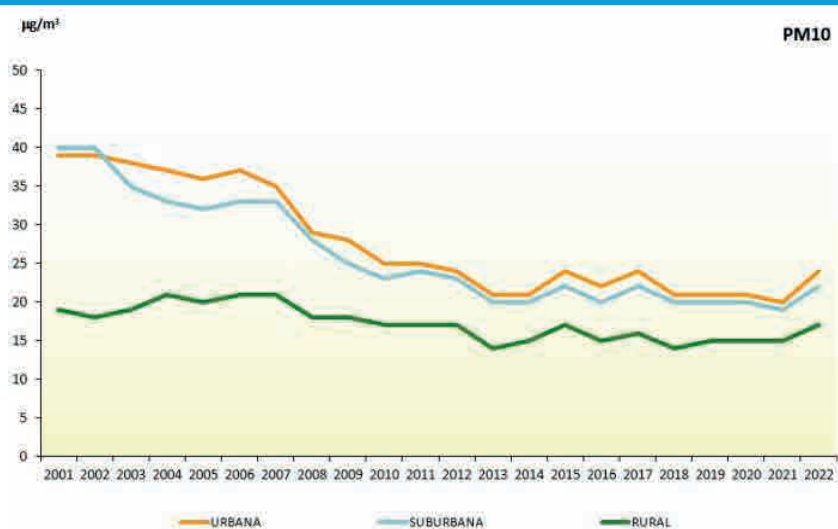
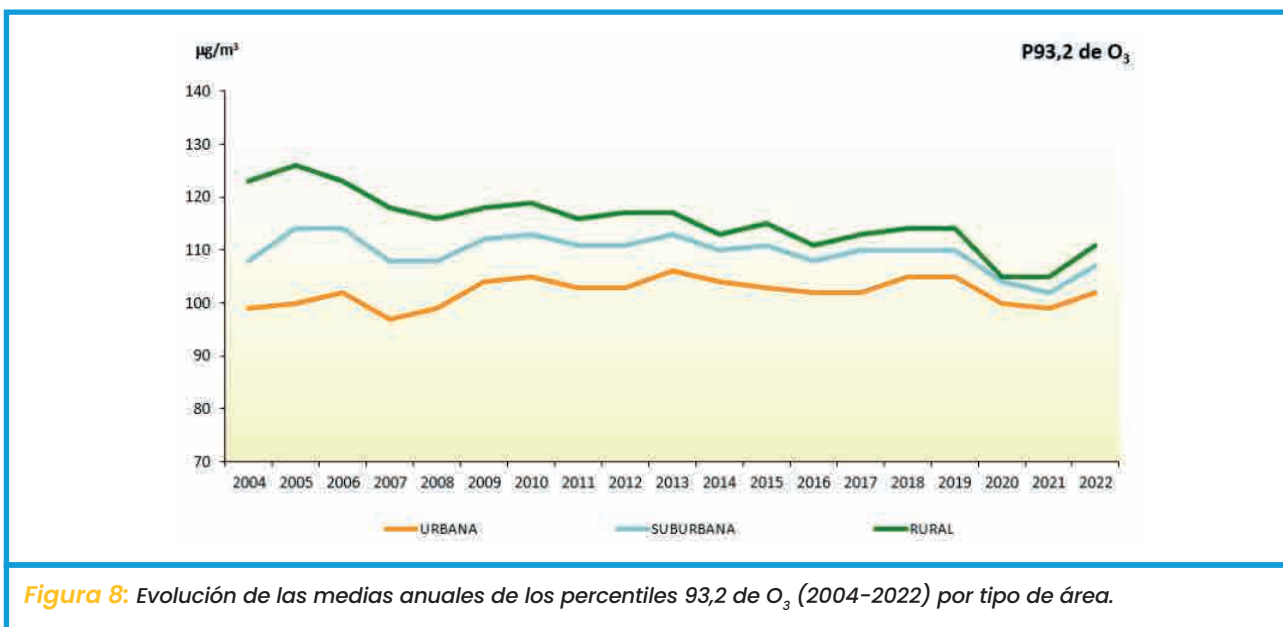
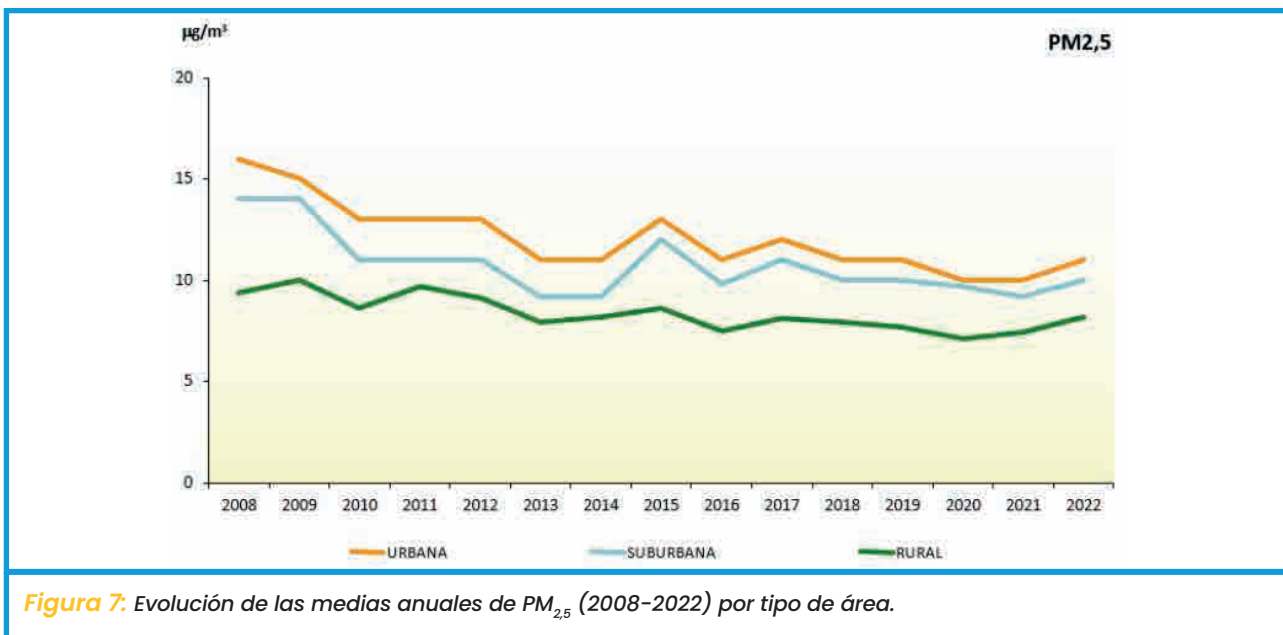


Figura 6: Evolución de las medias anuales de PM_{10} (2001-2022) por tipo de área.



3.3 CONTAMINACIÓN INTERIOR

3.3.1 PANORÁMICA GENERAL

La contaminación del aire interior es el término utilizado para describir la exposición a ciertas sustancias que se encuentran en viviendas, oficinas, colegios, transporte o estaciones de metro, por citar algunos ejemplos.

Lo cierto es que el ser humano pasa más del 90% de su tiempo en espacios confinados, con lo que el nivel de exposición es altamente prolongado si se convive con una mala calidad del aire.

La calidad del aire interior de un edificio la determinan los niveles de contaminantes presentes en el aire que respiramos. Dichos contaminantes pueden tener su origen en el interior del edificio (ocupantes, materiales de construcción, trabajo realizado, uso de determinados productos, gases de combustión, tabaco, etc.) o bien proceder del exterior, tanto de fuentes antropogénicas como naturales.

Se han detectado más de 900 compuestos en el aire interior y algunos contaminantes podrían llegar a estar 2-5 veces más concentrados en el interior que en el exterior de los edificios. La contaminación del aire interior es el octavo factor de riesgo de enfermedades y se calcula que es responsable del 2,7% de la carga global de enfermedad (Fuente: European Lung white book).

La entrada de contaminantes exteriores se produce a través del aire utilizado para la ventilación (natural, híbrida o mecánica), las infiltraciones por juntas, chimeneas, grietas, etc. (forzadas por las diferencias de presión debidas al viento y el gradiente térmico entre interior y exterior) o los cimientos del edificio (por ejemplo, el radón).

Si la concentración de un contaminante determinado es menor en el aire exterior que en el del interior, el intercambio de ambos reducirá su concentración en el aire interior. Sin embargo, si un contaminante se origina en el exterior y no en el interior, ese intercambio producirá un aumento de su concentración en el interior.

El concepto de **Síndrome del Edificio Enfermo** es un término que se usa para describir el malestar de cierto porcentaje de ocupantes de un edificio que pueden experimentar bajo determinadas circunstancias. El malestar puede venir originado por dolores de cabeza, frío o calor excesivo, fatiga, náuseas, irritación de ojos y garganta, etc. Las causas asociadas a este síndrome incluyen la ventilación inadecuada, contaminantes interiores (fotocopiadoras, moquetas, barnices, etc.), materiales de construcción del edificio (piedra de granito, revestimientos de madera, etc.) y contaminación biológica, por microorganismos (virus, bacterias, etc.).

Se estima que aproximadamente el 30% de los edificios de todo el mundo pueden estar afectados por este problema, según SMACNA (Sheet Metal & Air Conditioning Contractors' National Association). (Rey Martínez, y col., 2015.).

3.3.2 INTRODUCCIÓN A LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR

La **calidad del aire interior (CAI)** se refiere a la calidad del ambiente dentro de edificaciones y estructuras, especialmente en relación a la salud y comodidad de los ocupantes. Los estudios sobre CAI se enfocan en controlar los contaminantes del aire que podrían impactar adversamente la salud humana y la calidad de vida. Las personas generalmente pasan aproximadamente el 90% de su tiempo en ambientes interiores, por lo que la calidad del aire en estos espacios es crítica.

Los **principales contaminantes del aire interior** (Zhang et al., 2022) incluyen:

-  **1. Compuestos Orgánicos Volátiles (COV):** Emitidos por una variedad de productos y materiales como pinturas, productos de limpieza, y muebles.
-  **2. Partículas en Suspensión (PM):** Incluyen humo de estufas, inciensos, velas, polvo, polen, esporas de moho, y fibras, que pueden ser inhaladas y afectar los pulmones.
-  **3. Gases Inorgánicos:** Como el monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂), comúnmente originados por la combustión incompleta en estufas, calentadores y vehículos en garajes adjuntos.
-  **4. Bioaerosoles:** Microorganismos como bacterias, virus, y hongos, así como alérgenos como ácaros del polvo y caspa de mascotas (Chmielowiec-Korzeniowska et al., 2021 y Kim et al., 2018).
-  **5. Radón:** Un gas radiactivo proveniente del suelo que se infiltra en las construcciones y es la segunda causa principal de cáncer de pulmón.

Las **fuentes principales de estos contaminantes** son muy variadas, pero se pueden clasificar en tres categorías principales:

-  **1. Fuentes Externas:** Aire contaminado que proviene del exterior, que puede contener contaminación del tráfico, emisiones industriales y otras actividades humanas.
-  **2. Fuentes Internas:** Productos de consumo, materiales de construcción, calderas o cocinas que emplean combustibles, y actividades humanas como encender velas, inciensos, cocinar y fumar.



3. Fuentes Naturales: Bioaerosoles y gases como el radón que provienen del suelo y materiales naturales. En esta categoría se podrían incluir también a los humanos con enfermedades transmisibles por el aire ya que son fuentes de estos bioaerosoles que pueden ser perjudiciales para la salud.

Entender y controlar estas fuentes y tipos de contaminantes es fundamental para mejorar la calidad del aire interior y proteger la salud de las personas que están en su interior, especialmente si su exposición va a ser alta, es decir, pasan mucho tiempo, o se trata de grupos vulnerables.

Según varios estudios llevados a cabo por organismos como la Agencia Europea de Medioambiente o la OMS, los europeos pasamos entre el 80 y el 95% de nuestro tiempo en interiores. Por ello, es de capital importancia evaluar y asegurar que el aire interior no representa peligros para la salud de las personas a corto, medio o largo plazo.

La contaminación del aire es el factor individual que más afecta a la salud en la Unión Europea. Según la OMS, por ejemplo, la exposición a material particulado fino causa al año 238.000 muertes prematuras o la exposición a ozono en episodios de altas concentraciones causa en Europa 24.000 muertes prematuras. Además, hay que destacar los efectos que tiene en enfermedades crónicas como EPOC, cáncer o diabetes.

La legislación aplicable se puede consultar en el **apartado 5** del Libro Blanco de la Fotocatálisis.

La calidad del aire interior (CAI) se refiere a la calidad del ambiente dentro de edificaciones y estructuras, especialmente en relación a la salud y comodidad de los ocupantes

4 LA FOTOCATÁLISIS Y SUS APLICACIONES

4.1 QUÉ ES LA FOTOCATÁLISIS: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La fotocatálisis se define como la aceleración de una reacción química o su iniciación en presencia de una sustancia (el fotocatalizador, usualmente dióxido de titanio) que absorbe luz y participa en la transformación química de los componentes de la reacción. En el caso de la aplicación más habitual, la eliminación de contaminantes, esta reacción es la oxidación de dichos contaminantes en presencia de oxígeno.

La luz adecuada para activar cada fotocatalizador depende de las características específicas de éste. El dióxido de titanio, concretamente, se activa mediante luz UV-A, que supone aproximadamente un 5% de la luz solar. Este proceso propicia la mineralización total o parcial de determinados contaminantes y evita la acumulación de especies o partículas indeseables en el material. Los productos de la mineralización tras la reacción química, se desprenden en forma gaseosa o son eliminados mediante limpieza. En el caso de exteriores, mediante agua de lluvia o limpiezas con agua (tales como operaciones de baldeo de calles, por citar un ejemplo), y en el caso de interiores, mediante la propia limpieza del hogar y las corrientes de ventilación que se producen cuando se airea la casa.

A modo de curiosidad, el dióxido de titanio (TiO_2) se presenta en varias formas minerales, tales como la brookita, la anatasa y el rutilo, siendo las más usadas en fotocatálisis estas dos últimas.



Este compuesto posee una amplia gama de aplicaciones en la industria química en general. El dióxido de titanio se utiliza principalmente en la producción de pinturas (permite mantener el color original en el tiempo) y plásticos (para aumentar su durabilidad), así como en papel (lo hace más blanco, opaco y brillante), tintas de impresión, cosméticos (cremas rejuvenecedoras, cremas de protección solar o pastas dentífricas, por citar algunos ejemplos), productos textiles, farmacéuticos (para alargar la vida de los medicamentos– tal es el caso de las pastillas de ácido acetilsalicílico o numerosos jarabes), alimentarios (alarga la vida de los alimentos) y por supuesto, en construcción (con capacidad fotocatalítica).

Los procesos fotocatalíticos basados en las propiedades del dióxido de titanio han captado un enorme interés, sobre todo desde la década de los setenta, cuando este fenómeno fue relanzado en Japón. Sin embargo, la aplicación de la oxidación fotocatalítica a los materiales de construcción no se ha producido hasta comienzos del siglo XXI en el continente europeo.

Entre las aplicaciones para las que se ha estudiado la actividad fotocatalítica del TiO_2 y de otros fotocatalizadores destacan la eliminación de contaminantes por oxidación en aire o agua y la desinfección y esterilización de superficies. Se ha demostrado que materiales de construcción que incorporan TiO_2 en su composición son capaces de, bajo irradiación solar, oxidar contaminantes en contacto con su superficie, fundamentalmente formaldehído, compuestos orgánicos volátiles (COVs) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos últimos, precisamente, son de particular importancia puesto que se encuentran entre los contaminantes más presentes en aire exterior, con efectos perniciosos para la salud, tanto directos como indirectos a través de la formación de otros compuestos. La fotocatalisis presenta, por tanto, un potencial descontaminador, mediante la conversión de estos óxidos a nitritos y nitratos que son solubles en agua y eliminados mediante el agua de lluvia o de limpieza (Dalton y col., 2002). **En este sentido, dadas la concentraciones habituales de NO_x en atmósferas contaminadas, los nitratos resultantes de su oxidación fotocatalítica no suponen un problema en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) (Ver Subapartado 11.15 de afecciones de los lixiviados a las EDAR).**

Por otro lado, se han realizado múltiples estudios intentando aumentar la eficiencia de los catalizadores bajo la radiación visible (para aplicaciones en interiores). En algunos casos se han usado óxidos semiconductores alternativos, dopaje del dióxido de titanio con metales (wolframio, hierro, etc.), dopaje con no metales (carbono, nitrógeno, azufre, etc.) o mezclas de estas soluciones.

Por último, y como se verá a continuación, también se emplea la fotocatalisis para degradar los contaminantes en agua o la producción de nuevos combustibles, aunque esta última aplicación se encuentra en fase de desarrollo.

4.2 APLICACIONES GENERALES

La importancia científica y tecnológica de la fotocatálisis está muy reconocida a día de hoy, al ser un proceso que permite llevar a cabo reacciones químicas a presión y temperatura ambiente y utilizando la luz como fuente de energía.

Entre las posibles aplicaciones, la eliminación de contaminantes en agua y aire ha sido históricamente la más investigada y es de hecho la única, junto con la de desinfección y autolimpieza de superficies, las que ha encontrado, hasta el momento, un mercado más maduro. Cuando los contaminantes orgánicos (y algunos inorgánicos) entran en contacto con la superficie del fotocatalizador, y en presencia de luz UVA, son oxidados hasta formar CO_2 (en concentraciones mínimas), agua y sales inorgánicas, es decir, son mineralizados. La fotocatálisis heterogénea se enmarca, de hecho, en los llamados “procesos avanzados de oxidación”, cuyo objetivo es precisamente la mineralización de contaminantes para su eliminación.

Las aplicaciones de la fotocatálisis se pueden resumir, de manera general, como sigue:

Tratamiento de aire: descontaminación del aire interior y exterior, eliminación de olores, eliminación del etileno formado en almacenes de frutas y verduras, remediación de suelos por desorción, reducción del polen, etc.

Tratamiento de aguas: depuración o detoxificación de aguas para posterior tratamiento biológico, decoloración de efluentes, potabilización de agua, etc.

Superficies activas: pavimentos, fachadas, cubiertas, telas (para toldos de viviendas y protección de obras de rehabilitación de fachadas), islas fotocatalíticas, y materiales auto-limpiables, auto-esterilizables, con efecto biocida antivaho (antifogging) o antireflejos (antireflecting).

Aplicaciones energéticas: Junto con la creciente preocupación por el agotamiento de los combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero, las aplicaciones energéticas de la fotocatálisis han crecido en importancia científica en las últimas décadas. En este contexto, la fotocatálisis permite no sólo la obtención de combustibles sostenibles a partir de materias primas renovables (CO_2 , agua, biomasa) y energía solar, sino también el almacenamiento de esta última en forma de energía química. En otras palabras, la fotocatálisis ofrece un camino para desarrollar la fotosíntesis artificial. En cualquier caso, hasta el momento, estas aplicaciones se encuentran en una etapa de desarrollo más próxima a la investigación y la demostración que a la entrada en el mercado.

A continuación, se muestran las aplicaciones declaradas por los fabricantes que forman parte de AIF, discriminadas por año y por tipo de mercado, a nivel doméstico e internacional, entre los años 2008 y 2023:

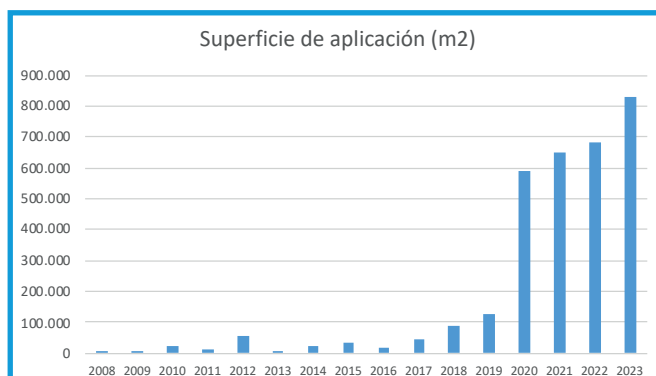


Figura 10: Aplicaciones miembros AIF. Fuente: AIF.

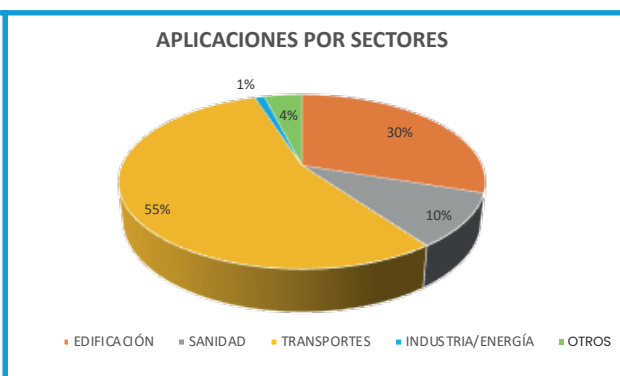


Figura 11: Aplicaciones por sectores de miembros AIF. Fuente: AIF.

La lectura de estas cifras se corresponde con un mercado desconocido dentro de los gestores de infraestructuras, prescriptores y sociedad, en general, y, por tanto, con reducida demanda durante las dos primeras décadas del 2000. Si bien, esa tendencia se invierte radicalmente, con un aumento desmesurado de las demandas, a partir de la pandemia mundial de COVID-19, en 2020, donde las soluciones que permiten la degradación de contaminantes químicos y biológicos, son muy bien recibidas en todo tipo de sectores y mercados, para la mejora de la habitabilidad, y que, además, se encuentran perfectamente alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de 2030.

En los apartados siguientes se procederá a hacer una breve descripción de las posibilidades que las tecnologías fotocatalíticas tienen en el sector de la construcción general (obra civil y edificación), en sus dos versiones, tanto en la de contribución a la mejora de la calidad del aire como en la de reducción de los costes de conservación, así como en el sector de la degradación de contaminantes en aguas, en el sector sanitario general, y en espacios interiores en particular, y en el sector industrial y energético.

4.3 APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN

A continuación, se procede a describir los productos para la construcción existentes en la actualidad, y diseñados a partir de fotocatalizadores, a los que se les atribuyen las siguientes ventajas, desde el punto de vista medioambiental y de reducción de costes de conservación, en su caso, una vez aplicados sobre infraestructuras urbanas:

ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EN EL AIRE: “AIR CLEANING MATERIALS”

Como se ha mencionado anteriormente, la fotocatálisis con TiO_2 utiliza la luz ultravioleta (UV-A) como fuente de activación del catalizador, mientras que en la superficie de éste se adsorben oxígeno, vapor de agua y los gases contaminantes (NO_x , COVs...). En estas circunstancias, se producen las reacciones que dan lugar a la oxidación de los contaminantes, produciéndose en último lugar especies inocuas como dióxido de carbono, agua e iones inorgánicos (Tompkins y col., 2005).

Algunos autores (Obee y col., 1995; Cassar y col., 2003) han indicado que los materiales compuestos de TiO_2 y cemento son capaces de eliminar, además de óxidos de nitrógeno y de azufre, COVs como benceno, tolueno, compuestos clorados y aldehídos, además de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH, del inglés *polycyclic aromatic hydrocarbons*). Asimismo, el TiO_2 puede contribuir también a la eliminación de agentes patógenos como bacterias, virus, endosporas y hongos (Chen y Col., 2009; Howard y Col., 2011).

Otra de las características de la fotocatálisis mediante TiO_2 y luz ultravioleta es su inespecificidad, lo que significa que puede eliminar un amplio abanico de contaminantes atmosféricos, particularmente orgánicos. Ello se debe a la capacidad oxidante de los radicales formados durante el proceso que, en principio, son capaces de atacar a cualquier compuesto orgánico, aunque en la práctica unos son más resistentes a este ataque que otros. Algunos ejemplos de esta variedad de contaminantes eliminables mediante fotocatálisis se encuentran en los trabajos de Tompkins y col. (2005), donde se citan hasta 60 referencias sobre la degradación de diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos en matrices gaseosas, o en la tabla siguiente, con datos tomados de la revisión de Carp y col. (2004).

Tabla 1
Compuestos fotodegradados en fase gas con materiales basados en TiO_2 .
(Parcialmente adaptada de Carp y Col., 2004)

Compuesto		Fotocatalizador
Hidrocarburos	Metano	TiO_2
	Etano	TiO_2
	Propano	TiO_2 ; $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$
	n-Butano	TiO_2
	Hexano	TiO_2
	Heptano	TiO_2
	Ciclohexano	TiO_2
	Etileno	TiO_2 ; TiO_2 /Borosilicato; anillos vidrio; $\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2$
	Propeno	TiO_2
	Metilacetileno	V- TiO_2
	Ciclohexeno	TiO_2
	Benceno	TiO_2 /zeolitas; TiO_2
	Tolueno	TiO_2 ; TiO_2 /sílice; TiO_2 /vidrio, silicio, alúmina; TiO_2 /sílice; PET+celulosa

Tabla 1 (Continuación)
Compuestos fotodegradados en fase gas con materiales basados en TiO₂.
(Parcialmente adaptada de Carp y Col., 2004)

Compuesto		Fotocatalizador
Compuestos Halogenados	DCH (diclorometano)	TiO ₂
	Triclorometano	TiO ₂ /Al ₂ O ₃ ; Fibra vidrio
	TCE	TiO ₂ ; TiO ₂ /monolito
	PCE	TiO ₂
	Cloruro de Vinilo	TiO ₂ ; TiO ₂ /sílice
	1,3-diclorobenceno	TiO ₂
	Dietilamina	TiO ₂
	Propilamina	TiO ₂
	Piridina	TiO ₂
Compuestos Hidroxilados	Metanol	TiO ₂
	Etanol	TiO ₂ ; Pt/TiO ₂ ; Fe/TiO ₂
	2-Propanol	TiO ₂ /SiO ₂ ; TiO ₂
	Butanol	TiO ₂ /zeolitas
	tert-Butil-alcohol	Pt/TiO ₂
	Dietiléter	TiO ₂
	Metil-butil-éter	
Compuestos Sulfurados	Sulfuro de Dietilo	TiO ₂
	Sulfuro de 2-Cloroetil etilo	TiO ₂
Compuestos con Silicio	1,3,5,7-Tetrametilciclotetrasiloxano	TiO ₂
	Octametiltrisiloxano	TiO ₂
Aldehídos, cetonas	Formaldehído	TiO ₂ ; SiO ₂ o WO ₃ -TiO ₂
	Acetaldehído	TiO ₂ ; Pt/TiO ₂ ; V, Cr, Mn, Fe; Ni-TiO ₂ /SiO ₂ ; TiO ₂ /papel
	Propionaldehído	TiO ₂ /mordenita; TiO ₂ ; Pt/TiO ₂
	Metil-etil cetona	TiO ₂ /zeolitas
	Metil-isobutil cetona	TiO ₂
Derivados Halogenados de Ácido Carboxílico	Ácido Dicloroacético	TiO ₂
Compuestos Inorgánicos	NOx	TiO ₂ ; TiO ₂ /hidroxiapatita; TiO ₂ /zeolita; Pt/TiO ₂
	O ₃	TiO ₂ /Sustrato de vidrio; Pt/TiO ₂
Compuestos Orgánico-inorgánico	NO + BTEX	TiO ₂ (interior)
	NO + BTEX + SO ₂	TiO ₂ /AC (interior); TiO ₂ /fibra de vidrio

MATERIALES CON CAPACIDAD AUTOLIMPIANTE (“SELF-CLEANING MATERIALS”)

La incorporación de TiO_2 a materiales de construcción puede contribuir a mantener la limpieza de las infraestructuras (Othani, 2011) durante años, reduciendo los costes de conservación asociados a la limpieza, especialmente en el sector de la edificación. Por una parte, como se ha indicado con anterioridad, al ser activado como fotocatalizador por la componente ultravioleta de la luz solar, el TiO_2 es capaz de eliminar por oxidación una amplia variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos, y esto se aplica también a sustancias presentes en las superficies formando manchas.

Por otra parte, tras su activación, la superficie del TiO_2 (y esto no es común a todos los fotocatalizadores) aumenta su afinidad por el agua hasta volverse superhidrofílica, una propiedad conocida como superhidrofilicidad foto-inducida (Sakai y col., 2003). Esto quiere decir que, bajo luz UV, el ángulo de contacto del agua con la superficie tiende a 0 o, en otras palabras, el agua “prefiere” formar una película continua en lugar de gotas sobre esta superficie, lo que previene la acumulación de partículas y facilita el lavado (Pichat, 2012). Un ejemplo de esto puede observarse en la **figura 12**, donde se representa la transición de una superficie tratada con TiO_2 en la oscuridad (relativamente hidrófoba) a irradiada con luz UV (superhidrofílica), y se aprecia el cambio entre la formación de una gota de agua redondeada y la de prácticamente una película continua aplanada. Estos cambios se deben a modificaciones superficiales del TiO_2 bajo irradiación y, a diferencia del efecto fotocatalítico, no se revierten inmediatamente después de cesar la iluminación, sino que se mantienen incluso durante horas. Este efecto no sólo puede dar lugar a un proceso autolimpiante sino que además la superficie mojada no se empaña al no formarse gotas, lo que se ha aplicado para la fabricación de cristales antivaho, por ejemplo, en retrovisores de coches.

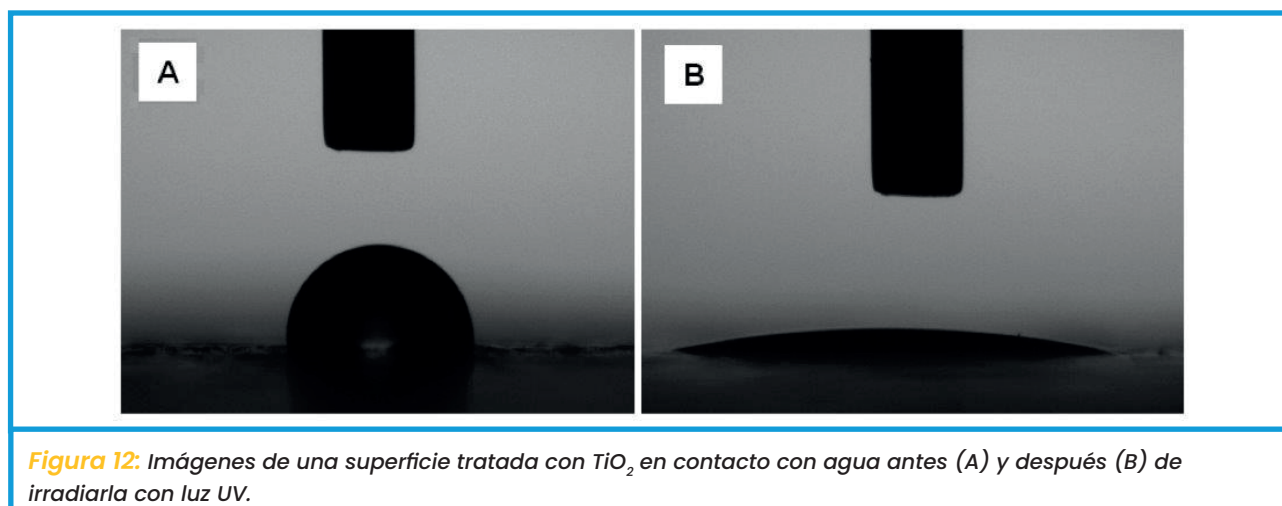


Figura 12: Imágenes de una superficie tratada con TiO_2 en contacto con agua antes (A) y después (B) de irradiarla con luz UV.

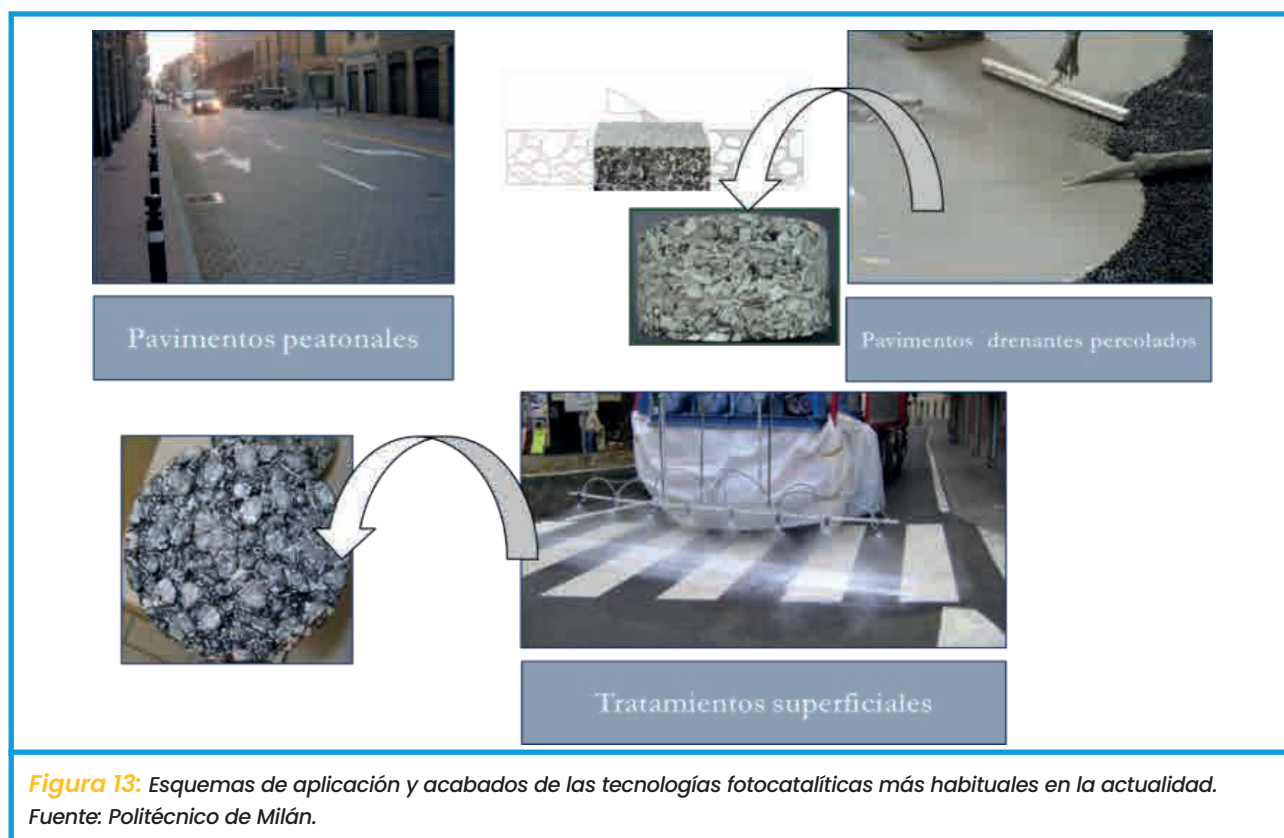
Seguidamente, se proceden a describir los distintos tipos de aplicaciones en construcción.

4.3.1 PAVIMENTOS

En el campo de los pavimentos fotocatalíticos, entendiendo como tales, tanto los peatonales como los destinados al tráfico rodado, se han desarrollado en los últimos años las siguientes tecnologías y aplicaciones:

- Capas de rodadura percoladas con lechadas cementosas especiales.
- Tratamientos superficiales, a partir de microemulsiones.
- Tratamientos superficiales, a partir de pinturas.
- Piezas prefabricadas de hormigón (adoquines o losetas).

En interiores, también podrían encontrarse piezas prefabricadas de cerámica para interiores. Acto seguido, se pasará revista a cada uno de ellos.



Se tiene constancia de que **un número considerable de Administraciones públicas ya cuentan con pavimentos descontaminantes**. Algunos ejemplos son los Ayuntamientos de Madrid, Barcelona, Valencia, Bilbao, Zaragoza, Málaga, Córdoba, Puente Genil (Córdoba), Alcobendas, Tomares (Sevilla), L'Estartit (Girona), Mataró (Barcelona), Alcalá del Valle (Cádiz), AENA, etc. **También empresas privadas, están demandando este tipo de productos, tales como centros médicos privados, estudios de arquitectura urbana, empresas de automoción, etc.**

4.3.1.1 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS PERCOLADOS

Esta técnica consiste en la percolación de una lechada fotocatalítica con base cemento sobre una mezcla bituminosa porosa o drenante, de tipo PA 16 (artículo 543 PG-3), de nueva ejecución.

Esta tipología de pavimentos se lleva a cabo en dos fases. En una primera fase, se coloca una mezcla bituminosa drenante convencional de nueva ejecución, de unos cuatro centímetros de espesor, con un volumen de huecos comprendido entre el 20 y el 25%.

Posteriormente, y en una segunda fase, se percola sobre ella una lechada especial, a partir de dióxido de titanio, cemento, agua, carga mineral, aditivos y fibras en su caso, con objeto de rellenar los huecos de la mezcla bituminosa. De esta forma se obtiene una capa de rodadura con características semirrígidas, con mínima susceptibilidad a la generación de deformaciones plásticas y al derrame de hidrocarburos (aceites, lubricantes, combustible, etc.) y fundentes (durante la etapa de vialidad invernal), además de colaborar con la mejora de la calidad del aire.

En ocasiones, la fabricación de esta lechada requiere el montaje de una planta móvil muy sencilla en la propia obra. La ejecución o percolación de la lechada con base cemento, normalmente se realiza a mano, aunque se podría contar con una maquinaria autopropulsada dotada de rastra de extendido. Dependiendo del uso que se le quiera dar a esta aplicación, podría haber ocasiones donde pudiera ser necesario un tratamiento posterior con granalladora para no comprometer la resistencia al deslizamiento de los vehículos e, incluso, aumentarla.

Estos tratamientos se llevan aplicando en los países más desarrollados del mundo desde hace décadas, pero sólo se conoce su existencia en las dos últimas, especialmente, en aplicaciones llevadas a cabo en Italia y Francia, aunque también en España.

El ámbito de aplicación habitual de estos pavimentos es en intercambiadores modales, carriles bus, zonas de cargo de aeropuertos y puertos, terminales logísticas, zonas de estacionamiento de vehículos, paradas de autobuses, y pavimentos de calles sometidas a altas cargas de tráfico.



Figura 14: Proceso de extendido y percolación de lechada fotocatalítica sobre un pavimento drenante. Fuente: Eurovía.

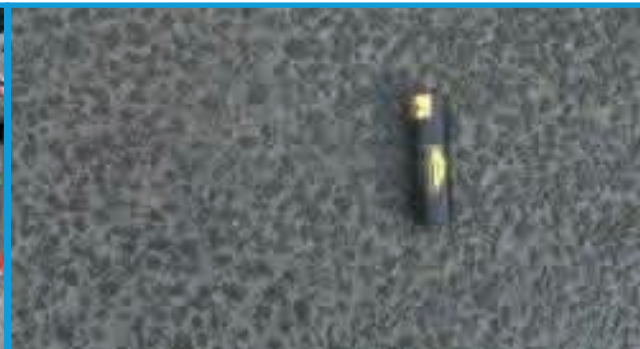


Figura 15: Percolación de lechada especial sobre la capa de mezcla bituminosa drenante. Fuente: Eurovía.



Para mayor nivel de detalle, se sugiere consultar el [apéndice](#) de este Libro Blanco de la Fotocatálisis.

4.3.1.2 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES FOTOCATALÍTICOS A PARTIR DE EMULSIONES

Se trata de una tecnología que se formula (adaptada a cada tipo de superficie de aplicación), a partir de una microemulsión con base acuosa y dióxido de titanio (TiO_2) con estructura nanométrica que penetra en la mezcla bituminosa, permitiendo conservar prácticamente inalteradas las características superficiales de la capa de



rodadura. Es un producto premezclado y listo para su aplicación, que se lleva a cabo mediante una maquinaria específica (montada sobre camión), dotada de un sistema automático de pulverización, cuyo caudal varía en función de la velocidad de avance de la maquinaria. La aplicación sobre la rodadura se puede ejecutar mediante dos técnicas:



1. En frío, sobre rodaduras de nueva ejecución, tras al menos tres meses desde la apertura al tráfico (o cuando se elimine el exceso de betún), con objeto de que el material fotocatalítico tenga acceso directo al árido grueso para generar una alta adherencia entre este y el fotocatalizador.



2. En frío, sobre pavimentos existentes, respetando los tiempos de secado del producto antes de la puesta en servicio. Es aconsejable realizar la aplicación por la noche, con objeto de evitar afecciones al tráfico y a los usuarios. Antes de la aplicación del producto, es necesario limpiar la superficie de la rodadura (o acera) existente con agua a presión, aire comprimido, barrido, etc. La aplicación se debe realizar con el pavimento seco.

Una vez ejecutado este tratamiento superficial, el propio paso del tráfico va desgastando en mayor medida las zonas de rodadas, de manera que se podrían diferenciar tres zonas: las citadas zonas de rodadas; las zonas parcialmente rodadas, que serían las zonas aledañas a la señalización horizontal discontinua de cambio de carril; y las zonas más extremas, que no suelen estar sometidas al paso del tráfico.



Curiosamente, al contrario de lo que se pudiera pensar inicialmente, estudios recientes (Proyecto LIFE MINOX STREET) han demostrado que las franjas longitudinales más expuestas a la abrasión del tráfico son las que más capacidad fotocatalítica están presentando, con respecto a las otras dos zonas. Esta situación puede deberse a la autolimpieza que se puede generar sobre el pavimento por el paso de los vehículos circulantes, por succión.



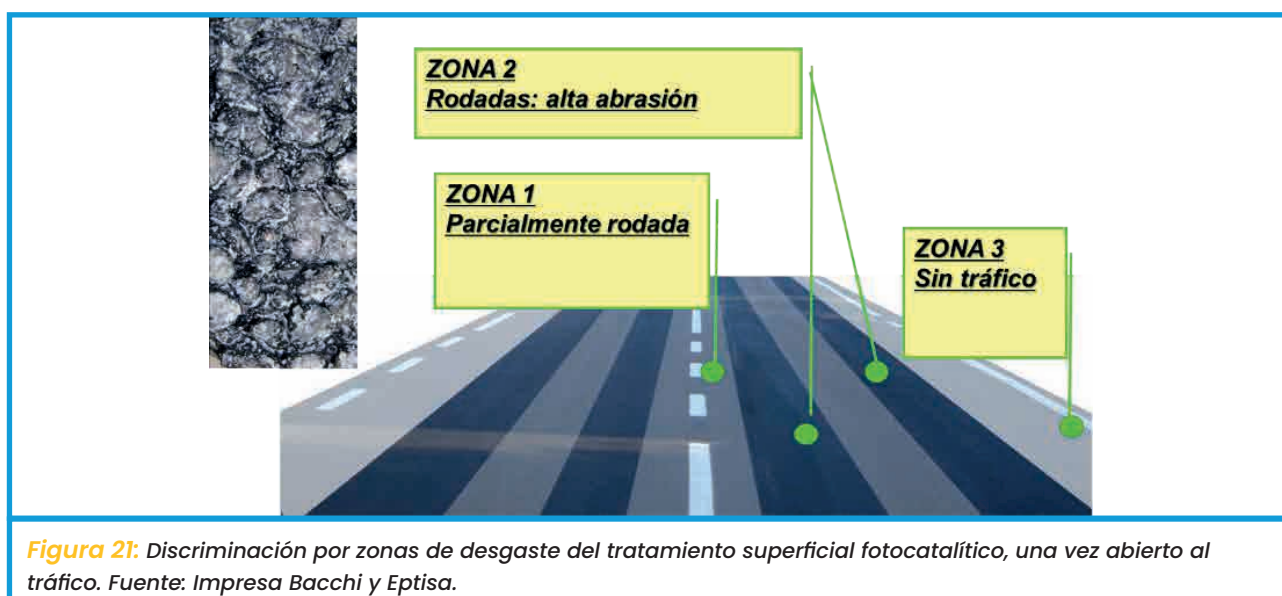
Figura 20: Proceso de pulverización de spray fotocatalítico sobre pavimento existente (Izda.). Detalle de acabado de extendido de spray fotocatalítico en aceras en Milán (Dcha.). Fuente: Empresa Bacchi.

Sin embargo, las franjas longitudinales más extremas podrían ser las que acumularían más suciedad, dificultando la activación del fotocatalizador.

Este tipo de tratamientos, que se llevan aplicando a nivel internacional desde hace décadas, también pueden ser llevados a cabo sobre pavimentos existentes de hormigón, de adoquines, de baldosas o de losetas hidráulicas, tal y como se puede comprobar en el Proyecto LIFE MINOX STREET.

El ámbito de aplicación habitual de estos pavimentos es múltiple: pavimentos de infraestructuras urbanas, periurbanas, travesías, puertos, aeropuertos, pavimentos peatonales, etc.

Para un mayor nivel de detalle, se sugiere consultar el [apéndice](#) de este Libro Blanco de la Fotocatálisis.



4.3.1.3 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS A PARTIR DE PINTURAS

El auge de este tipo de tecnologías en los últimos años ha estimulado la participación en el sector de la pavimentación de empresas que habitualmente procedían de otros negocios. Tal es el caso de las empresas de pinturas. Estas empresas han desarrollado productos muy interesantes, coatings incoloros, fundamentalmente, que se aplican bien manualmente, bien a través de rastras, o bien a través de difusores a cierta presión, imitando el tratamiento superficial antes comentado. Existen fabricantes de estas tecnologías que han declarado unas eficiencias



descontaminantes, a través de organismos públicos de investigación, muy prometedoras a escala laboratorio.

Igualmente están surgiendo varias empresas que están desarrollando pintura de señalización horizontal fotocatalítica para carreteras y entornos urbanos.

Su ámbito de aplicación sería el mismo del caso anterior.

4.3.1.4 PAVIMENTOS DE BALDOSAS O ADOQUINES HIDRÁULICOS FOTOCATALÍTICOS PREFABRICADOS

Se trata de baldosas, losetas o adoquines convencionales con base cemento que son tratados con tecnología fotocatalítica en la propia central de fabricación.

Los últimos milímetros de la superficie de rodadura son los dotados de tratamiento fotocatalítico, con el objetivo de colaborar en la mejora de la calidad del aire.

Cada vez más empresas de prefabricados de hormigón están incluyendo una línea de tratamiento fotocatalítico, aportando un alto valor añadido a sus productos habituales.

El sistema de ejecución de estos pavimentos es similar al convencional sin necesidad de adoptar precauciones adicionales y su ámbito de aplicación está más asociado a pavimentos peatonales, sin renunciar a pavimentos de tráfico rodado, especialmente en entornos urbanos.

Se han llevado a cabo proyectos experimentales con este tipo de materiales, como el Proyecto Light2cat (<https://www.facebook.com/Light2cat>) en Valencia, que han reportado resultados satisfactorios, incluso a escala real, según Fundación Inndea Valencia. (**Ver apartado 8.1.2** Casos de Estudio: Proyecto Light2cat)



Figura 23: Aplicación de loseta fotocatalítica en High Line Sants, Barcelona. Fuente: Breinco.

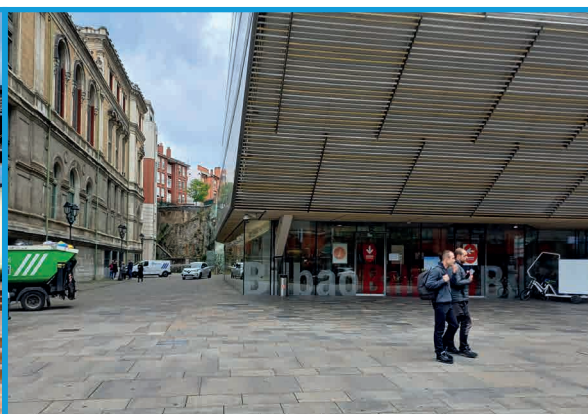


Figura 24: Plaza de Conresa. Mislata, Valencia. Fuente: Heidelberg Materials.

4.3.1.5 PAVIMENTOS CERÁMICOS FOTOCATALÍTICOS PREFABRICADOS

Al igual que ocurre con el caso anterior, se trata de piezas prefabricadas cerámicas, en este caso, que incorporan un fotocatalizador en forma micrométrica, junto con aditivos que permiten fijarlo en el soporte a altas temperaturas durante el proceso de producción.

Normalmente son pavimentos destinados al uso en espacios interiores, con lo cual deben ser activados especialmente con luz visible (artificial, normalmente mediante el uso de luminarias de tipo LEDs), al contrario que los casos anteriores, que lo hacen con luz natural (ultravioleta). Los objetivos de estos pavimentos son la colaboración en la reducción de la contaminación en interiores, así como proporcionar un efecto desinfectante y bactericida continuo, si se han formulado a tal fin.

4.3.2 TÚNELES

El objetivo principal de las aplicaciones en túneles es diverso. Por una parte, conseguir un efecto autolimpiante, que permita mantener en el tiempo las condiciones de luminosidad y visibilidad de los usuarios, y por otro, colaborar en la degradación de contaminantes dentro del túnel, ya que estos, por el grado de confinamiento que tiene este tipo de infraestructuras, son difícilmente dispersables al exterior.

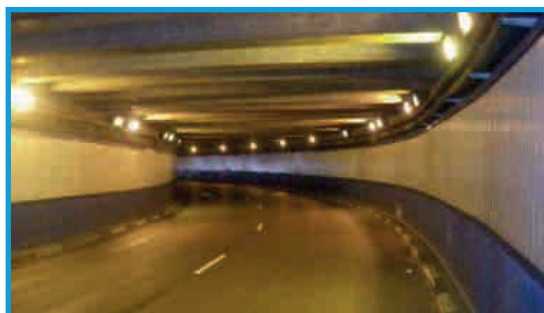


Figura 25: Túnel del Espinillo en Villaverde (Madrid). Fuente: Ayuntamiento de Madrid.

Las pinturas fotocatalíticas que se apliquen sobre el revestimiento de los túneles han de estar formuladas para garantizar una buena adherencia a los soportes sobre los que se coloquen. Además, previamente se deberán hacer pruebas de radiometría para cotejar las longitudes de onda de las luminarias del túnel con las de trabajo del fotocatalizador. Ambas deben estar solapadas.

En el caso de que esto no ocurra, habría dos opciones:

- a) Cambiar las luminarias del túnel a luminarias de tipo LED con radiación dentro del espectro UVA.
- b) Dopar el fotocatalizador para que se active en longitudes de onda asociadas a luz visible.

Antes de la aplicación de las pinturas sobre el revestimiento del túnel, se recomienda la realización de una limpieza previa, para favorecer la adherencia de los materiales fotocatalíticos sobre el soporte. En cualquier caso, la aplicación de la pintura deberá llevarse a cabo sobre un soporte seco.

Para más información se sugiere la consulta del [apartado 8.2.3](#).

4.3.3 ENVOLVENTES DE EDIFICACIÓN

4.3.3.1 REVESTIMIENTO DE FACHADAS CON CERÁMICAS FOTOCATALÍTICAS

Este revestimiento de fachadas consiste en un material cerámico porcelánico descontaminante, en forma de placas, que dota al edificio de una envolvente ecoeficiente capaz de reducir los NOx y disminuir las concentraciones de ácido nítrico, HNO_3 (causantes de lluvia ácida) presentes en el aire. Se trata de un revestimiento con capacidad fotocatalítica, que no requiere de suministro de energía o instalación adicional para su permanente función descontaminante.

Para más información, se sugiere consultar el [apartado 8.3.2](#).

4.3.3.2 PANELES Y MORTEROS BASE CEMENTO FOTOCATALÍTICOS

Se trata de productos con base cemento tradicionales, aplicados sobre envolventes de edificación, que incorporan un fotocatalizador, dióxido de titanio, que les confiere propiedades descontaminantes y autolimpiantes.

A continuación, se muestran algunos ejemplos de aplicación.



Figura 26: Pabellón Real Madrid. Madrid. (España).
Fuente: Heidelberg Materials.



Figura 27: Palacio Expo 2015. Milán (Italia). Italia.
Fuente: Heidelberg Materials.



Figura 28: Edificio Cajamar Pita. Almería (España). Fuente Heidelberg Materials.

4.3.3.3 CUBIERTAS IMPERMEABILIZANTES FOTOCATALÍTICAS

Se trata de láminas asfálticas de impermeabilización convencionales, para cubiertas de edificios, autoprotegidas con un gránulo formulado con dióxido de titanio en forma de anatasa, que colabora en la mejora de la calidad del aire.

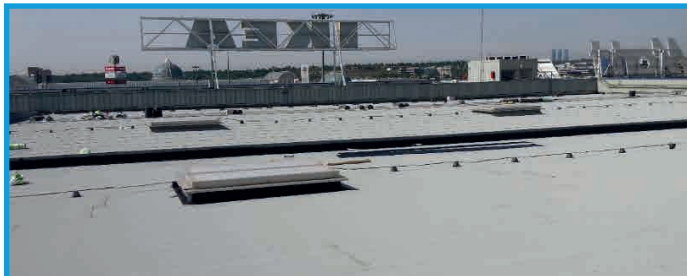


Figura 29: Ejemplo de aplicación de cubiertas de impermeabilización fotocatalíticas en edificios urbanos.

Fuente BMI.

4.3.3.4 REVESTIMIENTOS CON PANELES DE ACERO VITRIFICADO FOTOCATALÍTICO

Las propiedades especiales de estos materiales, que combinan los beneficios del acero y las superficies recubiertas de esmalte vitrificado fotocatalítico, le confieren un fuerte argumento para su aplicación en múltiples usos, como la arquitectura de revestimientos exteriores, murales interiores, fachadas, revestimientos de túneles, clínicas, quirófanos o estaciones de transporte público, entre otros.

Los paneles de acero vitrificado fotocatalíticos son productos terminados industrialmente y, por tanto, no son objeto de aplicación posterior o superficial, tales como pinturas o las emulsiones.

Los esmaltes de acero vitrificado poseen unas magníficas capacidades frente a la durabilidad desde muchas perspectivas: el mantenimiento de la estética, las propiedades mecánicas, físicas, químicas, térmicas y eléctricas.

A continuación, se listan algunos ejemplos de campos de aplicación:



1. Revestimiento de túneles.



2. Revestimientos de pasos peatonales y bicicletas.



3. Revestimientos de estaciones de metro, tren y autobuses.



4. Revestimientos de aeropuertos.



5. Revestimientos de fachadas y ascensores.



6. Revestimientos de fachadas singulares.

-  7. Revestimientos de quirófanos y salas limpias.
-  8. Decoración y serigrafía.
-  9. Diseño artístico e interiores.



Figura 30: Ejemplo de posible aplicación en túneles.



Figura 31: Ejemplo de posible aplicación en estaciones de metro.



Figura 32: Ejemplo de posible aplicación en Terminales aeroportuarias.

4.3.3.5 PINTURAS MINERALES CON BASE SILICATO FOTOCATALÍTICAS

Gracias a la combinación de pigmentos con efecto fotocatalítico y sistemas de ligantes minerales se ha podido desarrollar una solución que aúna durabilidad, autolimpieza y una contribución activa a la mejora de la calidad del aire.

Estas pinturas proporcionan tres efectos:

EFECTO DESCONTAMINANTE

Las pinturas minerales fotocatalíticas ayudan en el exterior a degradar contaminantes atmosféricos como son los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre (SO_2), el amoníaco (NH_3), el monóxido de carbono (CO), disolventes, formaldehído o la suciedad superficial. Esto no disminuye la durabilidad de las pinturas con ligantes inorgánicos.



Figura 33: Fachada con pintura fotocatalítica en el Hotel Atlántico de la C/ Gran Vía de Madrid. Fuente: KEIM.

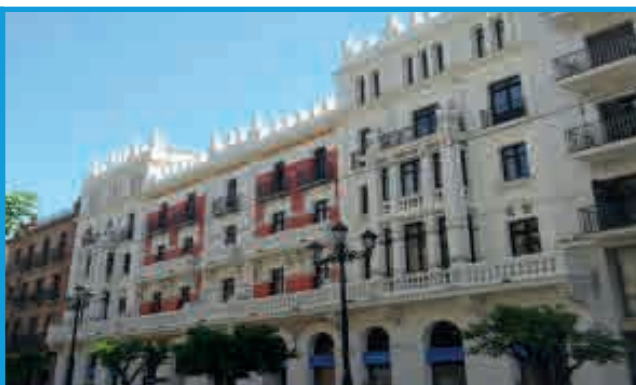


Figura 34: Fachada con pintura fotocatalítica en el Edificio Santa Lucía. Sevilla (España). Fuente: KEIM.

AUTOLIMPIEZA

Una superficie hidrófila favorece la autolimpieza de las fachadas después de entrar en contacto con la lluvia o la humedad del rocío. La pintura de fachadas de silicato con efecto fotocatalítico se vuelve superhidrofílica bajo los efectos de la luz. La pintura reduce la tensión superficial del agua, lo que facilita el arrastre de la suciedad.

Además, estas pinturas al silicato son antiestáticas y no termoplásticas, lo que permite que las partículas de suciedad no se adhieran con facilidad a la superficie.



Figura 35: Fachada con pintura fotocatalítica en Ingeniero La Cierva. Cádiz (España). Fuente: KEIM.

SECADO MUY RÁPIDO

Las pinturas al silicato no forman una película superficial, sino que crean una capa microporosa altamente transpirable. De esta forma, después de una exposición a la lluvia, las superficies secan mucho más rápido que otras con carácter filmógeno. La superficie se mantiene seca durante más tiempo y minimiza condiciones favorables para la proliferación de algas y hongos.

El ámbito de aplicación de estas pinturas es, fundamentalmente, para paramentos exteriores.

4.3.3.6 PINTURAS MINERALES CON BASE CAL FOTOCATALÍTICAS

Estas pinturas, con base cal, también pueden incorporar como aditivo fibras de grafeno, entre otros.

El ámbito de aplicación de estos productos es tanto para exteriores como para interiores. En este último caso con capacidad bactericida y antimoho.



Figura 36: Fachada del Pabellón Antonio García Martínez en Mairena del Alcor. Sevilla. Fuente: Graphenstone.

4.3.4 OTRAS APLICACIONES

Además, es posible encontrar hoy en día en el mercado productos fotocatalíticos más específicos, como coatings incoloros autolimpiantes para protección de esculturas monumentales de ciudades, telas descontaminantes de protección de trabajos de rehabilitación de fachadas, telas descontaminantes para toldos ([ver apartado 8.2.4](#)), y tratamientos fotocatalíticos para las placas fotovoltaicas con capacidad autolimpiante para mejorar la eficiencia de los paneles, por poner algunos ejemplos.

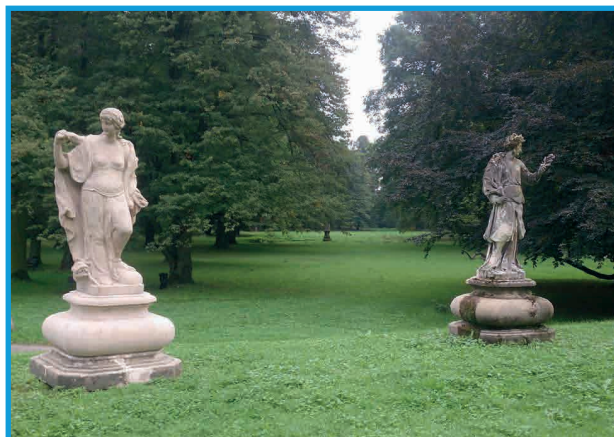


Figura 37: Pintura fotocatalítica sobre monumentos históricos (izda) en comparación con otro sin tratar (dcha). Fuente: Levenger.

4.3.5 CONCEPTO DE ISLA FOTOCATALÍTICA

Se han comentado anteriormente algunas posibilidades de aplicación de los productos fotocatalíticos aplicados sobre las infraestructuras urbanas, pero de manera individual.

Pero, ¿qué ocurriría si se aplicaran todos conjuntamente sobre un barrio o zona de una ciudad con altas cotas de contaminación? Precisamente esto es lo que se conoce como concepto de “Isla Fotocatalítica”. Se trata de una medida pionera en España, pero que, por ejemplo, en países como Japón está ampliamente extendida. Consiste en aplicar este tipo de productos sobre una zona concreta que puede ser una calle o un barrio, donde se den cita todas las aplicaciones anteriormente mencionadas, de tal forma que se creara un “ecobarrio”. Estos conceptos están íntimamente relacionados con las “smart cities” que, aunque van más allá de estas aplicaciones, parten de la base de crear espacios que mejoren la eficiencia energética en las ciudades y la habitabilidad sostenible.

El concepto de “Isla Fotocatalítica” se podría aplicar sobre calles o barrios ya existentes, a nivel de conservación y mantenimiento, o bien sobre nuevas promociones.

En el caso de infraestructuras existentes, podrían aplicarse tratamientos superficiales sobre el firme o la acera existente, siempre y cuando se encuentren en buen estado, y sin necesidad de colocar pavimentos nuevos, repintando el mobiliario urbano (a nivel de conservación), rehabilitando fachadas existentes



Figura 38: Simulación de aplicación del conjunto de materiales fotocatalíticos sobre un barrio genérico de una ciudad, creando una Isla Fotocatalítica.

o impermeabilizando cubiertas existentes. De esta forma, un barrio o calle actual podría ser convertido fácilmente en una Isla Fotocatalítica, sin modificar su configuración.

Lo interesante de estas experiencias sería establecer un protocolo de medidas de niveles de contaminación en la zona donde se pretendiera ubicar la Isla Fotocatalítica, con objeto de comparar estos resultados con los que se obtendrían una vez llevada a cabo la citada isla. Estos protocolos se deben diseñar específicamente, como se puede observar en el apartado de "Métodos de evaluación de actividad fotocatalítica", como se puede observar en el **Apartado 7**.

En el caso de nuevos planes urbanísticos o la creación de nuevas calles o urbanizaciones a menor escala, tendría más sentido incorporar directamente en los proyectos de construcción este tipo de materiales, con el objetivo principal de respirar un aire más limpio dentro de una ciudad, zona o barrio con problemas de contaminación, y de reducir los costes de conservación (limpieza o repintados) de las envolventes de edificación, dado su carácter autolimpiante.

Previamente a la etapa de proyecto, se recomienda que las Administraciones públicas o los promotores privados se pongan en manos de asociaciones especializadas, como puede ser AIF, para que les asesoren en cuanto a las localizaciones, diseños y monitorización de estas islas fotocatalíticas.

En el caso de infraestructuras existentes, podrían aplicarse tratamientos superficiales sobre el firme o la acera existente, siempre y cuando se encuentren en buen estado

4.4 APLICACIONES EN LA DEPURACIÓN DE AGUAS

4.4.1 LA PROBLEMÁTICA DEL AGUA

Hasta que la ciencia moderna, tal y como la conocemos hoy en día, comenzó a descubrir los elementos y reacciones químicas, eran cuatro los considerados elementos de la naturaleza por las doctrinas antiguas, y que explicaban el comportamiento físico del mundo: el agua, la tierra, el fuego y el aire, a los que en ocasiones se añadía el éter. El origen de la teoría de los cuatro elementos se extendió desde la época presocrática hasta el Renacimiento, y queda reflejada su importancia en multitud de obras artísticas. Decía Leonardo da Vinci que “El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza”, y razón no le faltaba, porque el agua ha sido y será siempre motor de desarrollo económico, cultural y social. Desde tiempos antiguos, las civilizaciones han utilizado y aprovechado los recursos hídricos para alcanzar el desarrollo tecnológico, es tal la importancia del agua para el desarrollo humano, que es incluso objeto de disputas políticas y conflictos bélicos.

En pleno siglo XXI, la sociedad tiene ante sí importantes desafíos entorno a la gestión del agua, como por ejemplo la escasez de recursos hídricos, y el empeoramiento de la calidad de dichos recursos (Javan et al., 2024). La principal causa de estas problemáticas tiene el origen en el continuo aumento demográfico y el cambio en el régimen de precipitaciones como consecuencia del cambio climático. Hay que tener en cuenta que cada vez somos más personas en el planeta, utilizando la misma cantidad de agua, y cada vez son más las actividades humanas en las que se utiliza (industrial, energético, agrícola, recreativo, etc.). Tras cada uso del agua que hacemos, alteramos sus características físico-químicas y biológicas, convirtiendo a estas aguas en aguas residuales que deben ser tratadas para no mermar las características de los ecosistemas. A día de hoy, aproximadamente el 80% de las aguas residuales que se generan en el planeta, se vierten sin ningún tipo de tratamiento y su carga de contaminación van en aumento (Rodríguez et al., 2020). Es de tal importancia a nivel mundial la gestión de las aguas residuales, que las Naciones Unidas definieron un Objetivo de Desarrollo Sostenible específico para la mejora de la gestión del agua potable y el saneamiento (ODS 6). La definición de políticas de acción para la consecución de metas en este ODS 6, contribuirá de manera indirecta a la obtención de objetivos en otros ODS. Además, es necesario cambiar el paradigma sobre las aguas residuales, y comenzar a visualizarlas como un recurso no explotado, una fuente de oportunidades, que bien gestionada contribuiría a generar beneficios sociales, ambientales y económicos (Guerra-Rodríguez et al., 2020).

La depuración de las aguas residuales es, por lo tanto, un reto que abordar a nivel mundial. Incluso en países como España, todavía hay camino que recorrer, pues se sigue sin depurar el 100% de nuestras aguas residuales, y en breve se deberá abordar la entrada de vigor de una Directiva Europea que sustituya a la ya obsoleta 91/271/CEE, y que marcará unos límites más exigentes para los contaminantes que ya estábamos eliminando anteriormente (sólidos, materia orgánica y nutrientes) y que adicionalmente establecerá la obligación de eliminar los conocidos como

contaminantes de preocupación emergente (CPE). Los CPE son sustancias, generalmente orgánicas, que por su alta estabilidad química y baja biodegradabilidad, no se eliminan en los sistemas de tratamiento biológico. Estas sustancias provienen de diferentes actividades humanas (industriales, agrícolas, ganaderas, domésticas, etc.) e incluye diferentes grupos de sustancias clasificados generalmente por su utilidad, pudiendo destacar la presencia de fármacos, antibióticos, hormonas, pesticidas, plaguicidas, retardantes de llama, inhibidores de corrosión, productos de cuidado personal, etc. (Sandoval et al., 2024).

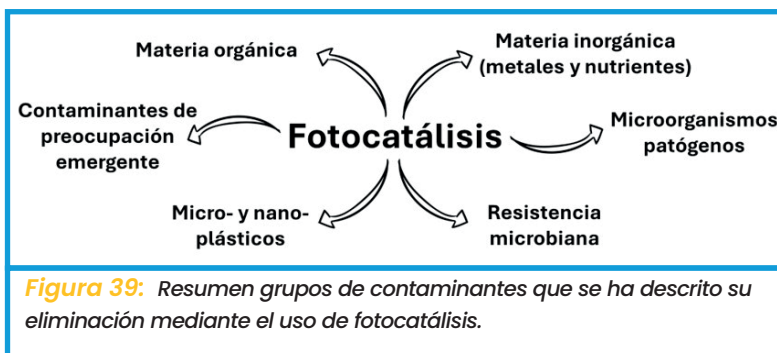
Estas sustancias llevan décadas siendo liberadas en bajas concentraciones (ppb o ppt) a los ecosistemas sin ningún tipo de tratamiento, y las consecuencias o riesgos medioambientales o para la salud humana están todavía en ocasiones en entredicho, pero comienza a publicarse diferentes estudios que alertan de los peligros derivados, por ejemplo, en la fauna acuática. El desafío va a ser mayúsculo, pues las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (E.D.A.R.) actuales deberán adaptarse a la nueva legislación, incorporando entre sus etapas tratamientos terciarios para la reducción de nutrientes, y tratamientos cuaternarios para la eliminación de contaminantes de preocupación emergente y la desinfección.

La depuración de las aguas residuales, por lo tanto, contribuiría a la mejora de la salud de los ecosistemas, pero la realidad es que se puede ir mucho más allá. En los últimos años, la regeneración y reutilización de las aguas residuales se ha convertido en una estrategia que permite incrementar la cantidad de recursos hídricos disponibles en zonas de alto estrés hídrico, y que, a su vez, mejora la calidad de los ecosistemas al disminuir tanto el volumen de vertido como la carga contaminante vertida (Guerra-Rodríguez et al., 2020). España es líder europeo y uno de los países punteros a nivel mundial en la reutilización de aguas residuales regeneradas. Lo que comenzó siendo una práctica necesaria en zonas puntuales del territorio nacional como consecuencia de la escasez hídrica, véase el caso de todo el sudeste español, ahora es una práctica habitual en territorios donde, incluso el recurso hídrico no escasea.

Actualmente en España, la reutilización de las aguas residuales abarca tanto aplicaciones industriales como agrícolas, urbanas, recreativas y ambientales, según se estipula en el RD 1620/2007, y desde el año 2020, existe un reglamento a nivel europeo que marca los requisitos mínimos para la reutilización del agua en agricultura (reglamento UE 2020/741). Entre los aspectos más críticos de la reutilización de aguas residuales está el minimizar los posibles impactos a la salud humana, por ello, las etapas de desinfección son las etapas más importantes y las que marcan el tipo de reutilización que se le pueda dar al agua. Adicionalmente, el nuevo reglamento 2020/741 anteriormente mencionado, abre la puerta a controlar la presencia de contaminantes de preocupación emergente en las aguas regeneradas, siempre que se determine que su presencia puede suponer un riesgo. La reutilización de aguas residuales presenta importantes beneficios no sólo ambientales como, por ejemplo, evitar la sobreexplotación de acuíferos o la eliminación de sustancias contaminantes que, de otra forma, no se eliminaría en el proceso de depuración, sino también económicos, pues al final se requiere una menor inversión de recursos. Sin olvidarse, que las aguas residuales regeneradas son interesantes desde el punto de vista de la aplicación en determinadas actividades como la agricultura, debido al contenido en materia orgánica y nutrientes.

4.4.2 CONTAMINANTES QUE SE PUEDEN ELIMINAR POR FOTOCATÁLISIS

En la sección anterior ha quedado demostrado que hay importantes desafíos en relación a la gestión de los recursos hídricos, especialmente en relación a la mejora de la calidad. Depuración y reutilización de las aguas residuales urbanas, sin olvidarse de la potabilización, son etapas del ciclo integral del agua donde la fotocatálisis se puede convertir en un importante aliado, desarrollando materiales y tecnología capaz de mejorar las prestaciones de los sistemas de tratamiento convencional y, sobre todo, frente a la presencia de contaminantes de preocupación emergente altamente refractarios. En el siguiente apartado se pretende hacer un repaso de los principales contaminantes que pueden ser eliminados mediante técnicas fotocatalíticas. La **figura 39** hace un resumen de los diferentes grupos de contaminantes para los que se ha reportado la fotocatálisis como técnica efectiva en la eliminación.



MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica en el agua puede provenir de diversas fuentes, como residuos agrícolas, industriales o urbanos. Al liberarse al agua, su descomposición consume oxígeno durante el proceso, lo que resulta en la disminución de los niveles de oxígeno disuelto en el agua. Esto puede provocar la muerte de organismos acuáticos sensibles y la degradación general del ecosistema acuático, además de que algunos compuestos orgánicos por sí mismos pueden ser tóxicos para la vida acuática. La materia orgánica se divide en una fracción soluble y particulada, que a su vez esta última se subdivide en una fracción suspendida (no sedimentable) y otra sedimentable. Las fracciones anteriores a su vez están compuestas por componentes biodegradables y no biodegradables.

La materia orgánica puede ser determinada a través de diferentes parámetros. La fracción biodegradable se mide en términos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), mientras que para la fracción tanto biodegradable como no biodegradable se requiere el uso de demanda química de oxígeno (DQO) o a través de la medida del Carbono Orgánico Total.

Hay que destacar que, en términos generales, las aguas residuales urbanas son altamente biodegradables, y la eliminación de la materia orgánica puede llevarse a cabo fácilmente mediante tratamientos de tipo biológico. Sin embargo, los tratamientos de depuración convencionales tienen dificultades para la eliminación de la fracción no biodegradable, especialmente si esta materia orgánica está solubilizada en el agua. Es aquí donde la

fotocatálisis tiene capacidad de acción, y donde su potencialidad en la generación de especies oxidantes permitiría la degradación y mineralización de esta fracción orgánica refractaria. Esta capacidad también es de gran utilidad para la eliminación de materia orgánica refractaria en aguas residuales industriales, de sectores como la industria farmacéutica, química, etc. (Wang et al., 2019; Li et al., 2022).

MATERIA INORGÁNICA Y ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES

Al igual que la materia orgánica, la inorgánica la podemos clasificar en diferentes fracciones como la particulada y la soluble. Entre los principales contaminantes inorgánicos que podemos encontrar en las aguas residuales, cabría destacar los metales (ej. plomo, mercurio, cadmio o arsénico), cuya procedencia fundamentalmente son las actividades industriales y mineras. Otro ejemplo de contaminación por materia inorgánica son los denominados “nutrientes”, como los derivados de nitrógeno (nitrato, nitritos y amonio) y el fósforo (fosfatos) que, aunque son esenciales para el crecimiento de las plantas, su vertido incontrolado causa problemas de eutrofización.

Finalmente, destacar los compuestos inorgánicos disueltos, que pueden incluir cloruros, sulfatos, carbonatos y bicarbonatos, así como gases disueltos como el dióxido de carbono o gases de sulfuro.

Son múltiples los trabajos de investigación que demuestran la capacidad de la fotocatalisis en la eliminación de diferentes sustancias inorgánicas de las anteriormente mencionadas, especialmente centrando esfuerzos en la eliminación de metales y nutrientes (Priyanka et al., 2019; Xu et al., 2024).

MICROORGANISMOS PATÓGENOS

Los microorganismos patógenos son aquellos organismos con capacidad de causar enfermedades al ser humano. Están compuestos por bacterias, virus, protozoos y hongos, y pueden transmitirse fácilmente por el agua provocando enfermedades de origen hídrico. Fue el físico John Snow en el siglo XIX el que descubrió que la enfermedad del cólera que en aquel momento azotaba con fuerza la ciudad de Londres, se transmitía a través de la bacteria *Vibrio Cholerae* y estaba presente en las fuentes de agua de las que se abastecían los ciudadanos londinenses. Este momento es el nacimiento de la epidemiología moderna.

Desde aquel momento, se consideró la necesidad de desinfectar el agua de forma previa al consumo humano, logrando uno de los mayores hitos en el alargamiento de la esperanza de vida del ser humano. El desinfectante más utilizado a nivel mundial es la cloración. El uso de cloro y derivados se considera como el desinfectante ideal por diferentes motivos, entre los que está la eficacia del proceso, el aspecto económico, la facilidad del proceso o la alta disponibilidad de cloro. Además, presenta características muy interesantes como, por ejemplo, la capacidad de efecto residual para evitar recontaminaciones posteriores. Sin embargo, la cloración también presenta desventajas, y es que la reacción del cloro con la materia orgánica provoca la generación de subproductos de desinfección como, por ejemplo, los trihalometanos o los ácidos haloacéticos. Este tipo de subproductos tienen propiedades carcinogénicas, por lo que su liberación al medio o consumo por

parte del ser humano supone un grave problema medioambiental y para la salud. Es en este punto donde la fotocatálisis tiene un papel importante. Se ha demostrado ampliamente que la capacidad oxidante generada a través de la fotocatálisis, tiene capacidad para la eliminación de bacterias, virus, parásitos y hongos. Del mismo modo, en algunos casos, además, la propia composición de los materiales tiene capacidad antibacteriana (Nuñez-Salas et al., 2021; Moradi et al., 2022; Martín et al., 2023).

CONTAMINANTES DE PREOCUPACIÓN EMERGENTE

Los contaminantes de preocupación emergente (CPE) son sustancias químicas que, generalmente, no están sujetas a regulación y pueden ser detectadas en concentraciones bajas o muy bajas mediante técnicas analíticas. Esto genera una preocupación especial debido a que sus efectos adversos a largo plazo sobre el medio ambiente y la salud humana aún no se comprenden completamente. Los CPE pueden ser compuestos de diversos orígenes y naturalezas químicas cuya presencia en el medio ambiente, o las consecuencias de su presencia, han pasado desapercibidas en gran medida y permanecen sin regular.

Organizaciones internacionales y agencias nacionales de países específicos han propuesto algunas definiciones de los CPE, que abordan diferentes aspectos del problema y pueden ayudar a comprender su alcance y las consecuencias asociadas. Debido a la presencia de CPE en bajas concentraciones, algunos miembros de la comunidad científica han acuñado el término "microcontaminantes". Estos compuestos están presentes en aguas residuales, suelo, aguas subterráneas o agua potable en concentraciones bajas a muy bajas (pg L^{-1} a ng L^{-1}).

Los CPE pueden clasificarse de varias formas según su origen, uso, efectos potenciales o destino ambiental. Algunos de los principales grupos considerados como CPE son: productos farmacéuticos y veterinarios, desinfectantes y biocidas, drogas ilícitas, productos químicos para el cuidado personal y otros productos relacionados con el estilo de vida, productos químicos industriales, aditivos alimentarios, subproductos de la desinfección del agua, nanomateriales, patógenos transmitidos por el agua y toxinas biológicas.

Debido a la estabilidad química y baja biodegradabilidad de la mayoría de los CPE, la fotocatálisis se ha convertido en una de las tecnologías más estudiadas en la aplicación del tratamiento del agua, con el fin de eliminar dichas sustancias (García-Muñoz et al., 2020; Amiri et al., 2022).

MICROPLÁSTICOS Y NANOPLÁSTICOS

Los microplásticos son fragmentos de plástico que tienen un tamaño que va desde menos de 5 milímetros hasta 1 micrómetro y los nanoplásticos son aquellos fragmentos con un tamaño inferior a 1 micrómetro. Sus orígenes, fundamentalmente, se encuentran a partir de la fragmentación de objetos de plástico más grandes, así como de la abrasión de productos sintéticos como la ropa y los neumáticos. Su presencia en las masas de agua está totalmente extendida, y no solo hablamos de su presencia en las aguas de mar, sino también en las aguas residuales e incluso en las aguas potables. Representan una

creciente preocupación ambiental, pues su tamaño diminuto les permite infiltrarse en los ecosistemas más diversos y ser ingeridos por organismos marinos, lo que plantea riesgos para la salud de la vida acuática y, potencialmente, para la salud humana.

Los estudios de aplicación de fotocátalisis en la eliminación de nanoplásticos son muy emergentes. Hay que tener en cuenta la dificultad que supone la degradación de macromoléculas del tamaño de los micro-, nanoplásticos mediante este tipo de tecnología oxidativa, y que en muy pocas ocasiones permite alcanzar la mineralización completa, pero si la transformación a moléculas orgánicas más sencillas. Además, la degradación de micro-, nanoplásticos con procesos fotocatalíticos dependerá de varios factores críticos, como las propiedades de los plásticos. Por ejemplo, una partícula pequeña y de color oscuro tendrá más probabilidades de degradarse por un proceso fotocatalítico debido a la alta área de superficie específica y la fuerte capacidad de absorción de luz, mientras que un microplástico en forma de película tendrá menos posibilidades de degradación debido a un medio de reacción menos oxigenado e iluminado (Jiang et al., 2021), (Llorente-García et al., 2020), (García-Muñoz et al., 2022).

RESISTENCIA MICROBIANA

La resistencia microbiana hace referencia a la capacidad que han desarrollado algunos microorganismos, especialmente bacterias y hongo, a resistir a aquellos antibióticos desarrollados con el objetivo de matarlos. Esta resistencia puede ocurrir naturalmente debido a la selección natural y la evolución de las poblaciones microbianas, pero también puede ser impulsada por el uso inadecuado o excesivo de antimicrobianos en la medicina humana, la agricultura y otros sectores. La Organización Mundial de la Salud considera a la resistencia microbiana como la pandemia silenciosa, y año a año se observa un mayor número de muertes asociadas a infecciones para las que ya no hay antibióticos capaces de afrontarlas.

De nuevo, la fotocátalisis ha demostrado la capacidad de reducir la prevalencia de genes de resistencia antimicrobiana en muestras de aguas residuales, así como ya se comentó anteriormente, la capacidad de reducir la concentración de antibióticos en las aguas (Dunlop et al., 2015) (Hwangbo et al., 2019) (Chen et al., 2023).

4.4.3 FOTOCATALIZADOR EN POLVO

Dentro de las aplicaciones de la fotocátalisis a la descontaminación en fase acuosa existe una extensa clasificación de semiconductores utilizados como fotocatalizador. De entre todos ellos, sin duda el más empleado es el dióxido de titanio, TiO_2 , en sus diferentes fases: anatasa, rutilo y brookita.

En los procesos fotocatalíticos en agua, el catalizador de TiO_2 se aplica generalmente en forma de polvo suspendido o comúnmente conocido como modo *slurry*. Su amplio uso se debe a su alta actividad, gran estabilidad dado que no presenta fotocorrosión, bajo impacto ambiental y además a su relativo bajo coste.

Tabla 2
Fotocatalizadores más empleados en procesos de desinfección en agua bajo luz visible

Catalizador	Microorganismos	Concentración del catalizador	Intensidad de luz visible (W/m ²)	Eficiencia (%)	Ref.
TiO ₂	Escherichia coli	0,1 g/L	50	100 (2 min)	Chai et al, 2000
Fe ₂ O ₃ -TiO ₂	V. fischeri	1 g/L	5,5	99,4 (240 min)	Baniamerian et al., 2008
Cu-TiO ₂	Bacteriophage f2 y E. coli 285	50 mg/L	70	100 (240 min)	Zheng et al., 2018
C-TiO ₂	L. monocytogenes	1 g/L	0,2	100 (150 min)	Shim et al, 2016
rGO/TiO ₂	E. coli	10 mg/L	nd	99,999 (150 min)	Cruz-Ortiz et al., 2017
Au/TiO ₂	E. coli	100 mg/L	Nd	100 (240 min)	Guo et al., 2015

Sin embargo, una de las principales limitaciones que éste presenta es la necesidad de luz dentro del rango UV para ser excitado y esto corresponde a un 5% del espectro de la luz solar. Este hecho ha provocado el desarrollo de diversas estrategias como el dopaje del TiO₂ con otros elementos, generalmente aniones (N, Cu, Au, etc.), o su empleo conjunto con otros semiconductores (Fe₂O₃, C, óxido de grafeno) para promover la absorción de luz en el rango del espectro visible.

Estas estrategias se han llevado a cabo tanto para tareas de desinfección como de descontaminación de contaminantes orgánicos en fase acuosa.

En la tabla 2 se muestran, a modo de ejemplo, los catalizadores más comúnmente estudiados para su empleo en desinfección bajo luz visible y a modo de comparación el TiO₂ bajo luz UV.

Tabla 3
Fotocatalizadores más empleados y contaminantes estudiados

Fotocatalizador	Contaminante	Fuente de luz	Eliminación (%)	Referencia
TiO ₂	Fenol	Luz UV	NA	Matthews et al., 1990
WO ₃	Hg (II)	Luz visible	35	Wang et al., 1993
ZnO	Cr	Luz solar	70 (6h)	Domenech et al., 1990
CdS	2,4 diclorofenol	Luz UV	55	Ku et al., 1992
Fe ₂ O ₃	Cr(VI)	Luz UV	37	Aguado et al., 1991
SrTiO ₃	Cr(VI)	Luz UV	4	Yoneyama et al., 1979

Mediante el empleo de los diferentes catalizadores se obtienen elevados rendimientos de desinfección en franjas de tiempo razonables (**Tabla 2**) por lo que las estrategias empleadas sí permiten cumplir los objetivos de un uso de luz de menor energía para la desinfección.

Además, por otro lado, ha habido un amplio desarrollo de fotocatalizadores a lo largo de la historia aplicados a la eliminación de contaminantes en fase acuosa. Los fotocatalizadores clásicos más empleados se desarrollaron entre los años 1960-1990. En la siguiente tabla puede verse los más comúnmente estudiados, así como su eficiencia.

A día de hoy, hay una innumerable variedad de fotocatalizadores que se han empleado para el proceso fotocatalítico en fase acuosa. Es interesante destacar que la principal desventaja que tiene el empleo de materiales como semiconductores diferentes al TiO_2 corresponde al coste de síntesis y obtención de los mismos y por ello, su uso a gran escala está limitado debido a la baja reproducibilidad que suelen presentar.

4.4.4 FOTOCATALIZADOR SOPORTADO

El gran inconveniente del uso de catalizadores en *slurry* a gran escala es el paso de recuperación del catalizador de la solución tras su uso. Para solucionarlo, la principal estrategia consiste en inmovilizar el catalizador sobre una superficie inerte, como vidrio, cuarzo o cerámica.

La inmovilización del fotocatalizador en el tratamiento de aguas residuales tiene sus ventajas y desventajas. La fijación del catalizador determina limitaciones en la transferencia de masa de contaminantes a la superficie del catalizador y en la transferencia de la luz, lo que conlleva a una pérdida de actividad fotocatalítica con respecto al fotocatalizador que no está inmovilizado. Y esta accesibilidad a la superficie catalítica de fotones y contaminantes influye significativamente en la tasa de degradación. Además, los caudales a tratar deben ser lo más bajos posibles para aumentar el tiempo de contacto entre el objeto a tratar (contaminante, célula bacteriana, espora de bacteria u hongo, virus, etc.) y el catalizador fijado. Esta limitación ha sido ampliamente investigada y la conclusión alcanzada es que el caudal debe ser lo suficientemente bajo (sólo unos pocos litros por minuto) para permitir que el sistema entregue al microorganismo una dosis letal mínima de energía para reducir la concentración de microorganismos tanto como sea posible y al contaminante una dosis de radicales oxidantes suficiente para su eliminación antes de que el agua circule a las regiones oscuras del reactor.

La necesidad de minimizar los inconvenientes inherentes resultantes de la inmovilización del catalizador llevó a investigar los monolitos celulares como una alternativa prometedora a los materiales fotocatalíticos de lecho compacto. Entre ellos, los materiales con forma multicanal, como las estructuras en forma de panal o de canales cuadrados, permiten operar con una baja caída de presión a la vez que aumentan la relación superficie/volumen del reactor; sin embargo, sufren de una falta de irradiación de luz interna, debido a la complejidad de proporcionar luz al fotocatalizador y al núcleo del reactor.

Las espumas sólidas alveolares de celdas abiertas han recibido recientemente un gran interés en el tratamiento de agua por actuar como mezclador estático activo dentro del reactor y al mismo tiempo beneficiarse de una mejor transmisión de luz dentro del material. En comparación con las espumas poliméricas, metálicas y otras espumas cerámicas como, por ejemplo, cordierita, alúmina o circonio, las espumas alveolares de β -SiC con área de superficie media ganaron un gran interés gracias a una alta densidad de grupos superficiales oxigenados para anclar grandes cantidades de TiO_2 , así como a una alta estabilidad térmica y química que permite aplicar condiciones de reacción severas sobre la espuma y posiblemente los fotocatalizadores desactivados puedan ser regenerados térmicamente o mediante condiciones ácidas o básicas (Kouamé et al., 2013).

Recientemente, se ha descubierto que la tela de fibra de carbono y los nanotubos de carbono exhiben una mayor superficie y una alta estabilidad mecánica y térmica, siendo la inmovilización del fotocatalizador bastante sencilla. Los soportes de vidrio también se están explorando mucho debido a su naturaleza químicamente inerte, su disponibilidad en diferentes formas (placas, esferas, capas finas y perlas) y su bajo coste. Recientemente, el aerogel, las películas de nanotubos de carbono, las espumas de carbono, las mallas metálicas, las espumas metálicas y los polímeros también están ganando importancia como materiales de soporte (Joseph et al., 2023). Sin embargo, la principal limitación de materiales carbonosos es la lixiviación al medio de su propio carbono asociado a su fotodegradación.

4.4.5 CASOS DE ÉXITO EN ESCALA REAL

Los reactores necesarios para aplicaciones fotocatalíticas solares están relacionados con aquellas estructuras empleadas para aplicaciones térmicas. Como resultado, tanto para los reactores como para cualquier sistema fotocatalítico, se han seguido diseños de colectores solares térmicos convencionales, como los colectores cilindro parabólicos y los no concentradores, no objeto de estudio de este libro. No obstante, sus diseños divergen en que: (i) el fluido debe ser expuesto a la radiación solar ultravioleta y, por tanto, el absorbente debe ser transparente a los rayos UV, y (ii) la temperatura no influye en el proceso fotocatalítico, por lo que no se requiere aislamiento.

Muchos intentos han llevado a la construcción de pequeñas plantas pilotos para el tratamiento de aguas. Sin embargo, a día de hoy, la fotocatálisis sigue siendo un proceso sin aplicación real en las estaciones depuradoras de aguas residuales como proceso complementario a los tratamientos primarios y secundarios.

Entre los prototipos desarrollados con mayor éxito y de mayor tamaño podemos



Figura 40: Vistas parciales de un CPC empleado para la fotocatálisis solar en la eliminación de contaminantes en agua (Spasiano et al. 2010).

destacar el reactor denominado Colector Parabólico Compuesto (CPC). Hoy en día, hay una gran cantidad de los mismos en la Plataforma Solar de Almería, concretamente en la Unidad de Tratamientos Solares del Agua. Estos reactores se emplean para estudios de desinfección y descontaminación de aguas residuales a gran escala, así como para la evaluación de nuevos fotocatalizadores.

Se han utilizado CPC de demostración y a escala piloto con áreas de colectores que van desde 3 m² a 150 m² (Figura 40), para la eliminación fotocatalítica heterogénea de compuestos muy tóxicos, como clorofenoles, organismos patógenos, colorantes, pesticidas, disolventes clorados, bacterias y compuestos biorrecalcitrantes del agua. Otras aplicaciones de CPC incluyen tratamiento de lixiviados de vertederos sanitarios, residuos de almazara y aguas residuales urbanas (Spasiano et al., 2015).



Figura 41: CPC instalado en la EDAR de Beniel en Murcia.

Un caso de aplicación real de aguas residuales mediante fotocátalisis con TiO₂ ha sido diseñado y construido por un consorcio europeo denominado SOLARDETOX. Estas plantas de demostración fueron instaladas en varios lugares diferentes de España y presentan áreas recolectoras de fotones de 100 a 150 m² pudiendo tratar grandes volúmenes (m³) de agua contaminada en pocas horas. Desde 2007 se instaló una planta CPC fotocatalítica solar homogénea (100 m²) para el pretratamiento de aguas residuales industriales salinas que contienen productos farmacéuticos refractarios y ha estado operando en una empresa farmacéutica española (DSM DIRETIL). El sistema es capaz de eliminar el 50% del carbono orgánico y el resto se elimina mediante un tratamiento biológico aeróbico.



Figura 42: Fotorreactor desarrollado por el consorcio PHOTOPUR.

Otro ejemplo de empleo de CPC existe también en la EDAR de Beniel en Murcia (España), donde se trabajó en la eliminación de diclofenaco en agua a la salida de un tratamiento secundario (Figura 41).

Por otro lado, a nivel europeo, otro consorcio denominado PHOTOPUR, trabajó en el desarrollo de un fotorreactor destinado al tratamiento de aguas procedentes de la viticultura en la región del alto Rin (<https://www.interreg-rhin-sup.eu/projet/photopur/>).

Este reactor empleaba TiO₂ como fotocatalizador soportado sobre espumas de SiC como soporte macroscópico (Figura 42). Este prototipo permitió tratar 10 L/min de un agua contaminada mayoritariamente por pesticidas y se obtuvieron altas tasas de eliminación de los contaminantes orgánicos. Se puso a disposición de los agricultores de la zona para que pudieran tratar sus aguas contaminadas antes de verterlas a la red de saneamiento.

4.4.6 PROCESOS RELACIONADOS CON LA FOTOCATÁLISIS

La fotocatálisis está englobada dentro de los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs). Los PAOs son tecnologías de tratamiento basadas en la producción *in situ* de radicales hidroxilo altamente oxidantes, así como otras especies de oxígeno reactivas. Las ventajas de estos procesos incluyen reacciones rápidas y no selectivas del HO con contaminantes. Además, cuando los PAOs son asistidos o mediados por luz ultravioleta (UV-PAOs), la capacidad de tratar contaminantes persistentes o proporcionar una desinfección eficiente se mejora al aumentar la eficacia de la conversión de agentes oxidantes (H_2O_2 , $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, O_3 , etc.) en radicales libres activos (HO , SO_4^-) (Rodríguez-Chueca et al., 2023).

Los procesos, por lo tanto, relacionados con la fotocatálisis serían:

Fotocatálisis homogénea: Involucra reacciones fotoquímicas en soluciones homogéneas. Un ejemplo de esto es el proceso Fenton foto-asistido, donde la irradiación UV se utiliza para fotolizar complejos de Fe^{3+} , regenerando Fe^{2+} , que luego descompone el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) para formar radicales hidroxilo (Rodríguez-Chueca et al., 2023).

Oxidación avanzada por luz ultravioleta (UV-AOPs): Estos procesos combinan la irradiación UV con agentes oxidantes para aumentar la generación de radicales libres. Algunos ejemplos incluyen la combinación de ozono (O_3) con UV, peróxido de hidrógeno con UV ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$), o la activación de persulfatos con luz UV para generar radicales sulfato ($\text{SO}_4^{\bullet-}$), que también son potentes oxidantes (Guerra-Rodríguez et al., 2023).



4.5 APLICACIONES EN ESPACIOS INTERIORES

4.5.1 INTRODUCCIÓN

La aplicación más habitual de la fotocatalisis en interiores es la eliminación de contaminantes orgánicos, (COVs, compuestos orgánicos volátiles o, en inglés, VOCs, *volatile organic compounds*), así como de otros contaminantes que, aunque están presentes en muy bajas concentraciones, contribuyen a largo plazo al denominado “Síndrome del Edificio Enfermo”.

En hoteles, tiendas y residencias particulares pueden aplicarse productos fotocatalíticos ya existentes en el mercado, fundamentalmente pinturas y baldosas, puesto que sus características hacen favorable la incorporación del fotocatalizador en su composición, pero también otros materiales como, por ejemplo, textiles para cortinas. Por otra parte, existen también en el mercado equipos de purificación de aire para interiores que incorporan filtros fotocatalíticos y lámparas UV, y que incluyen la posibilidad de recirculación del aire para favorecer el proceso.

Las aplicaciones en interiores están basadas en la capacidad de descomposición que tiene la tecnología fotocatalítica sobre la materia orgánica. Este efecto es el que evita la adherencia de la suciedad (orgánica) sobre los paramentos verticales en interiores y exteriores, de manera que permiten mantener la estética del material fotocatalítico aplicado a lo largo del tiempo, en comparación con un material convencional, disminuyendo, por tanto, los costes de conservación y mantenimiento (demora en el tiempo las campañas de limpieza- normalmente costosa por el uso de andamios colgados – o repintados).

De la misma forma, aprovechando este efecto, se emplea para combatir los malos olores (especialmente en espacios confinados: habitaciones de fumadores de hoteles, aparcamientos subterráneos, cocinas, restaurantes, cuartos de basura, etc.), para reducir la capacidad de formación de moho y algas, y también como bactericida, en espacios interiores comunes, tales como centros sanitarios, las oficinas o el propio hogar.

Aparte de lo ya mencionado, en aplicaciones sanitarias existe la posibilidad de incorporar un material fotocatalizador en los materiales plásticos empleados en la fabricación de catéteres y otros utensilios sanitarios, de manera que se puede conseguir un efecto no solo autolimpiante en estos productos, sino también autodesinfectante, puesto que el efecto oxidante del fotocatalizador es capaz de inactivar bacterias y virus, como se ha demostrado en diversos estudios científicos. (Ver [apartado 4.6](#) para más información).

En todo este abanico de aplicaciones es fundamental que el fotocatalizador pueda activarse bajo espectros de luz visible y/o de UVA.

4.5.1.1 PINTURAS PARA MEJORA DEL AIRE INTERIOR

Se trata de productos monocomponentes pigmentados de secado a temperatura ambiente con propiedades de descontaminación ambiental, antimicrobiana y de autolimpieza, pudiéndose activar mediante luz solar o luz artificial.

Estas pinturas no necesitan imprimaciones o fijadores y son aplicables sobre pinturas acrílicas convencionales.

Cuando se aplican sobre materiales de construcción deben permitir la transpiración, evitando la formación de humedades.

Los ámbitos de aplicación de estas pinturas son hoteles, viviendas particulares, colegios, gimnasios, restaurantes, hospitales y áreas públicas, así como construcción en general.



Figura 43: Pintura de interior en guardería. Fuente: Levenger.

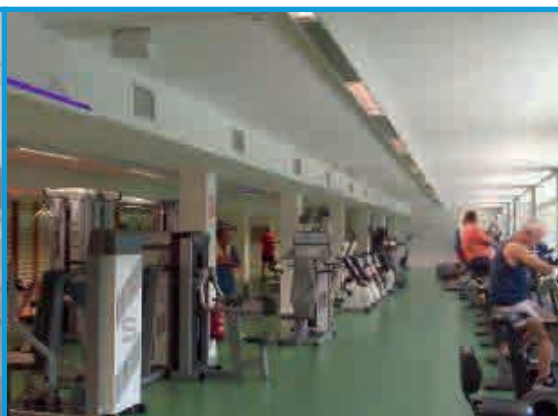


Figura 44: Pintura de interior en gimnasio. Fuente: Levenger.

4.5.2 ANTECEDENTES

El estado actual de la aplicación de la fotocatalisis para la purificación de ambientes interiores se ha enfocado en el uso de materiales nanoestructurados para mejorar la eficiencia y la capacidad de los fotocatalizadores. Los avances recientes han demostrado que la fotocatalisis puede ser altamente efectiva en la descomposición de contaminantes orgánicos volátiles (COV), que son un componente significativo de la contaminación del aire interior. Estos contaminantes incluyen sustancias como el formaldehído, el benceno y varios tipos de compuestos orgánicos que pueden emanar de muebles, pinturas y materiales de construcción.

Como se viene indicando desde los primeros capítulos, el material más estudiado en este contexto es el dióxido de titanio (TiO_2), conocido por su capacidad para oxidar contaminantes orgánicos bajo la exposición a la luz ultravioleta. La eficiencia del TiO_2 como fotocatalizador ha sido mejorada mediante diversas modificaciones en su estructura a nivel nano, tales como el dopado con otros metales y la síntesis de

nanoestructuras que proporcionan mayores áreas de superficie y, por lo tanto, una mayor actividad catalítica.

Además del TiO_2 , se han investigado otros materiales como el óxido de zinc y los óxidos de hierro, que también se han mostrado prometedores en la purificación del aire interior. Estos materiales pueden ser modificados para activarse no solo con luz ultravioleta sino también con luz visible, lo que aumenta su aplicabilidad en entornos interiores donde la luz ultravioleta puede ser limitada.

En resumen, la fotocatalisis representa una tecnología prometedora para mejorar la calidad del aire interior, con una continua innovación en la síntesis y aplicación de materiales nanoestructurados diseñados para maximizar la degradación de contaminantes perjudiciales en los ambientes cerrados.

4.5.3 IMPLEMENTACIÓN DE FOTOCATÁLISIS EN AMBIENTES INTERIORES

En ambientes interiores, la luz natural proveniente de ventanas puede no ser suficiente para activar los fotocatalizadores de manera eficiente. Por ello, se investiga y desarrolla la modificación de fotocatalizadores para que puedan activarse con luz artificial, común en espacios cerrados y que generalmente contiene poca o ninguna componente UV-A. Estos fotocatalizadores modificados, como el TiO_2 dopado con nitrógeno o incorporado en estructuras más complejas, buscan la capacidad de operar bajo luz visible, lo cual los hace más adecuados para aplicaciones en interiores.

Además, el diseño y la disposición de los materiales fotocatalíticos en interiores son cruciales para maximizar su efectividad. Se pueden aplicar como recubrimientos en paredes, techos y otras superficies, o incorporarse en filtros de sistemas de ventilación y aire acondicionado. Estos sistemas permiten que el aire circulante pase a través de materiales fotocatalíticos, purificándolo continuamente de contaminantes como formaldehído, compuestos orgánicos volátiles y microorganismos.

Otra innovación en el campo son los textiles fotocatalíticos, que pueden utilizarse en cortinas, tapicerías y ropa de cama, ofreciendo una acción descontaminante constante en el hogar o en ambientes como hospitales, donde la calidad del aire es una preocupación primordial.

En resumen, los mecanismos de fotocatalisis en ambientes interiores aprovechan la capacidad de los fotocatalizadores para purificar el aire, adaptándolos a las limitaciones específicas de luz y espacio en estos entornos. Con avances en la activación por luz visible y la integración efectiva en materiales comunes de interiores, la fotocatalisis representa una solución prometedora para mantener y mejorar la calidad del aire interior. La implementación de la fotocatalisis en ambientes interiores puede ser realizada de varias maneras, dependiendo del objetivo y del tipo de contaminante a degradar. A continuación, se presentan algunas formas de implementar la fotocatalisis en ambientes interiores:



1. Materiales fotocatalíticos en superficies

Instalación de materiales fotocatalíticos como pinturas en paredes, techos y suelos: Los materiales fotocatalíticos pueden ser aplicados en superficies para degradar contaminantes en el aire interior.



2. Dispositivos de iluminación con luz UV

Luz UV para activar la reacción fotocatalítica: Dispositivos de iluminación que emiten luz UV pueden ser utilizados para activar la reacción fotocatalítica en materiales fotocatalíticos.

Luz UV en sistemas de ventilación: La luz UV puede ser utilizada en sistemas de ventilación para degradar contaminantes en el aire interior.



3. Sistemas de purificación del aire

Sistemas de purificación del aire con fotocátalisis: Sistemas de purificación del aire que incluyen materiales fotocatalíticos y sistemas de irradiación UVA pueden ser utilizados para degradar contaminantes en el aire interior. Empleados fundamentalmente en edificios con sistemas HVAC (por sus siglas en inglés, *heating, ventilation and air conditioning*).



4. Dispositivos portátiles

Dispositivos portátiles de purificación del aire: Dispositivos portátiles que incluyen materiales fotocatalíticos y sistemas de irradiación UVA. Pueden ser utilizados para degradar contaminantes en el aire interior. Similares a la categoría anterior, pero con la característica de ser portátiles y generalmente de menor tamaño.



5. Integración en sistemas de construcción

Incorporación de materiales fotocatalíticos en materiales de construcción: Los materiales fotocatalíticos pueden ser incorporados en materiales de construcción, como ladrillos o cemento, para degradar contaminantes en el aire interior.

Incorporación de luz UV en sistemas de iluminación: La luz UV puede ser incorporada en sistemas de iluminación para activar la reacción fotocatalítica en materiales fotocatalíticos.



6. Aplicaciones en espacios específicos

Aplicaciones en espacios de vivienda: La fotocátalisis puede ser utilizada en espacios de vivienda para degradar contaminantes en el aire interior.

Aplicaciones en espacios de trabajo: La fotocátalisis puede ser utilizada en espacios de trabajo para degradar contaminantes en el aire interior.

Aplicaciones en espacios de transporte: La fotocátalisis puede ser utilizada en espacios de transporte, como autobuses o taxis, para degradar contaminantes en el aire interior.

En resumen, la implementación de la fotocátalisis en ambientes interiores puede ser realizada de varias maneras, dependiendo del objetivo y del tipo de contaminante a

degradar. La elección de la mejor forma de implementar la fotocatálisis dependerá de factores como el tipo de contaminante, el tamaño del espacio y los requisitos de iluminación.

4.5.4 CASOS DE ESTUDIO Y EVIDENCIA CIENTÍFICA

Eficiencia en la purificación del aire: Las pinturas fotocatalíticas basadas en dióxido de titanio (TiO_2) se utilizan para degradar contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Un estudio evaluó la eficiencia de estas pinturas en condiciones de laboratorio y en un entorno real, mostrando reducciones significativas de NO y tolueno en el aire.

En este sentido, otro estudio empleó pinturas basadas en TiO_2 no dopado y dopado con carbono para la degradación de contaminantes interiores, como el acetaldehído bajo iluminación visible y de contaminantes exteriores, como NO_x bajo radiación UV. Los resultados mostraron que las pinturas fotocatalíticas eran eficaces para reducir estos contaminantes, demostrando una significativa actividad fotocatalítica en condiciones de luz ambiental y UV. Asimismo, otro estudio realizado en Grecia evaluó una nueva pintura fotocatalítica que mostró una alta actividad bajo luz visible y difusa para la degradación de contaminantes del aire interior. En pruebas de laboratorio y en condiciones reales, la pintura redujo las concentraciones de NO y tolueno hasta en un 60% y 16% respectivamente en pruebas de laboratorio, y mejoró la calidad del aire en un 19% y 5% respectivamente en condiciones reales.

Asimismo, otro estudio revisó el uso de materiales de construcción basados en TiO_2 para la purificación del aire interior. Estos materiales demostraron capacidades de autolimpieza, esterilización y purificación del aire, lo que los convierte en opciones prometedoras para edificios sostenibles y con baja huella de carbono. Los investigadores destacaron la importancia de mejorar la eficiencia y la estabilidad de estos materiales para su aplicación práctica.

Impacto de la porosidad: La porosidad de las pinturas fotocatalíticas es crucial para su eficiencia. Un aumento en la concentración de pigmento y porosidad mejora la absorción de NO_2 , aunque también puede generar ácido nitroso (HNO_2), lo que requiere una optimización cuidadosa para maximizar los beneficios y minimizar los riesgos.

Dentro de los estudios promovidos por la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, investigadores de la Universidad Complutense de Madrid estudiaron la aplicación de materiales fotocatalíticos en una clínica podológica ([ver apartado 8.4.3.3](#)). En las consultas de podología, donde se abordan frecuentemente enfermedades fúngicas y bacterianas, se realizan tratamientos que incluyen el pulido y desbastado de uñas afectadas por patologías como la onicomycosis. Este proceso genera bioaerosoles contaminantes compuestos por partículas de queratina, hongos, esporas fúngicas y otros residuos microbianos, que representan un riesgo de infección por inhalación para los profesionales. Los micromotores utilizados en la podología, durante el pulido de las uñas, contribuyen a la dispersión de estos bioaerosoles en el ambiente. A pesar del uso

de mascarillas, estas partículas menores a $0.8\ \mu\text{m}$ pueden atravesar los microporos de las mascarillas N95, llegando a los bronquiolos y alvéolos pulmonares y causando problemas respiratorios como rinitis, asma y tos productiva.

La fotocatalisis surge como una tecnología prometedora en la mitigación de estos riesgos, utilizando dispositivos de purificación del aire que incorporan catalizadores impregnados en dióxido de titanio y luz ultravioleta. Estos sistemas no solo pretenden reducir la carga microbiana en el aire, sino también disminuir la presencia de hongos y bacterias en el entorno clínico. Los estudios experimentales muestran una reducción significativa de las unidades formadoras de colonias de bacterias y hongos en el aire, lo que sugiere un ambiente clínico más seguro tanto para los pacientes como para los profesionales de la salud. Además, la fotocatalisis podría servir como una medida preventiva eficaz en las consultas de podología, especialmente en aquellos entornos donde se realizan procedimientos quirúrgicos.

Otra aplicación prometedora para ambientes interiores es la fotooxidación del etileno emitido por frutas climatéricas durante la maduración. La industria exportadora de estas frutas tiene un gran interés en retrasar su maduración. La eliminación del etileno liberado por la fruta retarda el ciclo de maduración. Se ha investigado la aplicación de la fotocatalisis heterogénea a través de sol-gel de TiO_2 depositado en placas de plástico y vidrio para la degradación del etileno emitido por papayas Golden cultivadas para exportación. En esta investigación se encontró que el TiO_2 soportado en vidrio es altamente eficiente en la degradación del etileno a bajas concentraciones a temperaturas típicas (entre 12 y $25\ ^\circ\text{C}$) para el almacenamiento y transporte de papayas. Teniendo esta aplicación en mente, puede ser interesante explorar la aplicación de pinturas fotocatalíticas en lugares donde se conserva o vende fruta como almacenes o supermercados, para mantenerla en las mejores condiciones posibles.

4.5.5 DESAFÍOS Y LIMITACIONES. FUTURO DE LA FOTOCATÁLISIS EN INTERIORES

El futuro de la aplicación de la fotocatalisis en interiores pasa por afrontar los desafíos técnicos y prácticos que son necesarios para realizar implementaciones exitosas.

- Desarrollo de tecnologías de iluminación eficientes: El desarrollo de tecnologías de iluminación eficientes que emitan luz UV puede ser beneficioso para la aplicación de la fotocatalisis en ambientes interiores en equipos de purificación de aire compactos. Para estos equipos es muy importante la seguridad de los mismos. En este sentido, la combinación con otras tecnologías puede ser clave. La integración de la fotocatalisis con otras tecnologías de purificación de aire y climatización puede maximizar los beneficios en la calidad del aire interior. Por ejemplo, la combinación de sistemas de fotocatalisis con filtración HEPA (High Efficiency Particulate Air) puede ofrecer una solución más completa para la eliminación de partículas y contaminantes gaseosos. Los filtros HEPA son altamente eficientes en la captura de partículas finas, mientras que los fotocatalizadores,

activados por luz UV o visible, pueden descomponer compuestos orgánicos volátiles (COVs) y microorganismos atrapados en estos filtros. Asimismo, la integración con sistemas de ventilación mecánica controlada permite una renovación constante del aire, reduciendo la acumulación de contaminantes. Esta sinergia entre tecnologías no solo mejora la eficiencia general del sistema de purificación, sino que también puede optimizar el consumo energético al mantener una calidad de aire superior con menores demandas de ventilación.

- Desarrollo de materiales fotocatalíticos más efectivos y con actividad en el visible: El desarrollo de materiales fotocatalíticos más efectivos puede ser beneficioso para la aplicación de la fotocatálisis en ambientes interiores.
- En relación a las aplicaciones, es muy importante realizar una prospectiva del mercado muy amplia para localizar las aplicaciones en las que la fotocatálisis puede realmente aportar valor y apostar por llevar a cabo estudios serios para su implantación.
- Asimismo, es interesante estar al día de la nueva legislación que puede aparecer en relación a la calidad del aire interior por si la fotocatálisis pudiera ser una solución para ayudar a cumplir la nueva normativa.

Por otro lado, el mantenimiento y la durabilidad de los sistemas fotocatalíticos son aspectos cruciales para asegurar su eficacia a largo plazo. Los materiales fotocatalíticos, como el dióxido de titanio (TiO_2), requieren una exposición continua a la luz para mantener su actividad descontaminante. Sin embargo, la acumulación de suciedad y la posible degradación del material pueden reducir su eficiencia con el tiempo. Es esencial implementar protocolos de limpieza regulares para las superficies fotocatalíticas adaptados a cada aplicación y utilizando métodos que no dañen el revestimiento activo. Además, los sistemas deben ser diseñados para facilitar el reemplazo de componentes cuando sea necesario, como las lámparas UV, que tienen una vida útil limitada. La elección de materiales fotocatalíticos resistentes a la abrasión y con una alta estabilidad química puede prolongar significativamente la vida útil del sistema. Investigaciones recientes se centran en desarrollar fotocatalizadores que mantengan su eficacia bajo luz visible, lo cual puede reducir los costos de mantenimiento asociados a las fuentes de luz UV.

Otro aspecto muy importante es el económico. Uno de los principales desafíos en la implementación de tecnologías fotocatalíticas en ambientes interiores es el impacto económico asociado. A pesar de los beneficios significativos en la mejora de la calidad del aire y la reducción de contaminantes, el coste inicial de los materiales fotocatalíticos y su instalación puede ser considerablemente alto en comparación con métodos tradicionales de purificación de aire. Los fotocatalizadores basados en dióxido de titanio (TiO_2) y otras tecnologías avanzadas requieren una inversión inicial en términos de materiales especializados y sistemas de iluminación adecuados para su activación, como lámparas UV. Además, los costes de mantenimiento y reemplazo de componentes, como las fuentes de luz, pueden aumentar el coste total de operación a largo plazo. Sin embargo, estudios recientes sugieren que la combinación de fotocatálisis con otras tecnologías de purificación puede ofrecer una

solución más rentable, mejorando la eficiencia energética y reduciendo los costes operativos a largo plazo. Es crucial realizar un análisis de coste-beneficio detallado para evaluar la viabilidad económica y justificar la inversión inicial, considerando los ahorros potenciales en costes de salud y mejoras en la productividad, debido a un ambiente interior más saludable.

4.5.6 CONCLUSIONES

La aplicación de la fotocatálisis en ambientes interiores ha demostrado ser una tecnología prometedora para la mejora de la calidad del aire, ofreciendo beneficios significativos en la degradación de contaminantes orgánicos volátiles (COVs), óxidos de nitrógeno (NOx) y microorganismos. Los avances en la investigación y desarrollo de materiales fotocatalíticos, como el dióxido de titanio (TiO₂), han permitido la creación de soluciones más eficaces y adaptables a las condiciones de luz interior, incluidas las luces visibles comunes en espacios cerrados.

BENEFICIOS



1. Eficiencia en la eliminación de contaminantes. Los estudios han demostrado que las pinturas y materiales fotocatalíticos pueden reducir significativamente los niveles de COVs y NOx, mejorando la calidad del aire y contribuyendo a un ambiente más saludable.



2. Versatilidad de aplicaciones: Los materiales fotocatalíticos pueden ser aplicados en una variedad de formas, incluyendo revestimientos en superficies, sistemas de purificación de aire y dispositivos portátiles, lo que permite una implementación flexible según las necesidades específicas del espacio.

DESAFÍOS



1. Impacto económico: A pesar de sus beneficios, el coste inicial de los materiales y su instalación puede ser alto en comparación con métodos tradicionales. Es esencial realizar análisis de coste-beneficio para justificar la inversión inicial, considerando los ahorros potenciales en salud y productividad a largo plazo.



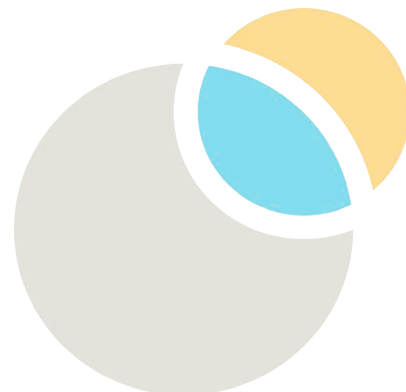
2. Mantenimiento y durabilidad: La eficiencia de los sistemas fotocatalíticos puede disminuir con el tiempo debido a la acumulación de suciedad y la degradación del material. Implementar protocolos de mantenimiento adecuados y utilizar materiales resistentes puede prolongar la vida útil del sistema y asegurar su eficacia continua.

4.5.7 FUTURO DE LA FOTOCATÁLISIS EN INTERIORES

El futuro de la fotocatálisis en ambientes interiores se orienta hacia el desarrollo de materiales más eficientes que puedan activarse con luz visible, reduciendo así los costes asociados a las fuentes de luz UV. La integración de la fotocatálisis con otras tecnologías de purificación de aire, como los filtros HEPA y los sistemas de ventilación mecánica controlada, ofrece una oportunidad para maximizar los beneficios y optimizar el consumo energético, creando sistemas de purificación de aire más completos y eficientes.

En conclusión, la fotocatálisis representa una solución innovadora y efectiva para mejorar la calidad del aire interior, pero su implementación exitosa dependerá de superar los desafíos económicos y de mantenimiento. Con una investigación continua y la adaptación de nuevas tecnologías, la fotocatálisis tiene el potencial de convertirse en un componente clave de las estrategias de purificación de aire en interiores, contribuyendo a ambientes más saludables y sostenibles.

La integración de la fotocatálisis con otras tecnologías de purificación de aire, como los filtros HEPA y los sistemas de ventilación mecánica controlada, ofrece una oportunidad para maximizar los beneficios y optimizar el consumo energético



4.6 APLICACIONES FOTOCATALÍTICAS EN SANIDAD

4.6.1 LA FOTOCATÁLISIS FRENTE A HONGOS, BACTERIAS Y VIRUS

A la luz de la pandemia COVID-19, la pregunta de cómo limitar los brotes del virus en el futuro parece ser más relevante que nunca. La fotocatalisis con dióxido de titanio tiene el potencial de descomponer las moléculas orgánicas, que normalmente se ha venido utilizando para propósitos de autolimpieza y purificación del aire y del agua. De hecho, el TiO_2 también exhibe propiedades desinfectantes y muestra buenos resultados en la degradación de bacterias, hongos y también virus (Foster et al., 2011). (Watts et al. 1995) muestra en su estudio que una desactivación efectiva del poliovirus con una suspensión de dióxido de titanio se logra después de 30 minutos de radiación de luz solar. Otros estudios han demostrado la degradación del Norovirus (Kato et al., 2005) y los virus de la gripe (Cui et al., 2010), entre otros.

La mayoría de los estudios sobre la degradación de virus se han efectuado en el contexto de tratamiento de depuración de aguas (An et al., 2017). Las investigaciones acerca de la posibilidad de autodesinfección de superficies con TiO_2 para desactivar bacterias y virus son por regla general escasas, pero la investigación publicada muestra resultados prometedores. (Zan et al., 2007) confirmó la degradación del virus de la hepatitis B con placas de cerámica con revestimientos de TiO_2 . Encontraron que después de un periodo de 4 horas, alrededor del 90% de ellas se destruyeron con una intensidad baja de luz UV e incluso con la luz diurna de una habitación. (Nakano et al., 2012) concluyó que una película de TiO_2 sobre cristal era eficaz en la eliminación del virus de la gripe. Placas de hormigón cargadas con TiO_2 modificado presentan propiedades antibacterianas bajo irradiación con luz visible, según se ha publicado también en la literatura científica (Janus et al., 2019).

Mientras que la fotocatalisis es una técnica de desinfección de baja energía que no produce subproductos problemáticos, el principal problema de la desinfección mediante fotocatalisis es la degradación relativamente lenta. Estudios recientes se han centrado en superar este inconveniente mediante el uso de TiO_2 dopado con iones metálicos. El TiO_2 dopado con plata (Ag) demuestra tener una degradación más efectiva sobre bacterias y virus en agua (Liga et al., 2011). Existen diferentes explicaciones sobre el aumento de la eficacia del TiO_2 dopado con plata, incluyendo la mayor producción del radical OH, lo que generaría el aumento de adsorción del virus, y la degradación microbiana con iones de plata Ag^+ lixiviados del catalizador.

Además, el dopaje metálico es un método eficaz para extender la respuesta espectral del TiO_2 hacia la luz visible, y poder utilizar una mayor parte del espectro solar (Li et al., 2018). Zheng et al., 2018 indicó que las nano fibras Cu- TiO_2 exhibían una alta eficacia de eliminación tanto del virus bacteriófago f2 como de la bacteria E.coli 285 bajo luz visible en agua (Zheng et al., 2018). Además, el TiO_2 dopado con determinados materiales con actividad desinfectante tiene la ventaja de permitir la actividad en la oscuridad, lo que le hace ser muy útil para interiores, donde las condiciones de luz son desfavorables. Los equipos de hospital autoesterilizantes

son una perspectiva interesante de esta tecnología. Los estudios han mostrado resultados prometedores en términos de inhibición para el crecimiento de bacterias al revestir los equipos con TiO_2 dopado con plata, como catéteres (Yao et al., 2008), lancetas (Nakamura et al., 2007) y mascarillas quirúrgicas (Li et al., 2006), por mencionar algunos.

Las enfermedades virales transmitidas por el aire comportan la necesidad de desinfección del aire interior. (Kim et al., 2018) presentó un purificador fotocatalítico de flujo para aire interior utilizando un catalizador de paladio depositado en TiO_2 , que mostró una inactivación eficiente de los virus MS2 en el aire, mientras que Daikadu demostró una degradación eficiente de los aerosoles de la gripe en el aire con placas de cerámica porosas recubiertas con TiO_2 (Daikoku et al., 2015). En un futuro cercano, probablemente se verán muchas más soluciones de investigación y comerciales en materiales autodesinfectantes fotocatalíticos con fines clínicos, tratamiento de aguas residuales y materiales de construcción para inhibir el crecimiento de virus y bacterias en espacios públicos como hospitales, colegios, residencias de ancianos, estaciones de tren, etc. La desinfección fotocatalítica podría implementarse en nuestro día a día, en soluciones como teléfonos autoesterilizantes, los picaportes de las puertas, superficies de baños, etc.

El COVID-19 y otros virus respiratorios son una amenaza para aquellos que ya tienen un sistema inmune débil. Esto incluye ancianos, pero las estadísticas del brote del COVID-19 en China muestran que la tasa de letalidad se incrementa significativamente en personas que sufren enfermedades cardiovasculares, diabetes, enfermedades respiratorias crónicas, hipertensión y cáncer (Roser et al., 2020). Es digno de mención que exista una fuerte evidencia en la concordancia entre los altos niveles de contaminación atmosférica y el desarrollo de todas las enfermedades mencionadas (Bowe et al., 2018 y WHO, 2020). Por lo tanto, vivir en una zona con niveles elevados de contaminación atmosférica debe indirectamente considerarse un factor de aumento de riesgo de infección viral. Después del brote del SARS, en 2002, se analizaron 5 regiones chinas diferentes con distintos niveles de contaminación y se observaron tasas de mortalidad diferentes, oscilando entre el 3,84% en la región menos contaminada y el 8% en la región más contaminada. Los expertos subrayan que la tendencia está asociada a un alto nivel de incertidumbre; ya que variables como el estatus socioeconómico, el tabaquismo, la edad y el sexo no se consideran en el estudio (Cui et al., 2003). Sin embargo, las observaciones están de acuerdo con otros estudios que muestran una fuerte correlación entre los niveles de contaminación del aire y las admisiones hospitalarias debidas a virus (Ciencewicki et al., 2007). Hoy la OMS estima que 9 de cada 10 personas respiran aire contaminado, mientras que la contaminación del aire causa anualmente 4,2 millones de muertes, pero de eso no se habla mucho. ¿Quizás ahora sea el momento de crear más conciencia sobre este asesino silencioso?

ACLARACIÓN SOBRE LA DESINFECCIÓN VERSUS ESTERILIZACIÓN

Hay varias maneras de “limpiar” una superficie o soporte, dependiendo del nivel requerido de “limpieza”. La tabla 4 explica la diferencia entre higienización, desinfección y esterilización. Para propósitos cotidianos, la higienización elimina la suciedad y los microorganismos, sin embargo, en muchos casos la limpieza es imposible o insuficiente, como es el caso para fines clínicos y tratamientos de agua. La desinfección y la esterilización son técnicas diferentes para matar los microorganismos diferenciándose solo por el número de microorganismos que sobreviven, por lo que a menudo el límite entre desinfección y esterilización no está

totalmente claro. El límite de la esterilización farmacopea es un posible microorganismo, según se establece en varios artículos sobre esterilizados (von Woedtke et al., 2008). La esterilización completa es difícil de lograr y, por lo general, requiere procedimientos altamente tecnológicos.

La fotocatalisis se considera una técnica de autodesinfección en lugar de una técnica de autoesterilización. Según indica (Foster et al.) *“La habilidad de matar a todos los grupos de microorganismos sugiere que las superficies tienen el potencial de ser autoesterilizantes, particularmente cuando se combina el TiO_2 con cobre o plata. Sin embargo, por ahora, sería correcto referirse a las superficies o dispersiones fotocatalíticas como autodesinfectantes más que autoesterilizantes”*. La tabla siguiente resume y aclara esta diferencia.

Tabla 4
Los diferentes niveles de limpieza

Método	Acción	Agentes utilizados	Ejemplos de aplicación
Higienización	Elimina microorganismos y suciedad	Agua, jabón y detergente	Limpieza “habitual”
Desinfección	Destruye microorganismos	Alcohol, peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio, fenólicos, lodóforos	Para propósitos no clínicos (contacto con piel intacta etc) (23) tratamientos de agua potable (24)
Esterilización	Destruye todos los microorganismos y esporas	Vapor, peróxido de hidrogeno, ozono, óxido de etileno (ETO)	Para propósitos clínicos (penetra tejido estéril) (23) tratamiento para inyección de agua (24)

4.6.2 CASO DE ÉXITO: LA FOTOCATÁLISIS FRENTE AL VIRUS SARS-COV-2

El texto y las imágenes que a continuación se acompañan están extractados textualmente de la noticia publicada en la [web del CIEMAT](#) en el año 2022.

El CIEMAT ha participado, a través de la Unidad **FOTOAIR** del Departamento de Energía, en el proyecto (PHOTO vs. SARS: Eliminación de SARS-COV-2 mediante fotocatalisis asociada a los sistemas de tratamiento de aire de hospitales y residencias) financiado por el CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial) y liderado por la empresa Aire Limpio. Se ha demostrado la destrucción del virus SARS-CoV-2, causante de la COVID-19, mediante fotocatalisis. Este proyecto fue uno de los veinte seleccionados entre los más de setecientos presentados en la convocatoria para hacer frente a la emergencia sanitaria provocada por la pandemia, gracias entre otras cuestiones a los resultados obtenidos en un proyecto anterior, Enerhealthy (Purificación del aire para la salud y eficiencia energética en los edificios), también financiado por CDTI. El objetivo era la destrucción mediante fotocatalisis de los aerosoles contaminados por el coronavirus causante de la COVID-19 en hospitales y residencias.

En el proyecto, desarrollado a lo largo de dieciocho meses, han participado también otras entidades: El Centro de biología Molecular Severo Ochoa (CBM-CSIC), el Laboratorio de Invasiones Biológicas y Enfermedades Emergentes (RJB-CSIC), El Real Jardín Botánico (RJB-CSIC) y el Centro de Vigilancia Sanitaria Veterinaria (Visavet) de la Universidad Complutense de Madrid. El proyecto PHOTO vs. SARS responde a una iniciativa europea de I+D+i financiada por el CDTI para afrontar la emergencia sanitaria ocasionada por la COVID-19. El presupuesto ascendió a 548.111 €.

Los ensayos y pruebas realizadas han permitido confirmar que la tecnología combinada de purificación de Aire Limpio es capaz de inactivar el SARS-CoV-2 y otros microorganismos, además de reducir en gran manera las concentraciones de contaminantes químicos del aire. La colaboración entre Aire Limpio y la Unidad FOTOAIR del CIEMAT cuenta ya con más de quince años de experiencia en temas relacionados con el tratamiento de contaminantes, tanto químicos como biológicos, del aire interior. La urgencia por conseguir un sistema eficiente en la eliminación del virus SARS-CoV-2 obligó a recurrir a un diseño de posible aplicación inmediata en el mercado, razón por la que se diseñó un sistema implementable en los equipos que la empresa Aire Limpio comercializa, basado en adsorción, fotocatálisis y polarización activa. El prototipo resultante se probó frente a contaminantes químicos y biológicos ambientales existentes en las propias instalaciones del laboratorio FOTOAIR, para pasar luego a ensayos en las oficinas de Aire Limpio, el comedor del CIEMAT y la zona de pacientes COVID-19 del Hospital 12 de Octubre.

Ante los resultados obtenidos fue preciso determinar si el poco material genético identificado a la salida del prototipo era o no infectante, o si simplemente eran restos de la cápside del virus, ya sin capacidad infecciosa (y, por tanto, no podía provocar nuevas infecciones); para esta cuestión se recurrió a las instalaciones de alta bioseguridad (BSL3) de Visavet, de la Universidad Complutense de Madrid, donde se pudo ensayar directamente el mismo prototipo que ya había superado las pruebas en los locales precitados. El prototipo, con distintas etapas de filtración y sistema fotocatalítico, demostró la capacidad de retención de las partículas virales nebulizadas en el aire de la cámara, así como que el ARN viral detectado al final de las etapas de filtración se corresponde con restos de material genético y no con un virus infeccioso, quedando demostrado que el equipo es capaz de inactivar el virus durante las diferentes etapas. Para Benigno Sánchez, responsable técnico del proyecto y jefe del Grupo FOTOAIR del CIEMAT, y Fernando Fieldman director de I+D de la empresa Aire Limpio y coordinador

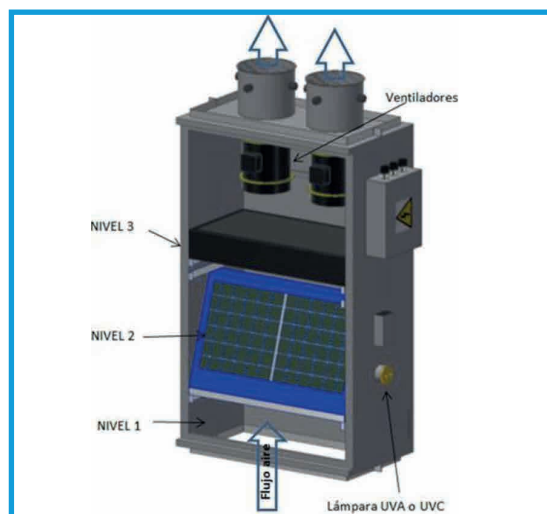


Figura 45: Imagen del interior del prototipo: Nuevo prototipo filtrante dotado de 3 niveles de filtración. De abajo arriba: NIVEL 1. Monolitos de carbón activado impregnado en su parte interna con Sol-gel FOTOAIR. NIVEL 2. Filtros de polarización activa con sus caras internas de fibra natural (FN) impregnadas con Sol-gel FOTOAIR. Las dos caras internas más la inferior soportada sobre el carbón activado son irradiadas por una lámpara UVA. El sistema se completa con una etapa filtrante denominada NIVEL 3. Filtro final ePM1>80 % antes de alcanzar los ventiladores de impulsión que movilizan todo el flujo de aire a través de todo el equipo. Este equipo está diseñado para ser incluido en el falso techo de los edificios en número, según necesidades.

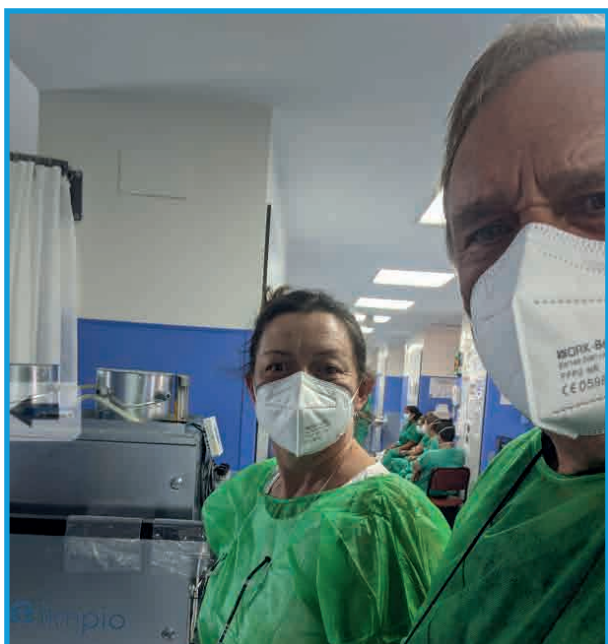


Figura 46: La doctora Cristina Canela, responsable del Departamento de Química Ambiental de la Universidad UENF de Brasil, junto con el doctor Benigno Sánchez, jefe del grupo FOTOAIR del CIEMAT y responsable del proyecto, han colaborado activamente en el desarrollo del prototipo final implantado a escala real.

del proyecto ante el CDTI, "tras 18 meses de trabajo conjunto hemos confirmado que la tecnología desarrollada es capaz de eliminar no solo el SARS-CoV-2, sino otros tipos de virus, bacterias, hongos y compuestos químicos volátiles existentes en el aire".

Para más información relacionada, [ver apartado 8.4.](#)



5 LEGISLACIÓN SOBRE CALIDAD DEL AIRE

5.1 LEGISLACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE EXTERIOR

La legislación española sobre calidad del aire exterior, actualmente en vigor, viene representada por los siguientes documentos:

- **Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.**

Esta Ley actualiza la base legal para los desarrollos relacionados con la evaluación y la gestión de la calidad del aire en España, y tiene como fin último el de alcanzar unos niveles óptimos de calidad del aire para evitar, prevenir o reducir riesgos o efectos negativos sobre la salud humana, el medio ambiente y demás bienes de cualquier naturaleza. Mediante la misma se habilita al gobierno a definir y establecer los objetivos de calidad del aire y los requisitos mínimos de sus sistemas de evaluación, y sirve de marco regulador para la elaboración de los planes nacionales, autonómicos y locales para la mejora de la calidad del aire.

- **Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.**

Esta norma transpone al ordenamiento jurídico español el contenido de la Directiva 2008/50/CE, de 21 de mayo de 2008 y la Directiva 2004/107/CE, de 15 de diciembre de 2004.

Se aprueba con la finalidad de evitar, prevenir y reducir los efectos nocivos de las sustancias mencionadas sobre la salud humana, el medio ambiente en su conjunto y demás bienes de cualquier naturaleza.

Este real decreto fue modificado por el Real Decreto 678/2014 para modificar los objetivos de calidad del sulfuro de carbono establecidos en la disposición transitoria única, y por el Real Decreto 39/2017, para transponer a nuestro ordenamiento jurídico la Directiva 2015/1480, que establece normas relativas a los métodos de referencia, validación de datos y ubicación de los puntos de medición para la evaluación de la calidad del aire ambiente, e incorporar los nuevos requisitos de intercambio de información establecidos en la Decisión 2011/850/UE. Además, este último real decreto prevé la aprobación de un Índice Nacional de Calidad del Aire que permita informar a la ciudadanía, de una manera clara y homogénea en todo el país, sobre la calidad del aire que se respira en cada momento.

- **Real Decreto 34/2023, de 24 de enero, por el que se modifica el Real Decreto relativo a la mejora de la calidad del aire.**

El Real Decreto 102/2011 se modifica para su adaptación, en caso de episodios de alta contaminación, a los nuevos umbrales de contaminación establecidos en el Plan Marco de Acción a corto plazo, aprobado por la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente el 9 de julio de 2021.

El citado plan busca lograr que las respuestas a situaciones de alerta por contaminación sean similares para todas las administraciones, así como reducir el número de ocasiones en que se superen los valores límite u objetivo a corto plazo. Además, introduce la componente predictiva, permitiendo la activación de las medidas previstas antes de que ocurra la superación de los umbrales cuando esta se prevea mediante modelos predictivos de contaminación.

Dentro de las medidas previstas en el plan, se incluyen aquellas que controlen actividades que incrementen significativamente el riesgo de superar los valores límite, los valores objetivo o los umbrales de alerta correspondientes. Entre ellas, se podrán aplicar medidas para regular el tráfico de vehículos, las aeronaves en aterrizaje y despegue, las obras de construcción, los barcos atracados y el funcionamiento de instalaciones industriales, así como el uso de productos y la calefacción doméstica. Por último, prevé la posibilidad de establecer acciones específicas en los planes de acción para proteger a los sectores más vulnerables de la población.

Con dicha finalidad de adaptación, el nuevo Real Decreto 34/2023 modifica el Real Decreto 102/2011 en lo que se refiere a algunas de las definiciones que contiene: las funciones del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico; las medidas aplicables ante la superación de algunos umbrales; o la obligación de las comunidades autónomas y, en su caso, las entidades locales, de elaborar planes de acción a corto plazo.

Los valores límites permitidos de algunos contaminantes atmosféricos habituales en España, quedan de esta forma establecidos, a partir de este nuevo real decreto:



VALORES DE REFRENECIA SEGÚN REAL DECRETO 34/2023

Contaminante	Valor límite horario. Periodo de promedio: 1 hora	Valor límite diario. Periodo de promedio: 24 horas	Valor límite anual. Periodo de promedio: 1 año civil	Nivel Crítico. Periodo de promedio: 1 año civil
Dióxido de azufre	350 µg/m³ No podrá superarse en más 24 ocasiones por año	125 µg/m³ No podrá superarse en más 3 ocasiones por año		20 µg/m³ (1)
Dióxido de nitrógeno	200 µg/m³ No podrá superarse en más 18 ocasiones por año (2)		40 µg/m³ (2)	30 µg/m³ (1)
Monóxido de carbono	10 mg/m³ Periodo de promedio: máxima diaria de las medidas móviles octohorarias			
Benceno			5 µg/m³ (3)	
PM ₁₀ Partículas en suspensión <10 µm		50 µg/m³ No podrá superarse en más 35 ocasiones por año (4)	40 µg/m³ (5)	
PM _{2,5} Partículas en suspensión <2.5 µm			20 µg/m³	
Plomo			0,5 µg/m³	

Contaminante	Umbral activación. Parámetro: promedio horario	Umbral de información. Parámetro: promedio horario	Umbral de alerta. Parámetro: promedio horario
Dióxido de azufre	200 µg/m³	350 µg/m³	500 µg/m³ µg/m³ Cuando durante tres horas consecutivas exceda dicho valor cada hora
Dióxido de nitrógeno	180 µg/m³	200 µg/m³	400 µg/m³ Cuando durante tres horas consecutivas exceda dicho valor cada hora
PM ₁₀ Partículas en suspensión <10 µm	40 µg/m³	50 µg/m³	80 µg/m³
PM _{2,5} Partículas en suspensión <2.5 µm	25 µg/m³	35 µg/m³	50 µg/m³
Ozono	120 µg/m³	180 µg/m³	240 µg/m³

(1) Solo se tomarán en consideración los datos obtenidos en las estaciones de medición definidas en el apartado II. B del anexo III del RD 34/2023

(2) Margen de tolerancia: 50 % a 19 de julio de 1999, valor que se reducirá el 1 de enero de 2001 y, en lo sucesivo, cada 12 meses, en porcentajes anuales idénticos, hasta alcanzar un 0 % el 1 de enero de 2010. 50 % en las zonas y aglomeraciones en las que se haya concedido una prórroga de acuerdo con el artículo 23.

(3) Margen de tolerancia: 5 µg/m³ a 13 de diciembre de 2000, porcentaje que se reducirá el 1 de enero de 2006 y en lo sucesivo, cada 12 meses, en 1 µg/m³ hasta alcanzar un 0 % el 1 de enero de 2010.

5 µg/m³, en las zonas y aglomeraciones en las que se haya concedido una prórroga de acuerdo con el artículo 23.

(4) Margen de Tolerancia: 50% mientras esté en vigor la exención de cumplimiento de los valores límite concedida de acuerdo con el artículo 23

(5) Margen de Tolerancia: 20% en las zonas en las que se haya concedido exención de cumplimiento de acuerdo con el artículo 23

Figura 47: Marco normativo legal español en materia de calidad ambiental en exteriores según el RD 34/2023.

Sin embargo, en los últimos años y tras varios estudios científicos y toxicológicos, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido que la contaminación ambiental es uno de los causantes del cáncer, de las enfermedades degenerativas, de la diabetes o de afecciones a los fetos de mujeres embarazadas, entre otros. [Fuente OMS].

Por este motivo, la OMS, en 2021, ha revisado los umbrales de aceptación de calidad del aire, que se deberían ir implantando paulatinamente, ya que esta es la causa de 7 millones de muertes prematuras cada año en el mundo, donde destacan las siguientes medidas:

- Reducción de la concentración de $[\text{NO}_2]$ de $40 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ a $10 \mu\text{gr}/\text{m}^3$.
- Reducción de la concentración de $[\text{PM}_{2,5}]$ de $35 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ a $5 \mu\text{gr}/\text{m}^3$.
- Reducción de la concentración de $[\text{PM}_{10}]$ de $70 \mu\text{gr}/\text{m}^3$ a $15 \mu\text{gr}/\text{m}^3$.

En el cuadro siguiente se establecen las nuevas recomendaciones de la OMS, estableciendo metas intermedias y valores objetivos:

Contaminante	Tiempo promedio	Meta intermedia				Nivel de las directrices sobre la calidad del aire
		1	2	3	4	
$\text{MP}_{2,5} \mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas*	75	50	37,5	25	15
$\text{MP}_{10} \mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	70	50	30	20	15
	24 horas*	150	100	75	50	45
$\text{O}_3 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Temporada alta**	100	70	-	-	60
	8 horas*	160	120	-	-	100
$\text{NO}_2 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	40	30	20	-	10
	24 horas*	120	50	-	-	25
$\text{SO}_2 \mu\text{g}/\text{m}^3$	24 horas*	125	50	-	-	40
$\text{CO}, \text{mg}/\text{m}^3$	24 horas*	7	-	-	-	4

* Percentil 99 (es decir, 3-4 días de superación por año)

** Promedio de las concentraciones máximas diarias O_3 (medias octohorarias) en los seis meses consecutivos con la concentración media móvil de O_3 más alta

Figura 48: Niveles recomendados de las directrices sobre calidad del aire y metas intermedias de la OMS (2021).

5.2 LEGISLACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE INTERIOR

No hay legislación a nivel de calidad de aire interior más allá de la relativa a la salud ocupacional, a través de los valores límites de exposición aplicables a los distintos compuestos, y algunas regulaciones locales en ciertos países. Ante esta perspectiva, se pueden seleccionar algunos valores que se emplean en exteriores como valores guía a considerar en el interior. En la siguiente tabla se presentan algunos parámetros relevantes como valor que puede considerarse como guía, como recomendables para asegurar una buena calidad de aire interior, pero para los que no existe actualmente obligatoriedad en interiores. Asimismo, indicar aquí que, por la naturaleza de algunos de estos contaminantes, algunos no son susceptibles de ser oxidados fotocatalíticamente.

Tabla 5
Valores recomendables de algunos contaminantes en interiores

Contaminante	Tiempo promedio	Valor referencia	Referencias
PM _{2.5} (µg/m³)	Anual	5	WHO
	24 horas	15	WHO
PM ₁₀ (µg/m³)	Anual	15	WHO
	24 horas	45	WHO
TVOC (µg/m³)	Anual	200 ug/m³	The Netherlands
	8 horas	600 ug/m³	Portugal
Formaldehído (µg/m³)	30 minutos	100	WHO
	8 horas	60	Austria
CO ₂ (ppm)	1 hora	900	Multiple*
Radon (Bq/m³)	Valor	100	WHO
O ₃ (µg/m³) Exterior	Pico estación	60	WHO
	8 horas	100	WHO
NO ₂ (µg/m³) Exterior	Anual	10	WHO
	24 horas	25	WHO
	1 hora	200	WHO

En esta tabla se han indicado los valores más restrictivos de los disponibles para calidad de aire exterior de forma intencionada, ya que los autores de este apartado consideran que ha de primar el principio de seguridad y salud.

En España, además, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), aprobado por el Real Decreto 1027/2007 y sus posteriores modificaciones, establece criterios rigurosos para garantizar la calidad del aire interior (CAI). El RITE clasifica la calidad del aire interior en cuatro categorías (IDA 1 a IDA 4), donde IDA 1 representa la calidad óptima e IDA 4 la calidad baja. Estas categorías se determinan basándose en los niveles de contaminantes, ventilación adecuada y filtración del aire.

El RITE se basa en normativas europeas como la UNE-EN 13779 y establece requisitos para la ventilación y calidad del aire en edificios no residenciales. Esto incluye la necesidad de

sistemas de ventilación que aseguren una renovación adecuada del aire y el uso de filtros que eliminen partículas y contaminantes, contribuyendo así al bienestar y la salud de los ocupantes.

El RITE considera varios parámetros clave para la calidad del aire interior (CAI), categorizando la calidad en cuatro niveles (IDA 1 a IDA 4). Los principales parámetros y sus niveles son:

DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂):

- **IDA 1:** < 350 ppm por encima del nivel exterior.
- **IDA 2:** 350–500 ppm por encima del nivel exterior.
- **IDA 3:** 500–800 ppm por encima del nivel exterior.
- **IDA 4:** > 800 ppm por encima del nivel exterior.

COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (COV):

- **IDA 1:** < 200 µg/m³.
- **IDA 2:** 200–600 µg/m³.
- **IDA 3:** 600–1000 µg/m³.
- **IDA 4:** > 1000 µg/m³.

PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN (PM₁₀ Y PM_{2.5}):

Niveles específicos no detallados, pero se recomienda la implementación de filtración adecuada según la categoría de CAI.

Además del RITE, para la catalogación de las salas según la concentración de los VOCs totales, es de tener en cuenta lo que marca la vigente norma UNE 171335_2 (“Calidad Ambiental en Interiores; parte 2: Procedimientos de inspección de calidad ambiental interior”), en la que considera también cuatro tipos de rangos en el estado de salas limpias según su concentración de totales VOCs en µg/m³, diferenciándolas en rango de confort, rango límite, rango de disconfort y rango tóxico. Es de observar que el rango de confort de esta norma, coincide con el rango de IDA 1 que aconseja el RITE para hospitales.

Tabla 6
Rasgos tipo según VOCs totales: UNE 171330: 2024 (criterios IDA del RITE)

Rangos dentro de norma	Rango aceptable de confort para IDA 1 e IDA 2 ($\leq 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) → RITE
	Rango aceptable de confort para IDA 3 e IDA 4 ($\leq 600 \mu\text{g}/\text{m}^3$) → RITE
	Rango de valor límite máximo (según IDA: 200 o 600 a $3.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
Rangos fuera de norma	Rango inaceptable de disconfort (3.000 a $25.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
	Rango tóxico ($\geq 25.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
RITE	
HOSPITAL → IDA 1 ($\leq 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	

Además, el RITE establece requisitos de ventilación, filtración y mantenimiento de los sistemas para asegurar la renovación y limpieza del aire. Para más información detallada, se sugiere consultar el RITE en el sitio web del MITECO.

6

LEGISLACIÓN RELATIVA A LA CALIDAD DEL AGUA

6.1 LEGISLACIÓN RELATIVA A LA CALIDAD DEL AGUA

DIRECTIVA MARCO DEL AGUA (2000/60/CE)

La Directiva Marco Europea del Agua (DMA) es una legislación de la Unión Europea (UE) que se estableció en 2000 con el objetivo de proteger y mejorar la calidad del agua en Europa. La DMA establece un marco integrado para la gestión sostenible de los recursos hídricos en toda la UE, basado en un enfoque de cuenca hidrográfica.

Los principales objetivos de la Directiva Marco del Agua son:

- Lograr un buen estado ecológico y químico de todas las aguas superficiales y subterráneas en la UE.
- Promover el uso sostenible del agua y prevenir su escasez.
- Proteger y mejorar los ecosistemas acuáticos y terrestres dependientes del agua.

DIRECTIVA AGUAS POTABLES (2020/2184/CE)

La Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo, emitida el 16 de diciembre de 2020, aborda la calidad del agua destinada al consumo humano. Esta Directiva tiene como objetivo principal garantizar que el agua potable proporcionada a los ciudadanos de la Unión Europea sea segura y cumpla con los estándares sanitarios más estrictos.

Entre los aspectos principales de la Directiva (UE) 2020/2184 se incluyen:

- Establecimiento de estándares de calidad del agua potable, que abarcan parámetros microbiológicos, químicos y organolépticos.
- Definición de procedimientos para la evaluación y gestión de riesgos para la calidad del agua potable, incluida la identificación de contaminantes emergentes y la toma de medidas para abordarlos.

- Obligación de los Estados miembros de la UE de monitorear regularmente la calidad del agua potable y proporcionar información transparente y accesible al público sobre los resultados de las pruebas y la calidad del agua suministrada.
- Establecimiento de medidas de protección de los recursos hídricos utilizados para el abastecimiento de agua potable, incluida la prevención de la contaminación y la protección de las fuentes de agua potable.

DIRECTIVA AGUAS RESIDUALES (91/271/CE)

La Directiva 91/271/CE del Consejo de la Unión Europea es una legislación importante en el ámbito de la gestión de aguas residuales urbanas. Fue adoptada en 1991 con el objetivo de proteger el medio ambiente, en particular, las aguas superficiales, contra la contaminación producida por las aguas residuales urbanas.

Esta Directiva establece los estándares mínimos de tratamiento de aguas residuales urbanas que deben cumplir las ciudades y zonas urbanas en la Unión Europea.

Esta Directiva está en proceso de revisión y se espera que a finales de 2024 se apruebe la nueva, que, entre otros aspectos, incluirá la incorporación de tratamientos cuaternarios para la eliminación de contaminantes de preocupación emergente, la responsabilidad ampliada del productor (RAP) o los objetivos de neutralidad energética que presentan.

REGLAMENTO REUTILIZACIÓN AGUAS RESIDUALES

El Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, emitido el 25 de mayo de 2020, establece los requisitos mínimos para la reutilización del agua en la Unión Europea para fines agrícolas.

Entre los aspectos clave del Reglamento (UE) 2020/741 se encuentran:

- Establecimiento de normas y criterios de calidad del agua reutilizada para garantizar la protección de la salud humana y el medio ambiente.
- Definición de procedimientos para la autorización y supervisión de los sistemas de reutilización del agua, incluida la evaluación de riesgos y la implementación de medidas de gestión adecuadas.
- Requerimientos para la transparencia y la información pública sobre la reutilización del agua, incluida la divulgación de datos sobre la calidad del agua y los sistemas de reutilización utilizados.
- Promoción de la investigación y la innovación en tecnologías de tratamiento de agua para mejorar la calidad del agua reutilizada y aumentar la eficiencia de los sistemas de reutilización.

REAL DECRETO REUTILIZACIÓN AGUAS RESIDUALES

El Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas en España. Este decreto tiene como objetivo regular la reutilización segura y sostenible de las aguas depuradas para usos distintos al consumo humano, como riego agrícola, usos industriales, recarga de acuíferos o usos urbanos no potables, entre otros.

Algunos aspectos destacados del Real Decreto 1620/2007 incluyen:

- Establecimiento de los requisitos técnicos y sanitarios que deben cumplir las aguas depuradas para su reutilización en diferentes usos, garantizando la protección de la salud pública y del medio ambiente.
- Definición de los procedimientos de autorización y control de los sistemas de reutilización de aguas depuradas, incluyendo la evaluación de riesgos y la monitorización de la calidad del agua.
- Promoción de la investigación y la innovación en tecnologías de tratamiento de aguas para mejorar la calidad y la eficiencia de la reutilización de aguas depuradas.
- Fomento de la planificación integrada de los recursos hídricos y la gestión sostenible del agua, promoviendo la reutilización como una herramienta para la mitigación de la escasez de agua y la presión sobre los recursos hídricos.

La Directiva Marco Europea del Agua (DMA) es una legislación de la Unión Europea (UE) que se estableció en 2000 con el objetivo de proteger y mejorar la calidad del agua en Europa



7

MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA

7.1 NORMATIVA DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Hasta hace sólo unos años, en Europa existían tan sólo tres normas de ensayos de laboratorio para el análisis de la capacidad fotocatalítica de los materiales en cuanto a abatimiento de concentraciones de óxidos de nitrógeno:

- **Norma francesa:** XP B44-011:2009-12-01: Photocatalyse – Méthode d’essai pour l’évaluation des matériaux photocatalytiques vis-à-vis de la dégradation des NOx – Méthode à un seul passage en mode tangentiel.
- **Norma italiana:** UNI 11247:2010: Determinazione dell’indice di abbattimento fotocatalitico degli ossidi di azoto in aria da parte di materiali inorganici: metodo di prova in flusso continuo.
- **Norma internacional:** ISO 22197-1:2007: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials –Part 1: Removal of nitric oxide.

Como en España no había una norma de referencia y se comenzaban a demandar aplicaciones fotocatalíticas en el sector de la construcción, se comenzó empleando la Norma UNI 11247:2010 para materiales con rugosidad, tales como aglomerados asfálticos y hormigones, dejando la Norma ISO 22197-1 para materiales sin rugosidad o menor rugosidad, como los productos cerámicos y las pinturas, entre otros.

A continuación, se muestra un resumen comparativo de las tres normas:

Con el paso de los años, en España se impuso el empleo de la Norma ISO 22197-1, como referencia para todo tipo de productos fotocatalíticos empleados en el sector de la construcción.

	ISO 22197-1	UNI 11247	XP B44-011
Q (L/min)	3.0 ± 0.05	1.5 ± 0.075	3
Flujo	Laminar, 0.2 m/s	Turbulento	Laminar
E (W/m ²)	10 ± 0.5	20 ± 1	15
C _{NO} (ppb)	1000 ± 50	400 ± 50	500 ± 20
C _{NO2} (ppb)	-	150 ± 50	250 ± 20
T (°C)	25 ± 2.5	20 - 35	25 (15 – 40)
% HR	50		50 ± 5
Duración del ensayo	6 h		Mínimo 30' y C _{NOx} estable durante 10'
Tipo de luz	Luz negra o luz negra azul, 300 – 400 nm	Filamento Hg (Osram Vitalux)	UVA, 315 – 380 nm Vis, 380 – 780 nm
Medidas de la muestra (mm ²)	100x50	64 ± 6 (≤ 20% V)	200x100
Canal de paso del gas (mm ²)	50x5	-	100x5
Pretratamiento muestra	5h UV ≥ 10 W/m ² 2h agua desionizada Secado a T < 110 °C	3 días 25 ± 3 °C y 60 ± 10 % HR.	Depende de la muestra (pintura, cemento). Acondicionamiento, 24h a 60°C
Elución muestra	Sí, nitratos y nitritos por cromatografía líquida	-	-
Cantos sellados	Sí, parafilm	Sí, parafilm También, A > 64 cm ²	Sí, parafilm
Cálculos	NO adsorbido, NO eliminado, NO ₂ formado, NOx desorbido, NOx eliminado neto; N eluido (moles)	$A_c = 100 \times \frac{(C_B - C_L)}{C_B} \times \frac{I_N}{I} \times \frac{S_N}{S}$	[NO] _{t=0} ppbv [NO ₂] _{t=0} ppbv [NO] _t ppbv [NO ₂] _t ppbv Disminución (%)

Figura 49: Comparativa de condiciones de ensayo de las Normas Francesa (XP), Italiana (UNI) e Internacional (ISO). Fuente: Eptisa-Aidico.

Posteriormente se elaboraron las siguientes normas españolas, también referidas a niveles de abatimiento de óxidos de nitrógeno:

- **Norma española:** UNE ISO 22197-1:2012: Cerámicas técnicas (cerámicas avanzadas, cerámicas técnicas avanzadas). Método de ensayo relativo al funcionamiento de materiales fotocatalíticos semiconductores para la purificación del aire. Parte 1: eliminación de óxido nítrico. Esta norma es la adaptación española a la Norma ISO 22197-1.
- **Norma española:** UNE 127197-1:2013 (versión corregida en fecha 2014-02-12). Aplicación del método de ensayo para evaluar el rendimiento en la purificación de aire mediante materiales semiconductores fotocatalíticos embebidos en productos prefabricados de hormigón. Parte 1: Eliminación de óxidos de nitrógeno. Esta norma es igualmente una adaptación de la ISO 22197-1, con la diferencia del establecimiento de una jerarquía de clases, en función de su eficiencia descontaminante, y sólo para productos prefabricados de hormigón. Sin embargo, a falta de un protocolo claro de actuación, la aplicación de esta norma se ha extrapolado para evaluar todo tipo de productos fotocatalíticos, con independencia de los materiales que lo componen.
- **Norma española:** UNE EN 16980-1:2022: Métodos de ensayo de flujo continuo. Parte 1: Determinación de la degradación del óxido nítrico (NO) en el aire mediante materiales fotocatalíticos. Esta norma especifica un método para evaluar el rendimiento de los materiales inorgánicos fotocatalíticos contenidos en morteros de cemento y/o cales o matrices en base cerámica, pinturas o materiales depositados como películas delgadas o recubrimientos en una variedad de sustratos para la reducción fotocatalítica de óxido nítrico en la fase gaseosa.

Tabla 7
Norma UNE 127197-1:2013 para clasificación de producto según el rendimiento de la purificación de aire NOx en prefabricados de hormigón

Clase	Rendimiento de la purificación del aire NOx
Clase 0 - sin actividad	$\chi_{\text{NOx}} < 4,0\%$
Clase 1	$4,0\% \leq \chi_{\text{NOx}} \leq 6,0\%$
Clase 2	$6,0\% < \chi_{\text{NOx}} \leq 8,0\%$
Clase 3	$\chi_{\text{NOx}} > 8,0\%$

No obstante, como las aplicaciones fotocatalíticas son muy diversas, a continuación, se resumen en un listado las Normas internacionales empleadas tanto para evaluar su capacidad en exteriores, como en interiores:

Por último, cabe mencionar que el CEAM posee la Cámara Euphore, semiesfera que permite reproducir la contaminación ambiental de cualquier punto de una ciudad y realizar análisis de eficiencia fotocatalítica a escala 1:1, como se ha podido observar en los casos de estudio de los toldos ([apartado 8.2.4](#)) o los revestimientos cerámicos de fachada descontaminantes ([apartado 8.3.2](#)).

Tabla 8
Resumen de normas internacionales para evaluación de aplicaciones fotocatalíticas en exteriores e interiores

Capacidad	Método de ensayo	Convencionales (Exterior)		Ambiente Interior	
		Nº Nacional	Nº Internacional	Nº Nac.	Nº Internacional
Autolimpieza	Cambio ángulo con-tacto con el agua	JISR 1703-1:2007	ISO 27448-1:2010		ISO 19810:2017
	Azul de metileno	JISR 1703-2:2007	ISO 10678:2010		
	Rodamina B	UNI 11259:2008			
Purificación del aire	Eliminación NOx	JISR 1701-1:2010	ISO 22197-1:2016 y CEN/TS 16980-1		ISO Eliminación NOx 17168-1:2018
		UNI 11247:2010			
		UNI 11484:2013			
		XP B 44-011:2009			
	Eliminación VOCs	UNI 11238-1:2007			
		UNI 11238-2:2007			
		XP B 44-013			
	Acetaldehído	JISR 1701-2:2008	ISO 22197-2:2011 (actualmente en revisión)		ISO 17168-2:2018
	Tolueno	JISR 1701-3:2007	ISO 22197-3:2011 (actualmente en revisión)		ISO 17168-3:2018
	Formaldehído	JISR 1701-4:2008	ISO 22197-4:2013		ISO 17168-4:2018
	Metil-mercaptano	JISR 1701-5:2008	ISO 22197-5:2013		ISO 17168-5:2018
	Cámara de ensayo				ISO 18560-1:2014
Efecto Biocida	Actividad antibacteriana	JISR 1702:2006	ISO 27447:2009		ISO 17094:2014
	Actividad antibacteriana (semihúmeda)				ISO 22551:2020
	Actividad antifúngica	JISR 1705:2008	ISO 13125:2013		
	Antiviral		ISO 18061:2014		ISO 18071:2016
	Antialga		ISO 19635:2016		
Agua	Dimetilsulfóxido		ISO 10676:2010		
Otros	Fuente de luz ultra-violeta	JISR 1709:2007	ISO 10677:2011		ISO 14605:2013
	Eficiencia cuántica		PWI 19728 (propuesta 2013)		
	Descomposición completa				ISO 19652:2018
	Oxígeno disuelto		ISO 19722:2017		
	Carbono orgánico total		CD 22601 (propuesta 2017)		
	Película de tinta		ISO 21066:2018		

7.2 NORMATIVA DE ENSAYOS *IN SITU*

Con objetivo de determinar el efecto descontaminante de los productos fotocatalíticos aplicados sobre infraestructuras urbanas, más allá de los ensayos de laboratorio, se han desarrollado varias modalidades de ensayos de medidas *in situ*, que no poseen ningún tipo de certificación (ambiental, calidad, etc.), ni se encuentran amparados por ningún marco legal, pero que, sin embargo, permiten conocer el funcionamiento de estos productos, así como su eficacia a lo largo del tiempo, sin necesidad de afectar a la integridad del elemento constructivo (es decir, sin necesidad de extraer testigos).

En este sentido, empresas de ingeniería pioneras en el sector de la Fotocatálisis, como Eptisa; Servicios de ingeniería, o centros tecnológicos de referencia, como el Instituto Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), han desarrollado equipos de evaluación *in situ* de la capacidad descontaminante de productos de construcción.

Alternativamente a estos métodos de control, existe la posibilidad de controlar la actividad descontaminante o autolimpiante *in situ*, a lo largo del tiempo, mediante el empleo de muestras testigo o probetas normalizadas de dimensiones en planta 10 cm x 5 cm y 1 cm de espesor, del mismo material sobre el que se vaya a aplicar el tratamiento fotocatalítico, sobre cualquier tipo de superficie, de manera que las muestras queden embebidas o colocadas sobre la superficie a tratar, antes de la aplicación. Serán estas muestras las que, una vez tratadas con materiales fotocatalíticos, se lleven a ensayar de manera normalizada a laboratorio, a partir de la Norma UNE ISO 22197-1:2012 o la UNE 127197-1:2013, permitiendo estimar el grado de mejora de calidad del aire a lo largo del tiempo.

Sin embargo, hay que tener en consideración que este último método de control *in situ* tiene las siguientes limitaciones de cara a la interpretación de resultados:



Figura 50: Certificación de Proyecto de Investigación y Desarrollo, para la realización de ensayos *in situ*, concedido a la Empresa Eptisa, Servicios de Ingeniería.



Figura 51: Ejemplo de muestras embebidas en la superficie de tratamiento fotocatalítico (en este caso una cuneta), para posterior seguimiento en laboratorio, por métodos normalizados. Fuente: AIF.



Figura 52: Ejemplo de muestra colocada en la superficie de tratamiento fotocatalítico (en este caso un elemento de contención de una carretera), para posterior seguimiento en laboratorio, por métodos normalizados. Fuente: AIF.

- La manipulación de las probetas, desde el periodo de fabricación, hasta la finalización del seguimiento. Es posible que durante las operaciones de fabricación de las probetas (tallados de testigo o bloques extraídos de obras), los envíos del laboratorio a obra (para la fase de obra, antes del tratamiento), los envíos de obra al laboratorio (para la realización de los ensayos de seguimiento), y los envíos de este, de nuevo, a obra (para futuras nuevas recogidas y seguimiento a lo largo del tiempo), se pueda producir algún tipo de deterioro o rotura en las dimensiones de la probeta, que afecte al resultado de eficiencia final. Teniendo en cuenta las reducidas dimensiones de las probetas, cualquier pérdida de árido o rotura de esquina, durante el proceso, tiene un impacto adverso muy significativo en la dotación de fotocatalizador, y también, en los resultados finales obtenidos.
- Las concentraciones de monóxido de nitrógeno que se producen a escala real son aproximadamente 2 órdenes de magnitud inferiores a las que se introducen en la unidad de dilución del ensayo normalizado de laboratorio, lo cual, sumado a las pequeñas dimensiones de las probetas asociadas a dicho ensayo, hacen que los resultados de laboratorio no puedan ser comparables con los obtenidos a escala real, mediante medidas directas, como estaciones de calidad del aire, por citar un ejemplo.

El procedimiento de control de seguimiento, a partir de muestras testigo o probetas que a continuación se describe, ha sido desde hace unos años el método habitualmente seguido por centros de investigación públicos, y consiste en establecer un mecanismo de pre-tratamiento patrón, a las muestras ya embebidas en la superficie tratada, en su recepción en laboratorio, y por tanto, comparable en los distintos periodos de seguimiento, y consiste en seguir este procedimiento:

-  1. Recepción de muestras de obras en el laboratorio.
-  2. Pesaje de la muestra antes del pretratamiento patrón.
-  3. Lavado de la muestra mediante 30 inmersiones en agua destilada, simulando los efectos de precipitaciones atmosféricas.
-  4. Secado en estufa.
-  5. Pesaje de la muestra tras el pre-tratamiento, para obtener la dosificación en seco real de la muestra.
-  6. Inicio del ensayo normalizado para determinación del abatimiento de concentraciones de NO y NOx.

7.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN A ESCALA REAL

Los métodos de la evaluación del impacto de los materiales fotocatalíticos a escala real pueden llevarse a cabo en zonas controladas, como prototipos a escala casi real con configuración tipo “Street canyon” (Proyecto LIFE PhotoPaa) (simulación de efecto de calles confinadas entre edificios de gran altura), o en escenarios reales eligiendo zonas adecuadas en una ciudad <https://www.ineco.com/ineco/proyectos/proyecto-life-minox-street>, <https://www.cartif.es/life-equinox/>.

Para la evaluación del impacto de la actividad de materiales fotocatalíticos *in situ*, en la mejora de la calidad del aire, se pueden emplear diversos métodos de medición directa de la concentración de NO₂ u otros contaminantes en aire. Las concentraciones de NO₂ sería el parámetro mínimo que habría que analizar. Hay que decir también que es el que resulta más sencillo y barato en términos de monitorización. Entre los métodos existentes para la medida de NO₂ en campo se pueden destacar, el método oficial, a partir de las estaciones de medición de calidad del aire de la Administración pública, la instalación de sensores, analizadores o estaciones móviles de calidad del aire, los captadores pasivos y los sensores de bajo coste.

7.3.1 ESTACIONES DE CALIDAD DEL AIRE FIJAS (OFICIALES)

La medida de NO₂, siguiendo el método oficial, que es el que se emplea en las estaciones públicas de vigilancia de calidad del aire, que tienen las ciudades y otras administraciones, requiere de equipos y procedimientos que resultan muy

costosos para evaluar la eficiencia de un material fotocatalítico. Las estaciones oficiales no se pueden emplear para evaluar productos fotocatalíticos por la funcionalidad que tienen, pero se podrían emplear como estaciones de referencia, si fuera necesario, y especialmente a efectos de calibración de estaciones móviles.

La razón fundamental es que si la cuantía de la superficie del activo tratada fotocatalíticamente no es suficientemente representativa, es altamente complicado que una estación de calidad del aire, situada a varios kilómetros, sea capaz de detectar los efectos de esa aplicación, salvo que la densidad de la superficie de aplicación sea muy elevada, acercándose al concepto de Isla Fotocatalítica y, además, la estación de vigilancia se localice en las cercanías del centro de gravedad de la superficie aplicada.

7.3.2 ESTACIONES DE CALIDAD DEL AIRE MÓVILES

Alternativamente, existen en el mercado unidades de medición compactas de evaluación de calidad del aire con distinta tecnología, pero con un nivel de fiabilidad muy elevado. Si bien, se recomienda que se calibren previamente con las anteriores (método oficial), para garantizar su representatividad y validez. Esta solución supone un menor coste, proporcionando un nivel de fiabilidad muy elevado. Estas estaciones permiten el seguimiento, además de la concentración de NO_2 , de la concentración de NO , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} e incluso de O_3 . Se pueden incluir también el registro de los datos meteorológicos en la zona. Estos parámetros se pueden emplear para completar los estudios del impacto del tratamiento fotocatalítico en la calidad del aire. Asimismo, con este método se dispone de una resolución temporal muy alta, típicamente 10-15 minutos que permite analizar la evolución diaria de las concentraciones de los parámetros de interés.

7.3.3 CAPTADORES PASIVOS

El procedimiento pasivo de captación de NO_2 tiene su fundamento en los fenómenos de difusión y permeación (Comunidad de Madrid, 2016). De esta forma, las moléculas de un gas, que están en constante movimiento, son capaces de penetrar y difundirse espontáneamente a través de la masa de otro gas, hasta repartirse uniformemente en su seno. En el difusor pasivo se produce un gradiente de concentraciones del contaminante a determinar entre la concentración en el ambiente exterior y la concentración nula de este contaminante en el aire interior del agente absorbente. Este gradiente de concentraciones es la fuerza que mueve, por difusión, al contaminante desde el ambiente exterior, a través del captador, hasta llegar al absorbente.

El nivel de precisión de esta técnica no es muy alto y se suele recomendar la instalación de un número elevado de captadores. Por otro lado, no permite tener una resolución temporal detallada, ya que la periodicidad de sus datos es muy baja, normalmente mensual. Su principal ventaja es que se trata de un sistema más barato y más sencillo de analizar.

7.3.4 SENSORES DE BAJO COSTE

Los denominados “sensores de bajo coste” suponen una alternativa intermedia entre las formas de medición anteriores. Estos sensores permiten una resolución temporal muy alta pero la fiabilidad y la sensibilidad de la información que proporcionan no alcanza a la del método oficial. Sin embargo, para este tipo de ensayos pueden ser adecuados buscando localizaciones con altos niveles de NO_2 .

Existen varios dispositivos en el mercado que pueden emplearse para la monitorización de la zona de ensayo. El número de dispositivos necesarios dependerá de la superficie y de la metodología elegida para llevar a cabo la evaluación.

7.3.5 CONCLUSIONES

A modo de resumen, en relación a la metodología a emplear para realizar la evaluación del impacto, debido a la aplicación de materiales fotocatalíticos en un área determinada, el objetivo principal es identificar cambios en la concentración de NO_2 por parte de estos materiales fotocatalíticos, en series temporales de datos que están influenciados además por otros factores –como los meteorológicos y el tráfico– que tienen una mayor influencia. Por este motivo, para trabajos en campo se intenta acercar lo máximo posible los equipos de medida a la superficie fotocatalítica.

Cuando se plantee la elección y el diseño del método de medición, lo primero que hay que tener en cuenta es que, con independencia del sistema que elija, se recomienda tener un lugar que sirva de referencia, a modo de comparación con el tramo o zona tratada fotocatalíticamente. Este tramo se define como un tramo de características similares al de ensayo, pero en el que no se aplica el tratamiento o se instala el producto fotocatalítico. Además, es muy recomendable instalar los sensores, tanto en la zona de referencia, como en la zona de tratamiento, un tiempo antes de la aplicación del tratamiento fotocatalítico, de forma que se pueda establecer una equivalencia entre ambos.

En relación al análisis de la información registrada para la discusión de los resultados, básicamente, se compararán las concentraciones de contaminante en los distintos tramos. Adicionalmente, el análisis se puede completar incluyendo la influencia de la meteorología durante el estudio particularmente del viento y de la lluvia, **(ver apartado 8.1.6.2)** del tráfico, si se dispone de la información necesaria, de la variación diaria entre los distintos tramos de estudio, de la influencia de las horas de luz en las distintas estaciones, etc. Asimismo, si se dispone de la información necesaria, se puede completar el estudio empleando como referencia las concentraciones del resto de los contaminantes principales medidos, PM y O_3 .

En definitiva, se recomienda diseñar una adecuada metodología de monitorización e incorporarla en los Pliegos de Prescripciones Técnicas de los Proyectos, si lo que se pretende es evaluar la eficiencia descontaminante de este tipo de materiales fotocatalíticos, en el tiempo.

7.4 MODELOS DE PREDICCIÓN

Además de los métodos disponibles comentados anteriormente que requieren una monitorización específica, se puede emplear modelado para estimar el impacto que tendría la aplicación de productos fotocatalíticos en una zona determinada.

Existen varios estudios realizados que describen la metodología empleada. Se han empleado desde softwares comerciales como el ADMS (<https://www.cartif.es/life-equinox/>) hasta modelos avanzados de mecánica de fluidos computacional <https://www.ineco.com/ineco/proyectos/proyecto-life-minox-street> (CFD, por sus siglas en inglés).

Hay que comentar, sin embargo, que la utilización de estos métodos requiere tanto medios como experiencia para poder tener unos resultados con un cierto grado de fiabilidad. Normalmente, tanto los medios como la experiencia, solo se suelen encontrar en universidades, organismos de investigación y centros tecnológicos. Aunque pueden ser adecuados para estimar el impacto que pueden tener estos materiales en la calidad del aire sin implementaciones en campo, **hay que asumir aún considerables grados de incertidumbre asociados a los propios modelos y a la información de entrada a los modelos.**

7.5 CERTIFICADO DE EFICIENCIA DE MATERIAL FOTOCATALÍTICO

Ver apartado 10.1, donde se trata con detalle esta temática.

8 CASOS DE ESTUDIO

8.1 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS

8.1.1 PROYECTO VILLAVERDE (MADRID)

Dentro del Programa Operativo FEDER Madrid 2007-2013 (Iniciativa Urbana), el Ayuntamiento de Madrid adjudicó la primera obra de aplicación de productos fotocatalíticos a gran escala en España, sobre una superficie total de unos 21.000 m² en el distrito de Villaverde (proyecto de innovación y desarrollo tecnológico en materia de fotocatalisis para la descontaminación del aire: aplicación de pavimentos y revestimientos sostenibles para la descontaminación del aire mediante la eliminación de óxidos de nitrógeno en el distrito de Villaverde).

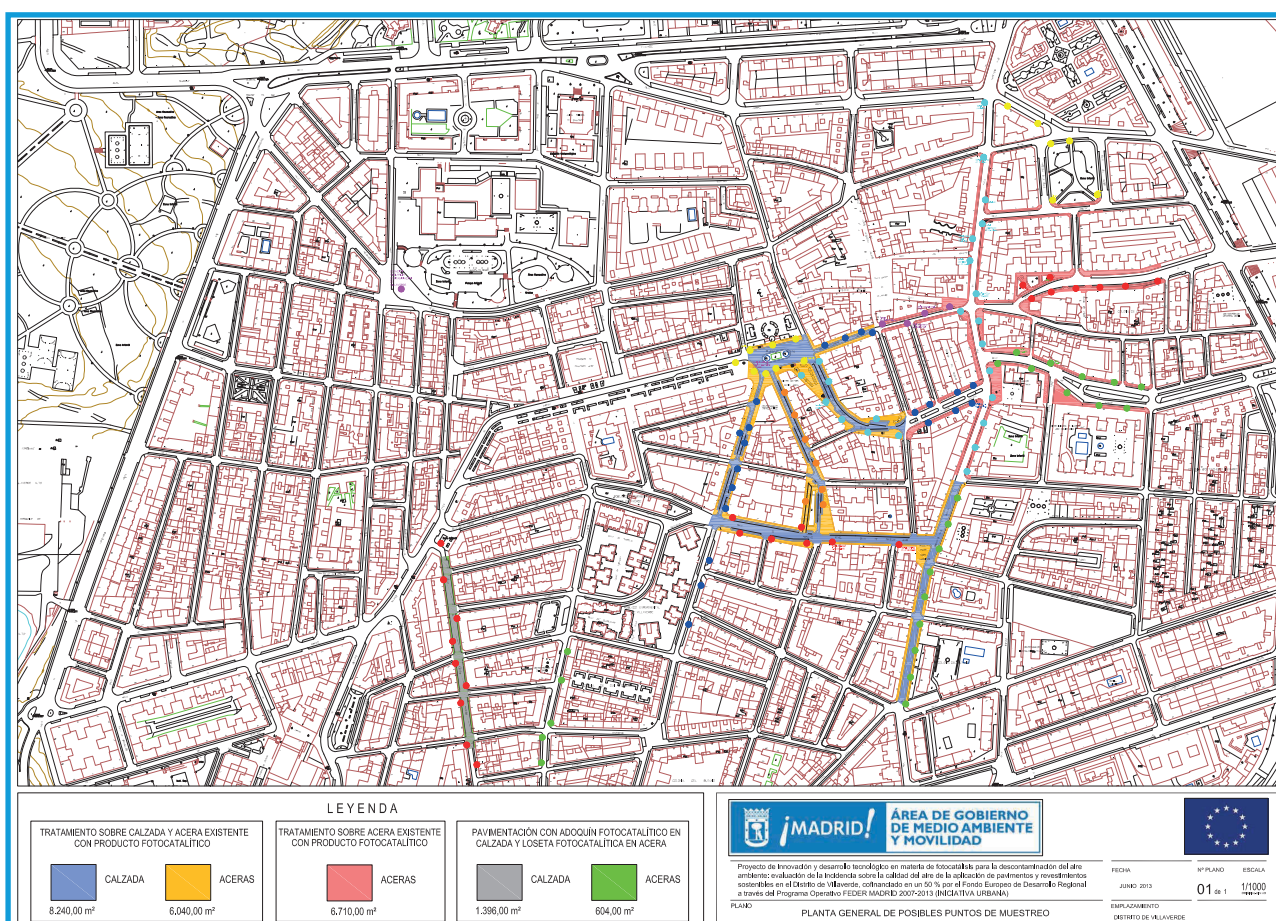


Figura 53: Distrito de Villaverde – áreas de aplicación de los productos fotocatalíticos. Fuente: Ayto. de Madrid.

La empresa adjudicataria de esta obra fue ALVAC SA, que, en colaboración con Impresa Bacchi srl, realizó la obra en noviembre del 2014, con la aplicación del revestimiento superficial fotocatalítico sobre los pavimentos de aceras (adoquines y losas de hormigón y piedra natural) y calzadas bituminosas.

El Ayuntamiento de Madrid, a través de la UTE Eptisa – Fundación Cartif, llevó a cabo la evaluación de la incidencia de estas aplicaciones en la calidad del aire ambiente mediante:

- Campañas de medición de dióxido de nitrógeno con captadores pasivos tipo tubo.
- Monitorización en continuo de óxidos de nitrógeno y ozono, según método de referencia, y de variables meteorológicas y de radiación UV-A.
- Red experimental inalámbrica de sensores de gases basados en la tecnología metal-óxido o electroquímica.
- Medida del tráfico mediante aforos.

Los resultados del proyecto no han sido publicados por el momento, que se tenga constancia, pero en las jornadas y congresos donde se ha presentado este estudio, el Ayuntamiento de Madrid ha manifestado, por una parte la dificultad de la interpretación de las mediciones obtenidas por los distintos aparatos y sensores; por otra, se confirma que la aplicación de esta tecnología no aumenta las concentraciones de ozono, O_3 , ni las partículas en suspensión $PM_{2.5}$ y PM_{10} , en cuanto a afecciones a la salud se refiere, y por otra, que los resultados finales de eficiencia descontaminante al cabo de un año son casi despreciables.

Los fabricantes y aplicadores, por otro lado, reportan que una parte de la aplicación de este tratamiento se hizo sobre pavimentos en mal estado y bajo condiciones meteorológicas adversas (lluvias durante la ejecución). Tampoco se conocen las operaciones de mantenimiento y su frecuencia asociada, en su caso, que el Ayuntamiento pudiera haber llevado a cabo tras la aplicación del tratamiento.



Figura 54: Analizador automático en continuo para la determinación en el aire ambiente de óxidos de nitrógeno (NO , NO_2 , NO_x) y de ozono (O_3) puesto en la plaza de Ágata. Fuente: Eptisa.

8.1.2 PROYECTO LIGHT2CAT (VALENCIA)

Se trata de un proyecto de I+D (<https://www.facebook.com/Light2cat>) destinado a la mejora de la calidad del aire atmosférico, financiado por el Séptimo Programa Marco de la Unión Europea (FP7). El proyecto está liderado por el Instituto Tecnológico Danés y la participación española estaba formada por la empresa HERMO, el

Instituto Tecnológico de la Construcción (AIDICO), la Fundación InnDEA Valencia y el Ayuntamiento de Valencia.

La tecnología desarrollada consistió en el empleo de hormigones fotocatalíticos para la fabricación de baldosas de hormigón prefabricadas para pavimento peatonal, de elevada eficiencia bajo luz visible (artificial).

La calle elegida para este piloto fue Félix Pizcueta, donde se instaló un equipo de medida de la contaminación existente antes de la incorporación del pavimento fotocatalítico, con objeto de registrar medidas de concentraciones de NOx antes y después de la incorporación del pavimento fotocatalítico.

Los trabajos de ejecución del pavimento peatonal fotocatalítico de baldosas comenzaron el 8 de enero de 2015 y finalizaron a finales de febrero de 2015.

A la finalización del proyecto, a mediados del año 2015, se obtuvieron los primeros resultados y las primeras conclusiones. Para la interpretación de las mismas se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- No se dispone de datos del mes de marzo de 2015.
- Las medidas tomadas corresponden a 3 meses antes de la instalación del pavimento fotocatalítico y otros 2 meses después.
- La calle donde se realizó el piloto estuvo parcialmente cerrada al tráfico durante unos días del mes de abril, debido a obras en la calzada.
- Se ha reducido la capacidad de la calzada de la calle, de dos a un carril.



Figura 55: Localización de la calle donde se desarrollaría el piloto a escala real. Fuente: Light2cat.



Figura 56: Equipo de medición de la calidad del aire en C/ Félix Pizcueta. Valencia. Fuente: Light2cat.



Figura 57: Suministro de baldosas prefabricadas con hormigón fotocatalítico. Fuente: Light2cat.

Con los valores de concentraciones de NO_x, también se tomaron datos de radiación solar media, humedad relativa y temperatura ambiente. Todos ellos se corresponderían con valores medios medidos por mes.

Las conclusiones que se aportaron a la finalización del estudio, teniendo en cuenta los aspectos anteriormente mencionados, fueron: "Se puede

concluir que, aparentemente y a falta de tener un contraste mayor, sí se aprecia una reducción de concentraciones de NO_x en la calle donde se ha realizado el piloto".

	Nox ppb	Radiacion solar media	RH_Amb	T_Amb
Noviembre	65,3	71,5	64,8	17,1
Diciembre	95,1	51,9	58,7	12,8
Enero	82,4	58,1	55,4	12,4
Abril	27,9		63,9	16,9
Mayo	39,7		55,1	21,9
Valores medios por mes				

Figura 58: Resultados de lecturas de parámetros en Proyecto Light2cat.

A mediados del año 2019, el científico y profesor Andrea Folli (School of Chemistry, Cardiff University), en relación al seguimiento del Proyecto Light2cat, comentó en la jornada de presentación de conclusiones del Proyecto LIFE Photoscaling, en la cual intervino como ponente, que este pavimento actualmente, es decir, más de 4,5 años después de su aplicación, sigue teniendo eficiencia descontaminante.

8.1.3 PROYECTO LIFE EQUINOX (MADRID)

El objetivo general de este proyecto (<https://www.ineco.com/ineco/proyectos/proyecto-life-minox-street>), coordinado por Fundación Cartify y con el Ayuntamiento de Madrid, ELSAN y REPSOL como socios, era evaluar la eficacia de un tratamiento superficial fotocatalítico en base acuosa, cuyo diseño y formulación formaba parte del de un proyecto previo (dentro del Marco del Proyecto Fénix: http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R40_A12.pdf), en la eliminación de óxidos de nitrógeno de una zona urbana. La evaluación del impacto del tratamiento se realizó empleando una monitorización *in situ* de la concentración de NO₂. Además, utilizando el software ADMS road (<https://www.cerc.co.uk/environmental-software/ADMS-Roads-model.html>) se modelizó la calidad del aire de la zona y el posible impacto del tratamiento en las distintas épocas del año.

Tras el diseño y formulación del tratamiento superficial fotocatalítico, se llevó a cabo una aplicación, en dos fases, sobre un total de 95.100 m² de superficie asfaltada existente en el barrio de Chamberí (Madrid). En esta zona hay vías con Intensidades Medias Diarias (IMD) que pueden llegar hasta los 80.000 vehículos por día y otras que se encontraban alrededor de los 10.000 vehículos por día. Para analizar la eficiencia de este tratamiento concreto se estableció una red de sensores y un modelo predictivo, a tal fin, además de la evaluación de la eficiencia sobre la extracción de testigos y su posterior ensayo a escala laboratorio.

Para el análisis de toda la información recogida se desarrolló una metodología aplicable a series de datos de calidad del aire para tratar de identificar diferencias significativas

entre la calidad del aire, antes y después de la aplicación del tratamiento fotocatalítico. Para aplicar dicha metodología, se tomaban como referencia tramos similares en tráfico y disposición y relativamente próximas a la zona de ensayo. De esta forma, se podía evaluar la influencia de otras variables que afectan mucho a la calidad del aire.

El análisis de los resultados de la red de sensores no mostró nada concluyente en cuanto a la efectividad del tratamiento en la mayoría de los tramos de estudio y de las condiciones de estudio evaluadas. Se encontró que, para muchos tramos, durante los 3-4 primeros meses después de la aplicación se veía una reducción en la concentración de NO_2 frente a la esperada, pero esta reducción no era estadísticamente significativa como para asegurar que se debía al tratamiento fotocatalítico. Sin embargo, hay que destacar que, durante la segunda fase de la aplicación a escala real, el tratamiento sí mostró registros que sugerían reducciones de la concentración de NO_2 estadísticamente significativas en un 42% y en un 25% frente a las esperadas respectivamente, para los tratamientos ejecutados en la calle de Alberto Aguilera y la glorieta Ruiz Giménez durante el primer mes después de la aplicación.

De los testigos ensayados a escala laboratorio, en condiciones normalizadas (ISO 22197:1), se obtuvieron resultados medios en el entorno del 10% de reducción de NO_x , mostrando además una gran dispersión de resultados. Esto ha demostrado que la aplicación tiene que realizarse adecuadamente para asegurar una mínima homogeneidad. Además, el estado del pavimento también influye en este resultado.

El estudio de modelado realizado mostró que, en ciertas situaciones, el tratamiento tiene un impacto positivo en la reducción de la concentración de NO_2 y en otras (fundamentalmente en épocas de inestabilidad atmosférica) el impacto es inapreciable, en línea con lo encontrado cuando se emplearon sensores de NO_2 .



Figura 59: Detalle de sensor instalado en zona de aplicación del tratamiento superficial fotocatalítico. Fuente: Cartif.

Como conclusiones finales, se podría citar que la durabilidad del tratamiento diseñado exprofeso para este proyecto debería aumentarse (pero hay que tener en cuenta el reto que supone el alto valor de IMD registrado en la zona), con objeto de demorar futuras intervenciones, pues de lo contrario, debería aplicarse al menos 2 veces por año para asegurar su eficiencia descontaminante. En este sentido la recomendación, a nivel de mantenimiento, sería su aplicación en otoño para conseguir los mejores resultados durante los episodios de inversión térmica (suelen provocar periodos de altas concentraciones de contaminantes) que se producen durante los últimos días del otoño y el invierno. Sin embargo, se cree que una mayor investigación en el tratamiento puede conducir a aumentar su durabilidad y se recomienda que los tratamientos que se desarrollen para este tipo de aplicación se prueben en pequeños tramos en condiciones reales con altas IMD de tráfico antes de escalar el resultado.

En relación al impacto del tratamiento de materiales fotocatalíticos en pavimentos asfálticos, se puede decir que no es sencillo de apreciar su efecto en la concentración

de NO_2 a escala real. La gran cantidad de factores que afectan a la concentración NO_2 y que tienen una gran variabilidad horaria, diaria, semanal y estacional, dificultan encontrar el impacto del tratamiento fotocatalítico en series temporales de la concentración de NO_2 . A tal efecto, se recomienda emplear una metodología de análisis de datos que tenga en cuenta estas variables y que estadísticamente pueda identificar cambios significativos debidos al tratamiento fotocatalítico como el desarrollado en este proyecto.

Por otra parte, no se realizó un análisis de la viabilidad económica de la aplicación de este tratamiento como tal, pero un sencillo estudio económico ha mostrado que el coste de la aplicación del tratamiento descontaminante es muy bajo en comparación con el coste de las operaciones de mantenimiento más habituales realizadas en pavimentos asfálticos. Además, estas aplicaciones son compatibles con la realización de otras operaciones como las de renovación de capa de rodadura, el re-pintado de las marcas viales u otras, lo que permite reducir el coste asociado a operarios y operaciones auxiliares. Realizar un análisis de la viabilidad económica del mismo, supondría disponer al menos de información sobre los costes reales que tiene la baja calidad del aire urbano en daños a la salud humana y del patrimonio (este ejercicio no se ha realizado en este proyecto).

Toda esta información ha sido extractada, casi literalmente del documento, Final Report del Proyecto (<https://www.cartif.es/life-equinox/>).

8.1.4 PROYECTO LIFE MINOX STREET. ALCOBENDAS (MADRID)

Este proyecto, finalizado en 2018 y financiado dentro del programa LIFE+ de la UE, ha sido coordinado por Ineco y ha contado con la participación del CIEMAT, el Ayuntamiento de Alcobendas y el CEDEX. Su objetivo ha sido evaluar la reducción mediante fotocatalisis de la contaminación del aire –fundamentalmente los óxidos de nitrógeno–, emitido por el tráfico en las ciudades. El proyecto ha pretendido ofrecer a las autoridades locales directrices en el uso de esta tecnología para la gestión de la calidad del aire. Para ello, se seleccionaron 26 productos fotocatalíticos comerciales presentes en el mercado en 2014, para ser aplicados sobre tres tipos de superficies (calzadas, aceras y fachadas) en 2 escenarios urbanos diferentes de la ciudad de Alcobendas. Se determinaron sus eficiencias mediante ensayos de laboratorio según norma ISO 22197-1, hasta seleccionar los más eficientes para ser aplicados en condiciones de ensayo controlado y posterior ensayo en campo en condiciones reales. Se desarrolló un modelo numérico a microescala de la química atmosférica urbana considerando el efecto sumidero de NO_x en presencia de materiales fotocatalíticos.

Para la selección de los materiales fotocatalíticos más eficientes, además de determinar su eficiencia, se realizó una batería de ensayos de caracterización mecánica, durabilidad y envejecimiento. Finalmente, se seleccionaron los materiales determinados como más eficientes, tanto para pavimentos bituminosos sobre asfalto como para pavimentos de hormigón para aceras y pinturas para fachadas.

Los ensayos acelerados de firmes a escala real se realizaron en la Pista de Ensayo del CEDEX, con objeto de valorar la resistencia mecánica, resistencia al deslizamiento, sensibilidad al agua, contenido de huecos y pérdida de partículas de los diferentes materiales fotocatalíticos. En el caso de los pavimentos de hormigón, se llevaron a cabo ensayos físicos (caracterización de propiedades mecánicas), controles geométricos, ensayos de absorción de agua, resistencia a la rotura, resistencia al desgaste, resistencia al deslizamiento y resistencia al hielo-deshielo.

Una vez realizados estos estudios iniciales, se identificaron los productos con mejor comportamiento para su aplicación en obra, a escala real y su posterior seguimiento. Este seguimiento se realizó desde dos puntos de vista: seguimiento a escala real, mediante toma de muestras y ensayos de laboratorio de eficiencia descontaminante según norma y mediante modelos de predicción ambiental.

Algunos de los fabricantes que han participado en este proceso han publicado en su página web los resultados de las investigaciones realizadas con su producto. Concretamente, una micro-emulsión con base acuosa, Coverlite®, se ha aplicado sobre un soporte asfáltico existente (mezcla de tipo S12, actualmente denominada AC 16 SURF) y también sobre un soporte de hormigón existente.

A continuación, se muestran algunos de los resultados más significativos de la aplicación sobre pavimento bituminoso, que ha declarado esta empresa:

A) Reducción de concentraciones de NOx, en cuanto a la resistencia a envejecimiento

Se han realizado ensayos manteniendo las muestras en condiciones de intemperie, situándolas en un panel con orientación sur y ángulo de inclinación de 45° (latitud 40° 27' 20" N, longitud 3° 43' 48" W) tras una exposición de 1.500 h. En estas condiciones las muestras permanecen expuestas a los cambios de radiación solar, variación de la temperatura y humedad, así como concentración de óxidos de nitrógeno y otros contaminantes presentes en el aire exterior, características del ciclo día-noche.

Muestra	Descripción	Área muestra cm ²	FOTO
M14A	Pavimento bituminoso S12, aditivado con Coverlite (enviado por la empresa Bacchi, febrero 2014)	48,5	
M14B	Pavimento bituminoso D12 sin envejecer, aditivado con Coverlite (enviado por la empresa Bacchi, abril 2014)	48,5	
M14C	Pavimento bituminoso envejecido, D12, aditivado con Coverlite (enviado por la empresa Bacchi, abril 2014)	48,0	

Figura 60: Codificación de muestras y aspecto.
Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.

A la luz de estos resultados, se sugiere que este producto, concretamente, tiene una **buena resistencia al envejecimiento**, pues su eficiencia descontaminante no sólo no se ha reducido, sino que ha aumentado con el tiempo.

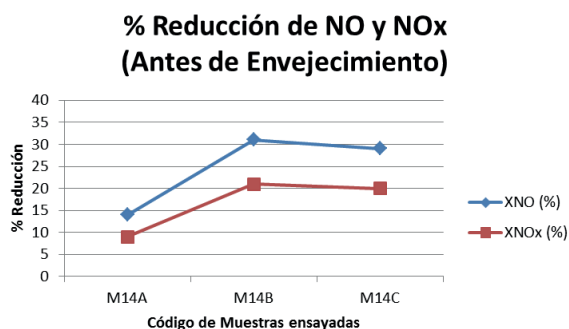


Figura 61: Reducción de NOx, antes de envejecimiento. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.

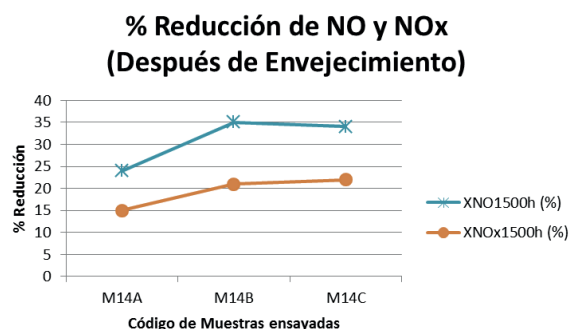


Figura 62: Reducción de NOx, tras envejecimiento. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.

B) Influencia sobre las características de una mezcla bituminosa de tipo AC 16

Se han realizado ensayos de sensibilidad al agua sobre probetas sobre una muestra patrón convencional y sobre la misma muestra, pero con la aplicación del tratamiento superficial fotocatalítico.

Aunque no se dispone de datos suficientes para poder establecer conclusiones, en este ensayo en concreto, se observa una ligera reducción en la sensibilidad al agua de la mezcla cuando se le aplica el tratamiento fotocatalítico.

Se han realizado ensayos de resistencia a la deformación permanente sobre probetas, a partir de una muestra patrón convencional y sobre la misma muestra, pero con la aplicación del tratamiento superficial fotocatalítico. Los resultados obtenidos, tampoco pueden ser concluyentes, dado el escaso número de ensayos ejecutados, pero en este ensayo en concreto se observa una ligera **mejora en la resistencia a la deformación** de la mezcla cuando se le aplica el tratamiento fotocatalítico.

De la misma manera, se han realizado ensayos de contenido de huecos en la muestra (antes y después de la simulación del paso del tráfico durante 60 días), sobre probetas a partir de una muestra patrón convencional y sobre la misma muestra, pero con la aplicación del tratamiento superficial fotocatalítico.

Sensibilidad al agua (%) s/ Probetas

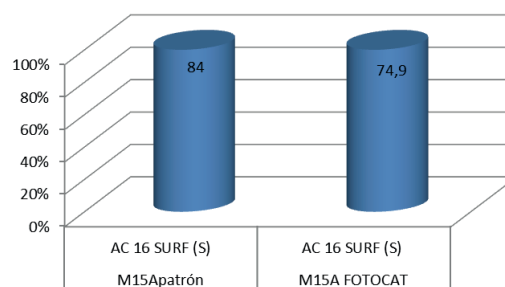


Figura 63: Influencia en la sensibilidad al agua. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.

Resistencia Deformación Permanente (mm/1000)

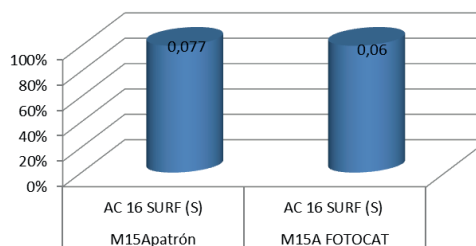
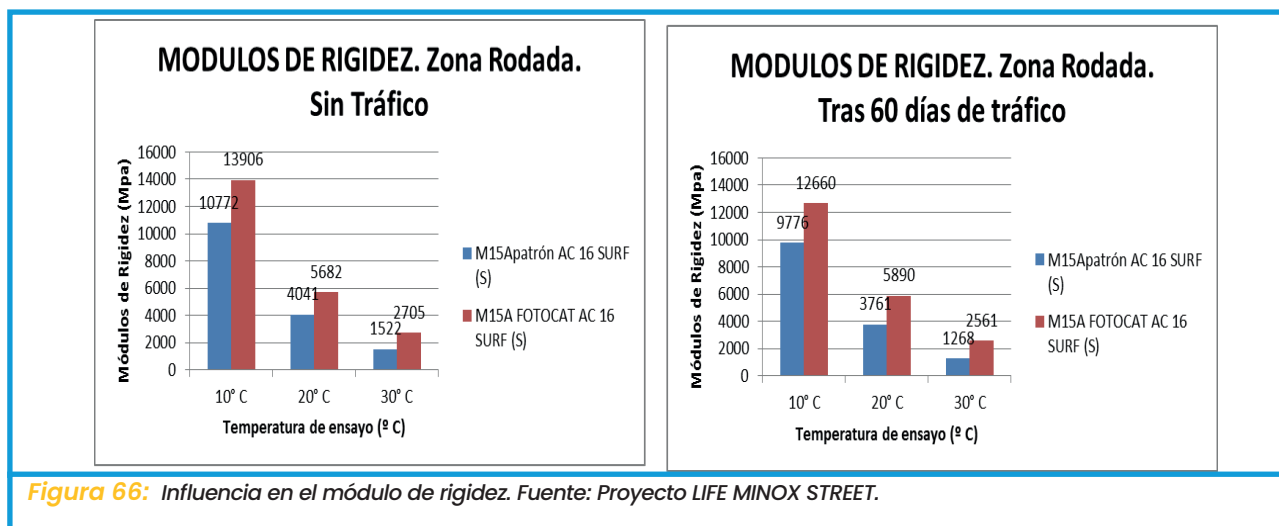
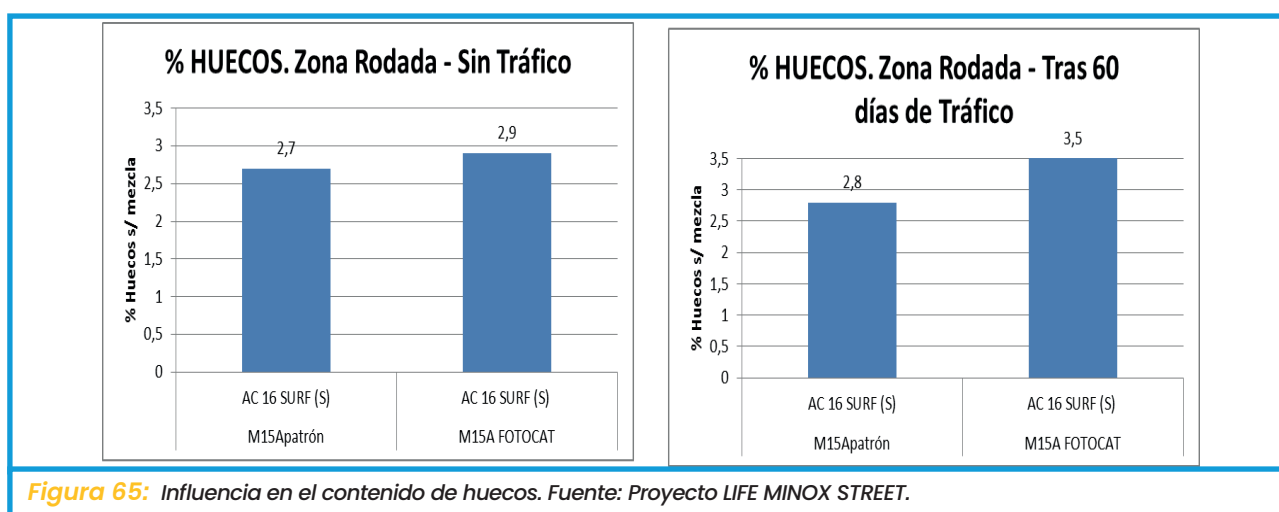


Figura 64: Influencia en la deformación permanente. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.

Aunque no se dispone de datos suficientes para poder establecer conclusiones, en estos ensayos en concreto se observa un ligero aumento de los huecos cuando se le aplica el tratamiento fotocatalítico, lo cual no tiene sentido físico. Se entiende que no se modifica esta propiedad de la mezcla y los resultados no han tenido en cuenta la incertidumbre del ensayo.

También se ha estudiado el módulo de rigidez de las mezclas con y sin este tratamiento (sin tráfico y tras el paso de tráfico durante 60 días), obteniendo resultados muy elocuentes, pues parece claro que hay una fuerte tendencia a que el **tratamiento fotocatalítico mejore ostensiblemente las propiedades mecánicas de la mezcla bituminosa**. Tampoco parece que el paso del tráfico modifique las propiedades mecánicas del tratamiento fotocatalítico.



Por último, en la tabla, a continuación, se observan resultados de análisis de resistencia al deslizamiento y de textura superficial, donde se puede observar que la muestra fotocatalítica, de código M15B, presenta una considerable reducción de la resistencia al deslizamiento, en el momento inicial de la aplicación, pero que tiende a igualarse con su homóloga patrón, con el paso del tráfico. Y que, por otra parte, posee las mismas propiedades a nivel de textura que en el caso de la muestra patrón.

C) Influencia sobre las características de un pavimento de hormigón

ENSAYOS DE AUSCULTACIÓN DURANTE ENSAYO DE DESGASTE					
COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO – UNE-EN 13036-4					
	MOMENTO INICIAL	TRAS 15 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 30 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 45 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 60 DÍAS DE TRÁFICO
ZONA RODADA					
M15Bp (patrón)	52	50	50	51	51
M15B	45	42	44	47	51
ZONA NO RODADA					
M15Bp (patrón)	78	78	78	78	77
M15B	54	63	62	69	73
ENSAYO DE CÍRCULO DE ARENA (mm) – UNE-EN 13036-1					
	MOMENTO INICIAL	TRAS 30 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 45 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 60 DÍAS DE TRÁFICO	
ZONA RODADA					
M15Bp (patrón)	1,54	1,54	1,54	1,54	
M15B	1,62	1,60	1,56	1,54	
ZONA NO RODADA					
M15Bp (patrón)	1,97	2,00	1,97	1,94	
M15B	2,21	2,21	1,97	1,94	
ENSAYO DE MEDIDA DE TEXTURA MEDIANTE PERFILES DE SUPERFICIE (mm) – UNE-EN ISO 13473-5					
	MOMENTO INICIAL	TRAS 15 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 30 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 45 DÍAS DE TRÁFICO	TRAS 60 DÍAS DE TRÁFICO
ZONA RODADA					
M15Bp (patrón)	1,360	1,386	1,373	1,366	1,372
M15B	1,362	1,345	1,342	1,362	1,359
ZONA NO RODADA					
M15Bp (patrón)	1,360	1,375	1,362	1,359	1,368
M15B	1,379	1,366	1,371	1,381	1,384

Figura 67: Influencia en la resistencia al deslizamiento y a la macrotextura. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.

De la misma manera que con el pavimento bituminoso, este fabricante ha declarado y publicado el comportamiento de su tratamiento superficial fotocatalítico, a partir de microemulsión con base acuosa, sobre un pavimento de hormigón.

Acto seguido, se muestran algunos de los resultados más significativos, haciendo más hincapié en la muestra codificada como M8C:

Muestra	Descripción	Área muestra cm ²	FOTO
M8A	Baldosa Valdelafuente Gris	47,5	
M8B	Terrazo 36 pastilla Rojo	46,0	
M8C	Terrazo 36 pastilla Blanco	45,6	

Figura 68: Presentación de muestras ensayadas con tratamiento fotocatalítico sobre loseta hidráulica. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.

En cuanto a la eliminación de concentraciones de NO_x, se han obtenido resultados que alcanzan hasta el 30%.

	X _{NO} (%)	X _{NO₂} (%)	NO _x (μmol)	NO _x (μmol)	NO ₂ (μmol)
M8A	41	30	11,4	15,7	4,0
M8B	28	22	8,2	10,9	2,8
M8C	32	24	9,1	12,0	3,1

Figura 69: Resultados de eliminación de NO_x sobre loseta hidráulica. Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.

A continuación, se muestran los resultados de caracterización de la loseta hidráulica, donde se pueden comparar los obtenidos en la loseta convencional, denominada loseta patrón M8Cp (patrón), con la loseta tratada fotocatalíticamente, M8C (material con Coverlite®).

A la luz de los resultados se podría concluir (ocurre lo mismo con el resto de muestras caracterizadas), que la **aplicación de este tratamiento superficial fotocatalítico sobre estas losetas hidráulicas no compromete el cumplimiento de los resultados de caracterización de estos materiales.**

D) Conclusiones

Seguidamente se procede a listar algunas de las conclusiones y recomendaciones de aplicación alcanzadas con estos estudios:

a) Se deberán elegir ubicaciones con buena exposición solar, idealmente con radiaciones mínimas de 8 W/m^2 y vientos moderados.

b) La humedad relativa óptima recomendada se sitúa entre el 20 y el 90%.

c) Se deberá identificar el tipo de sustrato sobre el que se va a aplicar el material fotocatalítico: la rugosidad, la absorción, la formulación y la dotación juegan un papel muy significativo.

d) El sustrato sobre el que se aplicará el tratamiento fotocatalítico deberá estar en buen estado, seco y libre de cualquier tipo de suciedad.

e) Las aplicaciones fotocatalíticas no deben hacerse en condiciones meteorológicas adversas (las habituales en los pliegos de las obras civiles convencionales).

f) Existen productos con buena capacidad de descontaminación, superior al 50% en condiciones controladas, que al ser aplicados en condiciones reales pierden relativamente rápido a medio plazo su eficiencia (meses).

g) Un producto de los ensayados sobre asfalto ha acreditado reducciones de NO_x superiores al 10% tras más de un año y medio desde su aplicación en condiciones reales.

h) Algunos productos aplicados sobre distintos sustratos muestran que, aunque visualmente no se aprecien evidencias que hagan pensar que existe producto fotocatalítico, cuando se toma una muestra y se analiza detenidamente, se verifica que sigue teniendo actividad fotocatalítica.

Baldosa terrazo 36 pastillas blanca M8Cp (patrón)				
Baldosa terrazo 36 pastillas blanca M8C (material tratado con emulsión fotocatalítica Coverlite®)				
RESISTENCIA CLIMÁTICA	VALOR MEDIO	CLASE	MARCADO	RESULTADO
ABSORCIÓN DE AGUA				
M8Cp (patrón)	5,5 %	2	B	CONFORME
M8C (material con Coverlite®)	5,8 %	2	B	CONFORME
ABSORCIÓN CAPILAR				
M8Cp (patrón)	0,28 g/cm²	-	-	-
M8C (material con Coverlite®)	0,19 g/cm²	-	-	-
RESISTENCIA AL HIELO-DESHELLO CON SALES DESCONGELANTES				
M8Cp (patrón)	0,00 kg/m²	3	D	CONFORME
M8C (material con Coverlite®)	0,03 kg/m²	3	D	CONFORME
RESISTENCIA AL DESGASTE (mm3/5000 mm2)	VALOR MEDIO	CLASE	MARCADO	RESULTADO
M8Cp (patrón)	31.334	1	F	CONFORME
M8C (material con Coverlite®)	33.983	1	F	CONFORME
	VALOR MEDIO	CLASE	MARCADO	RESULTADO
CARGA DE ROTURA				
M8Cp (patrón)	6,9 KN	45	4T	CONFORME
M8C (material tratado con Coverlite®)	6,1 KN	45	4T	
RESISTENCIA A FLEXIÓN				
M8Cp (patrón)	7,4 MPa	3	UT	CONFORME
M8C (material con Coverlite®)	6,7 MPa	3	UT	
RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO (URSV)	VALOR MEDIO	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO
M8Cp (patrón)	85	>45		CONFORME
M8C (material con Coverlite®)	79	>45		CONFORME

Figura 70: Caracterización de loseta patrón (M8Cp) (patrón) y M8C (material con Coverlite®). Fuente: Proyecto LIFE MINOX STREET.

i) Entre los productos aplicados sobre asfalto, los testigos recogidos de la zona de rodadas han mostrado una mayor actividad fotocatalítica que los tomados de la zona central (zona divisoria de carriles, mucho menos desgastada por el tráfico). La deposición de suciedad, grasas y aceites provenientes de los vehículos motorizados conlleva una pérdida de actividad fotocatalítica mayor que la abrasión por rodadura.

j) Como mantenimiento, se han de realizar limpiezas regulares con agua (e idealmente 1 vez cada 15 días, salvo que se hayan producido precipitaciones recientes, en cuyo caso se podrían espaciar más en el tiempo) con desengrasantes comerciales usados habitualmente en labores de baldeo de calles por los ayuntamientos, sin emplear barredoras. Este aspecto ha quedado muy presente en este proyecto, pues la eficiencia descontaminante tras la limpieza con desengrasante ha aumentado significativamente.

k) Se recomienda a las autoridades locales, solicitar a los fabricantes la verificación de que el tratamiento fotocatalítico no modifique las características del sustrato, mediante ensayos de caracterización.

l) Se recomienda a las autoridades locales, solicitar a los fabricantes la realización de ensayos de envejecimiento acelerado, de desgaste por paso del tráfico y de resistencia a envejecimiento.

8.1.5 PROYECTO LIFE PHOTOSCALING (MADRID)

El objetivo global del proyecto LIFE-PHOTOSCALING (<https://www.life-photoscaling.eu/>), coordinado por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), con el Ayuntamiento de Madrid y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UPM) como miembros del consorcio, ha sido el establecimiento de los instrumentos necesarios para escalar la tecnología fotocatalítica desde ensayos de laboratorio hasta la aplicación en las ciudades, mediante el desarrollo de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que permita establecer un criterio de conformidad de los productos "PhotoScaling Decision Maker".

Uno de los principales problemas con los que se encuentra la tecnología fotocatalítica en cuanto a su aplicación a escala real, es la dificultad para medir la eficiencia descontaminante. Es cierto que a pequeña escala (laboratorio) este tema está resuelto, con ensayos normalizados, pero la realidad es otra; hay constantes cambios de radiación solar, de humedad relativa, de régimen de vientos, de temperaturas, de confinamiento por efecto de la arquitectura urbana, entre otros factores, en una misma localización, lo que complica su monitorización y, por tanto, la valoración de la eficiencia final. Esto, junto con la falta de protocolos de referencia para establecer criterios de aceptación y rechazo en relación con la actividad, la durabilidad o los posibles efectos secundarios tras su aplicación en pavimentos, supone una barrera que a juicio del equipo LIFE-PHOTOSCALING desalienta a las autoridades públicas a promover el uso de esta tecnología.

Para dar respuesta a estos problemas nace el proyecto LIFE-PHOTOSCALING (2014 – 2019), en el que se han llevado a cabo las siguientes actividades:



1. Desarrollo de dos plataformas de demostración en las instalaciones del CSIC, una en Madrid y otra en Arganda del Rey (mismos materiales, emplazamientos diferentes) a escala de planta piloto.



2. Desarrollo de prototipos para la medición *in situ* de la eficiencia fotocatalítica (PHOTONSITE) y de la emisión de nanopartículas por simulación de la fricción con los neumáticos (TEMIS-1000).



3. Desarrollo de indicadores para la evaluación de la eficiencia fotocatalítica, comportamiento intrínseco del material y posibles efectos no deseados.



4. Modelado de los procesos fotocatalíticos junto con las acciones ambientales.



5. Desarrollo de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones, para evaluar cada solución en particular, incluida una evaluación del ciclo de vida (LCA).



6. Validación de la herramienta desarrollada en condiciones reales.

PLATAFORMAS DE DEMOSTRACIÓN

El proyecto se inició con una invitación abierta, publicada en el Boletín oficial del Ayuntamiento de Madrid, por parte del equipo LIFE-PHOTOSCALING, a los fabricantes de productos fotocatalíticos, para aplicar sus productos en las dos plataformas demostrativas anteriormente comentadas. En la selección de los productos el criterio fundamental fue el de la representatividad de materiales (distintas familias), el mayor valor añadido por networking con otros proyectos y, a igualdad de condiciones anteriores, la actividad fotocatalítica mayor. Finalmente, se testaron emulsiones sobre asfalto y baldosas, slurries percolados en asfalto y baldosas fotocatalíticas (prefabricados de hormigón y cerámicos con impresión 3D). En total 10 combinaciones de materiales diferentes.

Cada una de las plataformas está constituida por 3 bancos de pruebas, uno de ellos para envejecimiento natural, otro para lixiviación y el tercero para ensayos de fricción. El conjunto se completa con un banco referencia con los mismos materiales sin fotocatalizador y con una estación meteorológica. Cada banco de pruebas está constituido por losas de cada uno de los materiales de 2 m² o 4 m². El banco de pruebas de lixiviación está preparado para recogida de los lixiviados procedentes de cada uno de los fotocatalizadores.

ENSAYOS EN LAS PLATAFORMAS

En los materiales de estas plataformas se han llevado a cabo distintos ensayos, tanto *in situ* como en el laboratorio, realizándose más de 33 tipos diferentes de pruebas y más de 1.600 ensayos correspondientes a los 3 bloques independientes que se llevaron a cabo en paralelo:



1) Eficiencia fotocatalítica,



2) Comportamiento intrínseco del material y



3) Posibles efectos no deseados.

Como ejemplos de algunos resultados, hay que señalar que, con respecto al comportamiento intrínseco de los materiales, no se pueden dar reglas generales sobre el efecto de la incorporación de fotocatalizadores basados en TiO_2 , dependiendo principalmente de la estructura porosa de la matriz inicial, así como de las propiedades de la superficie fotocatalítica resultante.

Con respecto a la disminución de la eficiencia de NO_x a lo largo del tiempo, datos durante 17 meses medidos *in situ* con el prototipo PHOTONSITE indicaron que las emulsiones fotocatalíticas sobre el asfalto poroso experimentaron una pérdida significativa de actividad a lo largo del tiempo, independientemente de las condiciones climáticas. Sin embargo, la eficiencia de los slurries y baldosas de hormigón, con el fotocatalizador aplicado en la superficie o en masa, principalmente dependía de la humedad del sustrato con una dependencia diferente para cada familia de materiales. La actividad fotocatalítica se comprobó también mediante el uso de sondas de oxidación y reducción para determinar la producción de radicales hidroxilo y electrones libres respectivamente.

Paralelamente, se ha llevado a cabo la medición de la concentración de NO y NO_2 a ras de suelo de forma simultánea sobre una losa fotocatalítica y su referencia sin fotocatalizador mediante sensores low cost, calibrados cada 3 meses en las estaciones de calidad del aire más cercanas a cada una de las plataformas, del Ayuntamiento de Madrid y Comunidad de Madrid respectivamente. A partir de estos datos se ha llevado a cabo una modelización de la actividad con las acciones ambientales mediante el desarrollo de un modelo GAM entrenado utilizando los datos obtenidos en las plataformas, que permiten conseguir una estimación del porcentaje de eficiencia de eliminación de NO_2 . Con los productos fotocatalíticos utilizados en las plataformas, se alcanzaron reducciones de NO_2 a nivel del suelo del 0% al 30%, dependiendo de las condiciones atmosféricas y del tipo y edad del fotocatalizador. Se observaron mayores valores de porcentajes de descontaminación que en los resultados obtenidos con los ensayos normalizados, lo que se ha atribuido a la magnitud de las concentraciones de NO y NO_2 , cercanas a un orden de magnitud menor en el aire ambiente, al elevado flujo de gas en los ensayos normalizados y a la influencia de la humedad relativa ambiental.

INDICADORES Y SUB-INDICADORES: CRITERIO DE CONFORMIDAD

Todos estos ensayos han permitido la discriminación de los aspectos más importantes a implementar en ensayos de laboratorio específicos para evaluar los sub-indicadores (SI) dentro en cada uno de los tres grupos de indicadores previamente identificados, que han permitido establecer la conformidad de un producto, siendo:

II: Indicador eficiencia fotocatalítica (PPE)

SI1-1: *Band gap* (eV) y posición de las bandas (V): Distancia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción y potencial *rédox* de las mismas.

SI1-2: Eficiencia fotocatalítica del producto, según la Norma ISO 22197-1 (versión simplificada).

SI1-3: Adherencia del producto fotocatalítico al sustrato, según la Norma Cross-Cut Test ISO 2409: 2013 modificada.

SI1-4: Susceptibilidad a la carbonatación (ensayo diseñado *ad hoc*).

I2: Comportamiento intrínseco del material (IP)

I2-1: Coeficiente de resistencia al deslizamiento, con el péndulo TRRL, según Norma EN14231.

I3: Posibles efectos no deseados (USE)

SI3-1: Lixiviación de partículas de titanio (mgr Ti/cm^2) mediante 2 ensayos diferentes simulando agua de lluvia (ensayado según la Norma CEN/TS 16637-2 modificada) y agua tras la limpieza de calles con agua a presión. Este ensayo no tiene normativa asociada y se ha diseñado un ensayo *ad hoc* mediante irrigación.

SI3-2: Nivel de emisión de nanopartículas a la atmósfera mediante ensayo con TEMIS-1000, medido en $\text{Ud} \times 1000/\text{cm}^3$.

SI3-3: Selectividad en la conversión fotocatalítica a nitratos, determinada a partir del mismo ensayo que para el I1-2.

Según el resultado obtenido en cada uno de los ensayos específicos, cada SI se ha clasificado en cuatro categorías: a la peor categoría se le ha asignado 1 punto, y así sucesivamente hasta asignar 4 puntos para los resultados más favorables del método. Además, para algunos de los SI se aplica la puntuación de 0 si el valor obtenido en el ensayo hace que el producto no se deba instalar en la calle. Si un producto tiene 0 en cualquiera de los SI, ese producto es rechazado. Los distintos SI están ponderados de forma diferente, en función de su peso en la valoración final del indicador.

Después de calcular el valor obtenido para cada indicador, se aplica un factor de ponderación de cada uno de ellos en la clasificación global. Se ha aplicado un factor de 2.5 al indicador PPE. En el caso de IP se ha asignado a 1. USE ha sido el indicador con más peso, ya que estos materiales se desarrollan para mejorar la calidad de nuestro medio ambiente y, por tanto, si son susceptibles de producir algún efecto adverso, esto debe ser penalizado en gran medida. Por lo tanto, el factor asignado ha sido dos veces más que el de PPE, es decir, un factor de 5.

HERRAMIENTA DE SOPORTE A LA TOMA DE DECISIONES “PHOTOSCALING DECISION MAKER”

Como uno de los principales resultados del proyecto, se ha desarrollado una herramienta de soporte para la toma de decisiones PhotoScaling Decision Maker que proporciona tres tipos de resultados:



1. Criterio de conformidad de un producto:

Este resultado es el aspecto más importante y práctico alcanzado en el proyecto. Se le pide al usuario que introduzca los valores obtenidos para cada uno de los SI definidos previamente. Cada dato de entrada tiene una explicación del significado y el método utilizado para determinarlo. La herramienta proporciona el resultado del producto para cada SI y la nota global promedio del producto en tanto por ciento.



2. Análisis del ciclo de vida:

“From gate to gate”, de acuerdo con la Norma ISO 14040: 2006. Como resultado del LCA, se obtienen dos bloques de impactos sobre la acidificación terrestre, la eutrofización marina, la formación de oxidantes fotoquímicos y la materia particulada: Como aspecto positivo, los resultados de la evaluación de impacto para la reducción de NOx en el aire por los sistemas de pavimento fotocatalítico (por unidad funcional); y como negativo, los impactos por las materias primas y su transporte (por unidad funcional).



3. Estimación del porcentaje de eficiencia de eliminación de NO₂

Los resultados del modelo GAM entrenado utilizando los datos obtenidos en las plataformas, se han implementado en la herramienta para obtener una estimación del porcentaje de eficiencia de eliminación de NO₂. Da el promedio de un año en exposición al aire libre a nivel de suelo, sin tener en cuenta otros efectos como la degradación, a causa de la fricción de los neumáticos. Debido a las hipótesis e incertidumbres asociadas, este valor debe considerarse un ejercicio a fines comparativos, más que una predicción.

VALIDACIÓN EN UNA CALLE DE MADRID

De entre los ensayados, el producto que obtuvo la mejor puntuación, según el criterio de conformidad de PhotoScaling Decision Maker, se aplicó a escala real en la calle José Antonio de Armona de Madrid. La calle Bernardino Obregón (sin tratamiento fotocatalítico) sirvió de “blanco” a efectos de comparación de resultados.

Los criterios de elección de la calle fueron los siguientes: orientación N-S; calle con configuración de “calle cañón”; zona de elevada contaminación; buen estado del pavimento existente; tramo de aplicación aproximado de 4.000 m²; calle dotada de alumbrado público para colocación de tubos pasivos.

Tras la aplicación a escala real, se realizaron los ensayos de control, tanto *in situ* como en laboratorio, a partir de testigos tomados antes y después de la aplicación. Se llevaron a cabo los ensayos correspondientes a los indicadores, pudiéndose validar los resultados obtenidos en las plataformas.

Desde diciembre de 2018 a junio de 2019, se evaluó la eficiencia descontaminante del pavimento *in situ* mediante el dispositivo PHOTONSITE y sondas colorimétricas; se evaluó la emisión de nanopartículas por fricción mediante TEMIS-1000 y se analizó la lixiviación de Ti, así como pH, conductividad y nitratos mediante sonda multiparamétrica.

En cuanto a evaluación ambiental, se midió la concentración de nanopartículas en ambiente, no detectándose variación estadísticamente significativa en la concentración numérica o la distribución del tamaño de partículas finas suspendidas en la calle fotocatalítica, en comparación con las calles vecinas. Se tomaron muestras de aire para análisis de partículas y, sólo ocasionalmente, las partículas capturadas contenían Ti, pero siempre estaban en el rango de tamaño de micrómetros. Esto lleva a la conclusión de que, para este producto, las nanopartículas no se liberaron en una cantidad significativa del recubrimiento fotocatalítico al aire, de acuerdo con los resultados obtenidos para ese producto utilizando la herramienta *PhotoScaling Decision Maker*.

Respecto a la monitorización de la eficiencia fotocatalítica en ambiente, se realizó a través de los sensores de bajo coste utilizados en las plataformas, mediante tubos pasivos y mediante la aplicación del modelo GAM desarrollado. Se utilizaron dos métodos distintos de cuantificación con los que se obtuvieron eficiencias de eliminación de NO₂ ambiental, entre el 1% y el 4% a unos tres metros de altura. Cabe señalar que ninguno de estos métodos se puede considerar estadísticamente significativo por la elevada incertidumbre en las medidas. La aplicación del modelo GAM dio como resultado un 28.6% de reducción media de NO₂ a nivel de suelo, durante los tres primeros meses de aplicación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES EQUIPO LIFE-PHOTOSCALING

Este proyecto, así como la herramienta *PhotoScaling Decision Maker* desarrollada, supone un hito en la evaluación de materiales de construcción fotocatalíticos, ya que por primera vez se dispone de criterios de conformidad cuantificados que permiten la aceptación o rechazo de un producto. *PhotoScaling Decision Maker* está alojada en la página web del proyecto, <https://www.life-photoscaling.eu>, y es de libre uso. Es una herramienta viva que se irá actualizando en base al nuevo conocimiento del que se vaya disponiendo. Los rangos de parametrización de cada sub-indicador, así como los umbrales de aceptación se presentan en la web, en la que se ha implementado una ventana para hacer llegar comentarios al equipo Life-Photoscaling al respecto.

Como recomendación final, el equipo Life-Photoscaling considera que los productos que hayan obtenido puntuaciones menores del 50% para al menos uno de los sub-indicadores y que presenten una puntuación global menor del 60%, no deberían ser implementados en la calle como pavimentos.

8.1.6 PAVIMENTOS DESCONTAMINANTES: EXPERIENCIAS NACIONALES

8.1.6.1 EXPERIENCIAS EN ZONA URBANA (BARCELONA)

Como recomendación final, el equipo Life-Photocatalysis considera que los productos que hayan obtenido puntuaciones menores del 50% para, al menos, uno de los subindicadores y que presenten una puntuación global menor del 60%, no deberían ser implementados en la calle como pavimentos.

El objeto del presente estudio, financiado por la empresa Breinco, es la valoración de los resultados obtenidos en el estudio de inmisión de contaminantes atmosféricos (NO_x , O_3 , SO_2 y CO) y parámetros meteorológicos en el área de la plaza de Can Rosès (Barcelona) tras la implantación de un pavimento peatonal (a partir de prefabricados de hormigón) descontaminante sobre una superficie de 1.400 m^2 .



Figura 71: Ubicación de las estaciones de muestreo. Fuente: Breinco.

Para ello se ha diseñado una estrategia del muestreo consistente en la instalación de dos equipos de medición en continuo, uno en el centro de la zona pavimentada (Plaza) y un segundo equipo como contraste a 50 m del anterior (Edificio Biblioteca) y fuera de la zona de influencia del pavimento, a modo de “blanco” (zona no tratada con fotocatalisis).

En las dos estaciones implantadas se miden los niveles de inmisión de los siguientes contaminantes:

- Óxidos de nitrógeno (monóxido y dióxido de nitrógeno)
- Ozono
- Monóxido de carbono
- Dióxido de azufre

Paralelamente, en una de las estaciones se ha instalado una estación meteorológica con objeto de presentar las siguientes variables:

- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- Velocidad del viento (m/s)
- Dirección del viento
- Humedad (%)
- Radiación solar (W/m^2)

Los trabajos de toma de muestras empiezan el día 11 de septiembre de 2010 y se finalizan el día 15 del mismo mes. Las determinaciones cuentan con registro continuo cada minuto, a lo largo de 24 horas.

Los equipos de medida utilizados en el presente estudio son analizadores de gases multiparamétricos marca AIRPOINTER. Se trata de una estación de monitoreo de calidad de aire en un formato de tamaño reducido, que puede configurarse para medir NO_x, CO, O₃, SO₂, HC, PM y meteorología, en un formato compacto.

A partir del análisis de los datos tratados (con una radiación superior a 100 W/m²) a lo largo del estudio de inmisión realizado, se resumen en las tablas adjuntas las diferencias de concentraciones en porcentaje para cada uno de los días y los contaminantes determinados.

ÓXIDOS DE NITRÓGENO
Tabla 9 – Comparativa de reducción de NO_x

Día	Nº de datos	Promedio NO _x (µg/m ³) Biblioteca	Promedio NO _x (µg/m ³) Plaza	% de diferencia	Promedio Radiación
11/09/10	529	57,62	31,10	46%	619,75
12/09/10	490	58,71	37,74	36%	664,76
13/09/10	394	70,78	56,07	21%	651,40
14/09/10	525	62,30	59,25	5%	408,51
15/09/10	444	64,77	52,63	19%	529,17
TOTAL	476	62,83	47,36	25%	575

OZONO
Tabla 10 – Comparativa de reducción de Ozono

Día	Nº de datos	Promedio O ₃ (µg/m ³) Biblioteca	Promedio O ₃ (µg/m ³) Plaza	% de diferencia	Promedio Radiación
11/09/10	529	74,01	45,20	38,93%	619,75
12/09/10	490	100,86	46,35	54,04%	664,76
13/09/10	394	82,70	38,17	53,84%	651,40
14/09/10	525	88,49	39,86	54,95%	408,51
15/09/10	444	97,02	35,56	63,35%	529,17
TOTAL	476	88,62	41,03	53%	575

DIÓXIDO DE AZUFRE
Tabla 11 – Comparativa de reducción de SO_x

Día	Nº de datos	Promedio SO ₂ (µg/m ³) Biblioteca	Promedio SO ₂ (µg/m ³) Plaza	% de diferencia	Promedio Radiación
11/09/10	529	2,69	0,98	64%	619,75
12/09/10	490	1,84	0,97	47%	664,76
13/09/10	394	1,44	0,92	36%	651,40
14/09/10	525	1,51	1,25	17%	408,51
15/09/10	444	1,09	1,03	6%	529,17
TOTAL	476	1,71	1,03	34%	575

Como puede observarse, el porcentaje de diferencia de concentración entre la estación de contraste y la de análisis para cada contaminante determinado y día, es el que se muestra a continuación:

MONÓXIDO DE CARBONO
Tabla 12 – Comparativa de reducción de CO

Día	Nº de datos	Promedio SO ₂ (µg/m ³) Biblioteca	Promedio SO ₂ (µg/m ³) Plaza	% de diferencia	Promedio Radiación
11/09/10	529	0,72	0,17	76%	619,75
12/09/10	490	0,99	0,30	70%	664,76
13/09/10	394	0,76	0,37	52%	651,40
14/09/10	525	0,56	0,60	-5%	408,51
15/09/10	444	1,10	0,28	75%	529,17
TOTAL	476	0,83	0,34	53%	575

Tabla 13
Comparativa de reducción de todos los contaminantes analizados

Día	Radiación (W/m ²)	NOx %	O ₃ %	SO ₂ %	CO %	% Diferencia
Diferencia	619	46,0	38,9	64,0	76,0	56,2
12/09/10	664	36,0	54,0	47,0	70,0	51,7
13/09/10	651	21,0	53,8	36,0	52,0	40,7
14/09/10	408	5,0	54,9	17,0	-	19,2
15/09/10	529	19,0	63,3	6,0	75,0	40,8
TOTAL		25,4	52,9	34	53,6	41,7

8.1.6.2 EXPERIENCIAS EN AUTOPISTA C-31 (BARCELONA)

- **Eptisa, Servicios de Ingeniería:** Empresa consultora especialista en fotocatálisis, contratada por la UTE, encargada de caracterizar los materiales, previamente a la aplicación, y el seguimiento en el tiempo de la eficiencia descontaminante de los mismos, mediante muestras testigo. (Ver las limitaciones de esta metodología en el apartado 7.2).

- **Fundación Cartif:** Centro de investigación especializado en fotocatálisis, entre otras materias, contratada por la UTE, encargada de analizar el seguimiento en el tiempo de la eficiencia descontaminante de los tratamientos fotocatalíticos, llevados a cabo mediante estaciones de medición de calidad del aire, localizadas en la propia traza.



Figura 73: Detalle de instalación de muestras testigo en arcén, antes del comienzo de los trabajos de tratamiento fotocatalítico.
Fuente: Eptisa.



Figura 74: Estación de calidad del aire instalada en obra por Cartif, situada en el tramo dirección Barcelona. Fuente: Cartif.

- **Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (AIF):** Asociación sin ánimo de lucro, que actúa como organismo científico técnico colaborador de la UTE constructora.

- **Empresas fabricantes de materiales fotocatalíticos:** se cuenta con dos empresas, miembros de AIF, que por cuestiones de confidencialidad y código deontológico se denominarán como FABRICANTE 1 y FABRICANTE 2.

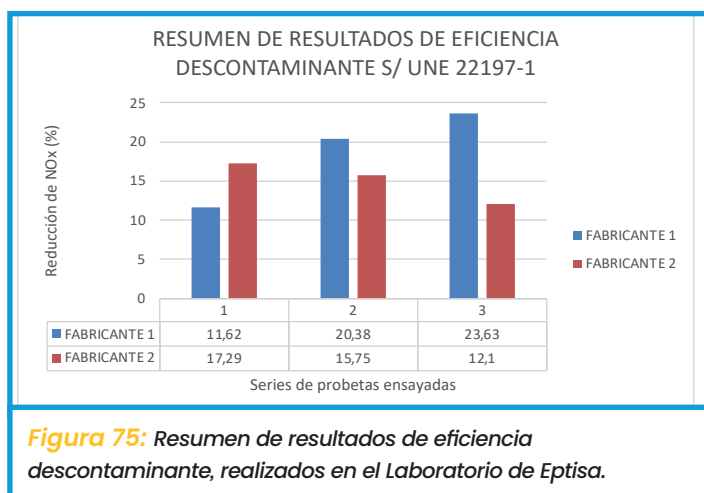
DEFINICIÓN DE ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO

Los ensayos de caracterización a realizar sobre las probetas, en base a las dotaciones facilitadas por los fabricantes, tienen por objeto evaluar el potencial descontaminante, su durabilidad estimada y su adherencia al soporte, fundamentalmente, para validación antes de la puesta en obra. Todos los ensayos han sido realizados tomando como referencia la normativa vigente y se llevaron a cabo los siguientes:

- **Ensayos de determinación de eliminación de óxidos de nitrógeno mediante fotocatálisis,** según la Norma UNE 127197-1:2013 (Anexo B), para evaluar la capacidad fotocatalítica del material a medio plazo.
- **Ensayos de determinación de eliminación de óxidos de nitrógeno mediante fotocatálisis** según la Norma UNE ISO 22197-1:2012.

- **Ensayos de durabilidad**, mediante pruebas de saturación acelerada. La durabilidad de los materiales es un parámetro clave a la hora de implementarlos en condiciones reales.
- **Ensayos de determinación de la capacidad de regeneración**. La pérdida de actividad fotocatalítica debida a la acumulación de nitratos en la superficie fotoactiva, procedentes de las reacciones de fotooxidación de NO_x, puede revertirse mediante lavado con agua de lluvia o procesos de baldeo. El último factor que se propone evaluar es el grado de recuperación que se puede alcanzar tras la desactivación total del material y posterior lavado.
- **Ensayos de adherencia al soporte por arrancamiento**, que se realizarán tomando como referencia la norma UNE-EN ISO 22970:2021 y la ISO 22197-1.
- **Ensayos de envejecimiento**, donde se evaluará la resistencia a envejecimiento de las muestras expuestas a la intemperie durante 1.500 horas, en base a la Norma ISO 22197-1.

El 11 de agosto de 2023 se completó la ejecución del tratamiento superficial fotocatalítico en la calzada derecha (dirección Badalona) de la Autopista C-31, entre los tramos Montgat - Sant Adrià, por parte del FABRICANTE 2, y la semana siguiente se hizo lo propio en la calzada izquierda (dirección Barcelona), por parte del FABRICANTE 1.



INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA DE SEGUIMIENTO

Merece la pena destacar, que los sistemas de medida empleados para el seguimiento (muestras testigo y estaciones de calidad del aire móviles) no son comparables, ya que, entre otros aspectos, las concentraciones de monóxido de nitrógeno que se producen a escala real son del orden de 2 órdenes de magnitud inferiores a las que se introducen en la unidad de dilución del ensayo normalizado de laboratorio. Por otra parte, las cuantías de la aplicación a escala real, del orden de 200.000 m², no tienen nada que ver con las dimensiones de la probeta de laboratorio, 5 x 10⁻³ m². Justamente el valor añadido que se

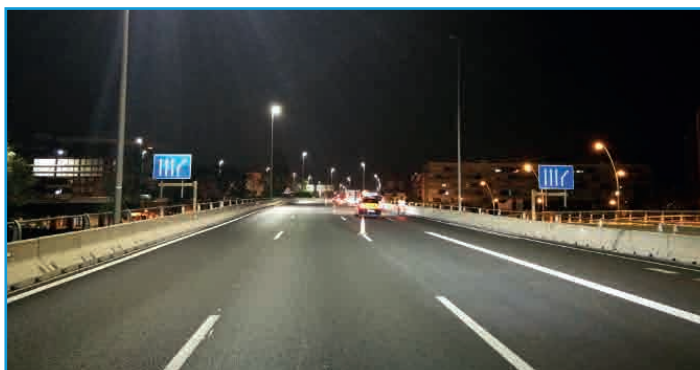


Figura 76: Estado de la Autopista durante la aplicación del tratamiento fotocatalítico. 11 de agosto de 2023. Calzada Derecha. Fuente: Eptisa.

le asocia a la tecnología fotocatalítica es el mismo que se puede establecer mediante el siguiente símil: Un árbol aislado no tiene la misma capacidad de transformación de dióxido de carbono en oxígeno que un parque lleno de vegetación, de la misma forma que una pequeña porción de tratamiento fotocatalítico no puede abatir y mineralizar los óxidos de nitrógeno al mismo nivel que si se extendiera el tratamiento en una gran superficie, como ha sido el caso.

SEGUIMIENTO A PARTIR DE ESTACIONES DE CALIDAD DEL AIRE

Antes de comenzar con la interpretación de los resultados obtenidos, se proceden a poner de manifiesto los condicionantes y las limitaciones del estudio realizado, a partir de este sistema de medida.

Condicionantes y limitaciones del estudio

Teniendo en cuenta la complejidad que plantea el estudio propuesto, y de cara a simplificar los análisis a realizar, se plantean las siguientes premisas:

- El estudio está propuesto incluyendo la instalación de tres medidores de calidad de aire que registran los valores de NO, NO₂, PM₁, PM_{2.5} y PM₁₀¹. Además, se registran los valores de temperatura (T) y humedad ambiental (HR) en cada una de las tres localizaciones.
- La instalación de los dispositivos tenía como requerimiento que se situaran en la zona más próxima al pavimento asfáltico (y, por lo tanto, al tratamiento fotocatalítico) posible. Teniendo en cuenta la infraestructura disponible en la carretera para su fijación, se seleccionó inicialmente la bionda, o en su defecto, las barreras New Jersey en los laterales exteriores. Se considera que esta situación permite tener la máxima sensibilidad en el estudio para identificar el impacto del tratamiento fotocatalítico en la concentración de óxidos de nitrógeno.
- Para valorar el impacto del tratamiento, se consideró instalar dos medidores en los tramos de ensayo con material fotocatalítico, y un tercer medidor en un tramo sin tratamiento. La comparación entre los distintos tramos, considerando que el resto de las variables permanecen igual entre estos, permitió valorar las diferencias entre los tramos de ensayo y de referencia, después de la aplicación del tratamiento fotocatalítico.
- La discusión de los resultados del estudio y las conclusiones, se establecerán en base a tendencias en los registros de los diferentes parámetros y no en valores absolutos de rendimiento de captación de óxidos de nitrógeno.

¹ NO – monóxido de nitrógeno; NO₂ – dióxido de nitrógeno; PM₁ – material particulado menor de 1 µm; PM_{2.5} – material particulado menor de 2.5 µm; y PM₁₀ – material particulado menor a 10 µm.

Por otro lado, también se han realizado una serie de suposiciones de cara a facilitar la interpretación de los resultados y obviar una serie de incertidumbres que se no se consideran importantes para el objeto del informe planteado:

- Se considera que el único parámetro de calidad de aire urbano sobre el que el tratamiento puede tener impacto es la concentración de óxidos de nitrógeno.
- Se considera que la densidad de tráfico en cada uno de los tramos es similar.
- El periodo de referencia previo, sin intervenciones, fue de una semana.

ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL PERIODO AGOSTO 2023 – MARZO 2024

En relación a los óxidos de nitrógeno, NO y NO₂, se ha detectado una tendencia diferente entre el tramo de referencia (sin fotocatalísis) y el tramo de ensayo (con tratamiento fotocatalítico). En concreto, en todos los puntos de monitorización se observa un pico inicial a primeras horas de la mañana, coincidente con la primera hora punta, con concentraciones parecidas. Sin embargo, para los tramos de ensayo (con tratamiento fotocatalítico), se observa una reducción que no se encuentra en el tramo de referencia, tanto para el NO, como y en especial, para el NO₂, donde el segundo pico supera al primero de forma notable.

En lo que respecta al material particulado, específicamente PM_{2,5}, no se observan fluctuaciones significativas en las tendencias a lo largo de los dos tramos bajo monitoreo. Este parámetro no está influenciado por la aplicación del tratamiento fotocatalítico, y este resultado concuerda con la hipótesis inicial de poder realizar comparaciones entre el tramo de ensayo (con tratamiento fotocatalítico), y el de referencia, al contar con condiciones de tráfico similares.

En resumen, el monitoreo de la efectividad de los materiales fotocatalíticos en la reducción de óxidos nitrosos (NO y NO₂) mediante los dos sensores distribuidos en puntos estratégicos, revela patrones significativos, que reflejan una clara mejora de la calidad del aire en las zonas tratadas con fotocatalísis.

Esta conclusión se ve reforzada por varios factores que se encuentran directamente relacionados con la naturaleza de la tecnología fotocatalítica y que a continuación se exponen:

- **Horas de luz.** Uno de los factores directamente relacionado con la actividad fotocatalítica de un material es la exposición a la radiación ultravioleta que, en este caso concreto, procede de la radiación solar. La **Figura 77**, muestra el promedio mensual de la evolución de rendimiento de eliminación de NOx del tratamiento fotocatalítico, junto con las horas de luz para cada mes del año (Fte. AEMET). A mayor número de horas de luz, mayor eficiencia fotocatalítica, y por tanto, mayor capacidad descontaminante.

- **Precipitaciones atmosféricas.** Otro de los factores que contribuye a la mejora de la eficiencia fotocatalítica (descontaminante) de un pavimento asfáltico es la capacidad de limpieza del mismo. Esta se produce de forma natural mediante las precipitaciones atmosféricas, en el lugar de aplicación. La **Figura 78**, muestra el promedio mensual de la evolución de rendimiento de eliminación de NOx del tratamiento fotocatalítico, junto con el promedio mensual de las precipitaciones (Fte. AEMET) en la ciudad de Barcelona. Como se puede apreciar, existe una relación directa entre el aumento de la cantidad de precipitaciones y la recuperación del rendimiento de eliminación de NOx.

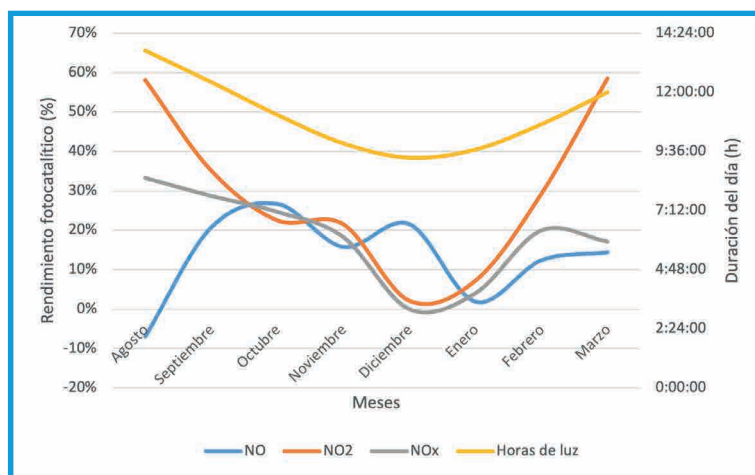


Figura 77: Representación gráfica Rendimiento eliminación NOx y horas de luz mensual. Fuente: Fundación Cartif.

Nótese como la reducción de concentraciones de NOx en la atmósfera, supera el 30% en el mismo mes de la aplicación y va reduciendo paulatinamente esta eficiencia a lo largo de los meses siguientes, debido a la ausencia de precipitaciones, hasta alcanzar valores residuales, para posteriormente volver a situarse por encima del 17%, coincidiendo con el aumento de las precipitaciones, en marzo de 2024.

Igualmente, las concentraciones de NO₂, en el mismo mes del

tratamiento fotocatalítico, se reducen en más de un 50%, para posteriormente situarse en valores residuales, durante los meses sin precipitaciones, alcanzando el mínimo en diciembre de 2023. Sin embargo, con las precipitaciones del primer trimestre del año 2024, vuelve la eficiencia fotocatalítica de los materiales, hasta superar valores de reducción de las concentraciones de NO₂ del 50%.

A modo de conclusión final, y volviendo a los resultados de seguimiento obtenidos, mediante estaciones de calidad del aire, a continuación, se incluye la tabla numérica de resultados de reducciones de concentraciones de NO, NO₂ y NOx, en los tramos estudiados (con fotocatalisis), en el periodo agosto 23 – marzo 24, donde los valores promedios sugieren:

- unas eliminaciones de concentraciones de NO en el rango del 10 – 15%
- unas eliminaciones de concentraciones de NO₂ cercanas al 30%
- unas reducciones de concentraciones de NOx, en el rango 15 – 20%

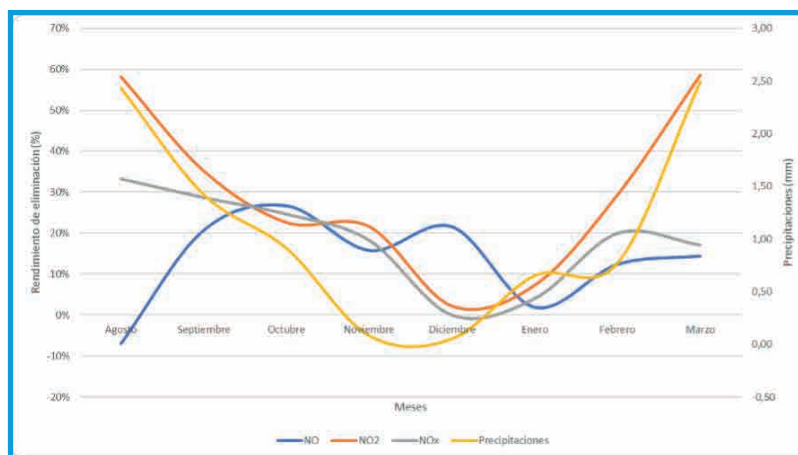


Figura 78: Representación gráfica Rendimiento eliminación NOx y precipitaciones. Fuente: Fundación Cartif.

Tabla 14
Cálculo del rendimiento de eliminación de NO, NO₂ y NOx

Mes	Rendimiento Eliminación (%)			Precipitaciones (mm)	Duración del día (h)	Diferencia PM _{2,5} (µg/m ³)
	NO	NO ₂	NOx			
Agosto	-7%	58%	33%	2,43	13:42:04	-1,62
Septiembre	21%	35%	29%	1,42	12:24:59	-0,13
Octubre	27%	23%	25%	0,91	11:05:04	-0,73
Noviembre	16%	22%	18%	0,08	9:55:16	0,71
Diciembre	22%	2%	0%	0,05	9:20:09	2,38
Enero	2%	7%	4%	0,65	9:40:07	2,24
Febrero	12%	29%	20%	0,77	10:42:03	0,87
Marzo	14%	58%	17%	2,49	12:00:27	1,54
Promedio	13%	29%	18%	-	-	-

8.1.7 PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS: EXPERIENCIAS INTERNACIONALES

8.1.7.1 AEROPUERTO DE MALPENSA (MILÁN)

En el año 2011, Impresa Bacchi, una empresa constructora de Milán que lleva desde el 2006 experimentando, en colaboración con el Politécnico de Milán, y aplicando soluciones fotocatalíticas para la disminución de la contaminación atmosférica (propietaria de la microemulsión fotocatalítica Coverlite®), comenzó una serie de aplicaciones a escala real monitorizadas mediante estaciones de calidad del aire móviles.

La primera aplicación a gran escala fue ejecutada en el mes de junio del 2011 en la Terminal 1 del Aeropuerto de Malpensa, tanto en la vía de acceso como en el parking descubierto de la zona de llegadas, sobre 20.000 m² de superficie.

Para la aplicación se empleó un prototipo de maquinaria patentada que permitía regular el flujo y la potencia de la microemulsión, así como mantener y garantizar la misma concentración de dióxido de titanio en el producto pulverizado.



Figura 79: Aplicación de micro-emulsión fotocatalítica, mediante el prototipo patentado por "Impresa Bacchi", en la Terminal 1 del Aeropuerto de Malpensa (Milán).

En cuanto al control de la capacidad descontaminante del producto se adoptó el siguiente protocolo de medidas *in situ*, a partir de estaciones móviles dotadas de registro continuo de datos:

- 2 estaciones móviles de medida que se instalaron durante 8 semanas (4 semanas antes y 4 después del tratamiento).
- 1 estación móvil que fue instalada en una zona próxima sin tratamiento, cercana al pavimento existente y donde los datos recogidos fueron utilizados como valores de referencia.
- 1 estación móvil que fue instalada en la zona donde se aplicó el tratamiento, recogiendo datos antes y después del tratamiento fotocatalítico.

Este protocolo de medidas *in situ* fue avalado y supervisado también por Legambiente (el equivalente italiano de “Ecologistas en Acción” en España), el ente italiano independiente para la protección del medio ambiente, cuya aportación ha dado valor añadido a este tipo de aplicación.

La segunda aplicación fue ejecutada en el mes de octubre 2011 en los alrededores del nuevo edificio de la Región Lombardía (Milán), en las calles y en las aceras, sobre 25.000 m² de superficie.



Figura 80: Estación móvil para la medida instalada en el Aeropuerto de Malpensa (Milán).

Fuente: Impresa Bacchi.

Esas aplicaciones, monitoreadas *in situ* como se ha descrito anteriormente, han dado resultados muy positivos:

En el caso del Aeropuerto de Malpensa la reducción de óxidos de nitrógeno ha alcanzado un 9% mientras que en el caso de los alrededores del edificio de la región de Lombardía ha alcanzado un 7,4% de reducción a escala real. Resultados muy prometedores teniendo en cuenta las distintas épocas del año y

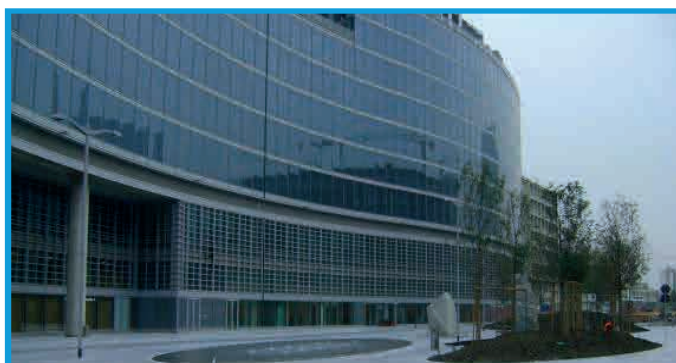


Figura 81: Aplicación de micro-emulsión fotocatalítica en las aceras del Edificio de la Región Lombardía (Milán). Fuente: Impresa Bacchi.

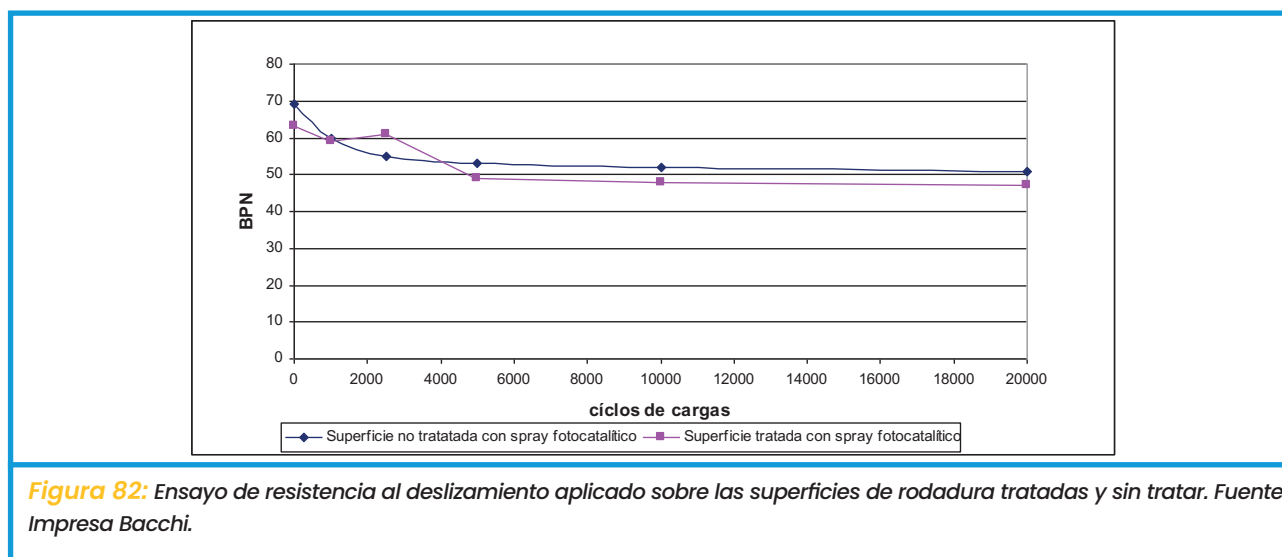
las diferentes horas de irradiación solar de las dos aplicaciones, así como otros parámetros ambientales intervinientes.

Sobre estos mismos estudios, para comprobar cómo una micro-emulsión con características descontaminantes impactaba sobre la resistencia al deslizamiento y su eficiencia fotocatalítica, sobre una capa de rodadura de tipo AC 16 surf 50/70, se realizó un estudio en laboratorio, donde se verificaron estos dos parámetros. En una primera fase, se efectuaron dos ensayos de control de la resistencia al deslizamiento, según la Norma UNI EN 13036-Parte 1. El primero se realizó sobre la superficie de rodadura sin tratar previamente, y el segundo, se realizó sobre la superficie tratada fotocatalíticamente.

A través de estos ensayos se simuló el paso del tráfico, con miles de aplicaciones de ciclos de carga.

Posteriormente, se llevó a cabo el análisis de la resistencia al deslizamiento, sobre ambas superficies (tratada y sin tratar) mediante el método del péndulo británico, según la Norma UNI. EN 12697-Parte 22, a partir del cual se obtiene una curva que relaciona los ciclos de aplicaciones de carga con el número BPN (British Pendulum Number).

Los resultados obtenidos de este estudio se presentan en la figura a continuación:



A la luz de estos resultados se podría sugerir que la aplicación de micro-emulsiones descontaminantes sobre superficies de rodadura convencionales genera, a corto plazo, una ligera reducción en la adherencia entre el neumático y el pavimento, pero como se verá en experiencias recientes a escala real ([ver apartado 11.2](#)), al poco tiempo de la aplicación del tratamiento fotocatalítico, se puede producir una mejoría de este parámetro.

En una segunda fase, y de cara a evaluar la eficiencia fotocatalítica de este tipo de revestimientos a largo plazo, se realizó un ensayo donde se medía la reducción de concentraciones de NOx, en función del número de aplicaciones de cargas. Es decir, a partir de testigos tomados de la superficie ensayada, sobre la que se ha aplicado el tratamiento superficial, se realizaron ensayos de resistencia al deslizamiento en

primera instancia (con péndulo UNI EN 13036), y sobre estas mismas muestras, ensayos de eficiencia fotocatalítica (UNI 11247/2010), hasta completar el gráfico adjunto.

A partir de los resultados obtenidos, se observa una reducción de eficiencia fotocatalítica, con tendencia asintótica, a medida que aumenta el número de ciclos de carga. En el estudio se llegan a alcanzar reducciones de concentración de NOx del orden del 43% que tras la aplicación de 20.000 ciclos de péndulo de fricción se reducirían al 26%. La tendencia descendente de este parámetro está íntimamente relacionada con la curva de desgaste de la **Figura 83**.

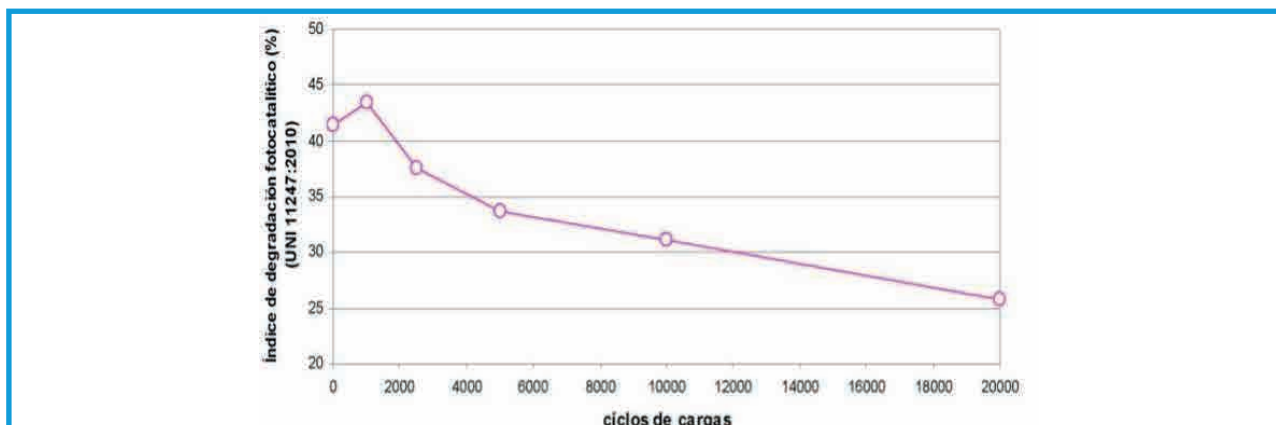


Figura 83: Evolución del abatimiento de concentraciones de NOx bajo ensayos normalizados realizados sobre testigos tallados de aglomerado. Fuente: Impresa Bacchi.

8.1.7.2 APARCAMIENTO EN ROSKILDE (DINAMARCA)

La empresa Photocat A/S, en colaboración con el Ayuntamiento de Roskilde, han llevado a cabo ensayos *in situ* sobre un pavimento asfáltico al que se le ha aplicado un tratamiento fotocatalítico, con microemulsión con base acuosa. La aplicación se realizó sobre 5.000 metros cuadrados de superficie en la zona de aparcamiento de Takeda. Para evaluar la eficiencia del tratamiento se diseñó un dispositivo de medición *in situ* que permitía ensayar y medir la actividad fotocatalítica de la superficie de rodadura durante un periodo de tres años.

Los resultados de la prueba realizada reportados por la empresa Photocat, sugieren que la eficiencia fotocatalítica observada se mantiene estable en el tiempo, concluyendo que con una irradiación solar de 563 kWh/m² por año, con una estimación del 5% de luz UVA, colabora en la descontaminación del aire de la zona del aparcamiento tratado, a través de la reducción de 13.8 gramos de NOx/m² al año.

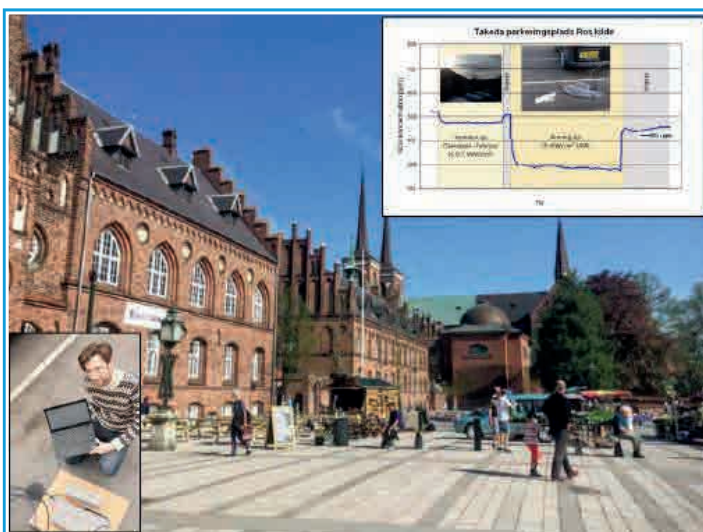


Figura 84: Pavimento fotocatalítico en Roskilde (Dinamarca). Fuente: Photocat.

8.1.7.3 AEROPUERTO DE COPENHAGUE (DINAMARCA)

La empresa Photocat A/S en colaboración con el fabricante de hormigón IBF Beton, CK Environment, el Grupo BMI y el Aeropuerto de Copenhague han llevado a cabo un seguimiento durante dos años de un tratamiento fotocatalítico ejecutado a partir de prefabricados de hormigón (adoquín), sobre 300 m² de una zona de aparcamiento de la Terminal 1, en la zona llamada “Kiss- fly”. Para la monitorización del pavimento se empleó un analizador de NO_x, tipo Eco Physics NO_x que recogía los datos NO, NO₂, NO_x.

Este equipo consiste en dos válvulas solenoides de multiplexación, controladas por un registrador de datos instalado a una altura de 0,5 m del suelo. El multiplexor medía cada 30 segundos, tanto en la zona tratada con adoquín fotocatalítico como en la no tratada. La transmisión de datos se llevó a cabo vía GSM.

El mes antes de la instalación del pavimento fotocatalítico se realizaron 41 mediciones al día. Las medidas con el pavimento adoquinado fotocatalítico y la zona de referencia (“blanco” o zona no tratada de pavimento convencional) se realizaron durante 43 días tras la aplicación.

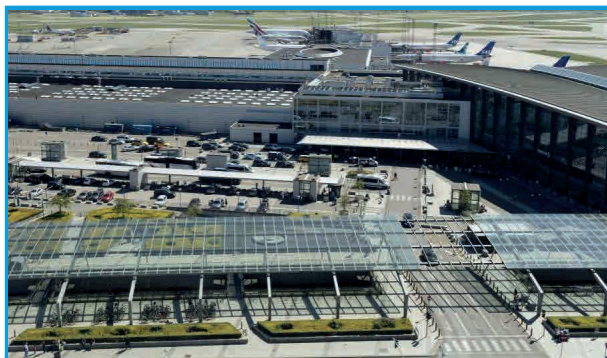


Figura 85: Pavimento fotocatalítico en Roskilde (Dinamarca). Fuente: Photocat.

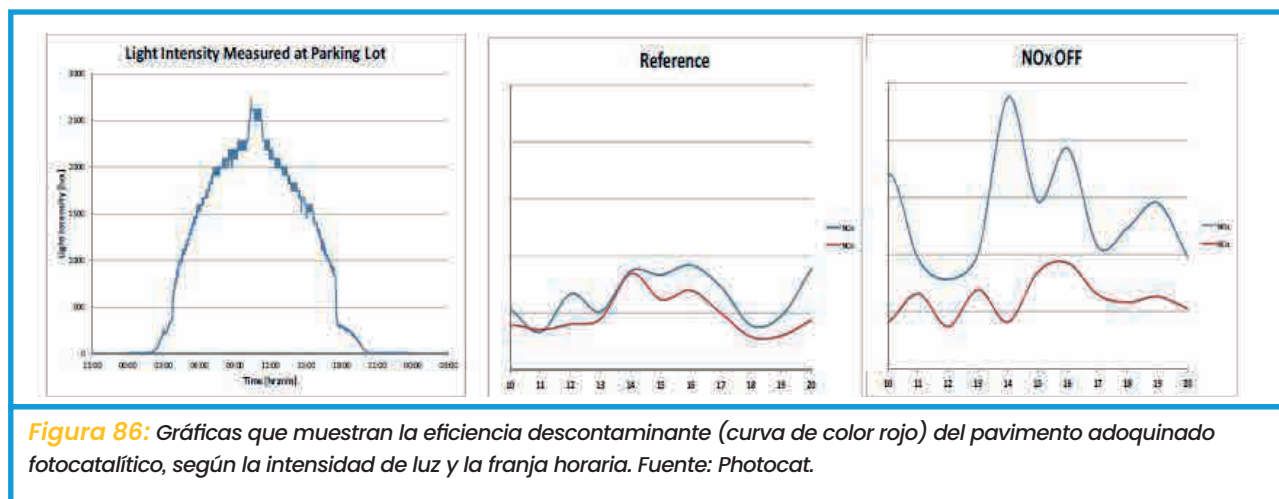


Figura 86: Gráficas que muestran la eficiencia descontaminante (curva de color rojo) del pavimento adoquinado fotocatalítico, según la intensidad de luz y la franja horaria. Fuente: Photocat.

La intensidad de luz en la zona de aparcamiento alcanzaba su cota máxima entre las 9 a.m. y la 1 p.m. del día, por lo que la mayor eficiencia fotocatalítica en los adoquines se pudo observar entre las 10 a.m. y las 8 p.m.

En las gráficas se puede ver la capacidad de reducción de concentraciones de NO_x comparando la zona de referencia, con la zona tratada con fotocatalísis, que se situó en el entorno del 20%.



8.2 OTROS ACTIVOS DEL TRANSPORTE FOTOCATALÍTICOS

8.2.1 CUNETAS, ELEMENTOS DE CONTENCIÓN Y PAVIMENTOS EN AUTOVÍA DE LOS LLANOS (ALBACETE)

En el periodo comprendido entre diciembre de 2020 y julio de 2022, se llevó a cabo un **proyecto de investigación del comportamiento de varios fotocatalizadores aplicados sobre activos de infraestructuras del transporte en la Autovía A-31, en el tramo localizado entre los pp.kk 29,8 y 124,0 (Albacete).**

Esta investigación fue llevada a cabo gracias a la iniciativa del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), co-financiada por la Sociedad Concesionaria Autovía de los Llanos (AULLASA), adjudicataria del contrato de concesión del tramo de autovía en el que se ha realizado el proyecto, Aquaterra Servicios de Infraestructuras, Sarrión Concesiones y Cyopsa-Sisocia, coordinada por el CEDEX, y cuyo desarrollo, gestión y liderazgo técnico estuvo a cargo de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (AIF) y de la Unidad Fotoair del CIEMAT, con la colaboración de Eptisa, Servicios de Ingeniería, así como el personal técnico y de campo de Aullasa.

El proyecto incluyó las siguientes tareas:



1. Trabajos previos.

- a. Estudio de condicionantes ambientales.
- b. Selección de emplazamientos.
- c. Selección de activos del transporte susceptibles de fotocatalizar.
- d. Extracción de muestras de activos del transporte.
- e. Calibración de equipos de medición de actividad fotocatalítica.



2. Redacción del protocolo de ejecución del proyecto y trazabilidad del proceso.



3. Definición de ensayos de caracterización.



4. Selección de materiales fotocatalíticos, exclusivamente de productos fabricados por socios de AIF (datos de alta en su web oficial: <https://www.fotocatalisis.org/listado-de-socios/>), para su aplicación a escala real.



5. Dirección de obras de limpieza y aplicación de materiales fotocatalíticos sobre los siguientes activos del transporte: cunetas de drenaje, elementos de contención y pavimentos.



6. Realización de ensayos e informes de seguimiento durante 7 meses, a partir de muestras instaladas en obra.

- a. Extracción de testigos en aglomerado y hormigón para aplicación en laboratorio de materiales fotocatalíticos.

- b. Ensayos de seguimiento de actividad fotocatalítica en muestras testigo localizadas en obra.



Figura 87: Cuneta fotocatalítica con incorporación de muestras testigo en el hormigón. Fuente AIF.



Figura 88: New Jersey fotocatalítica: Aplicación y estado final. Fuente AIF.



7. Reuniones de seguimiento y redacción del informe final de conclusiones.

Conocidas estas limitaciones de las metodologías de seguimiento, incluidas en el **apartado 7.2**, las conclusiones obtenidas de los estudios realizados fueron las siguientes:

- i. Los valores más representativos de los análisis de seguimiento realizados, a partir de la Norma ISO 22197-1, se obtienen a las 5 horas.
- ii. Las dotaciones de material fotocatalítico, en g/m^2 , se recomienda que se consideren en seco, es decir, una vez que elimina el agua de la microemulsión, o al menos que se establezca una correlación entre la dotación en seco y en húmedo.
- iii. Las muestras expuestas en obra, van reduciendo su eficiencia fotocatalítica con el tiempo, hasta que llega a un estado asintótico, sensiblemente constante, con una eficiencia asociada del orden de 5%, a los casi 7 meses, desde su puesta en obra, según la Norma UNE ISO 22197-1:2012.

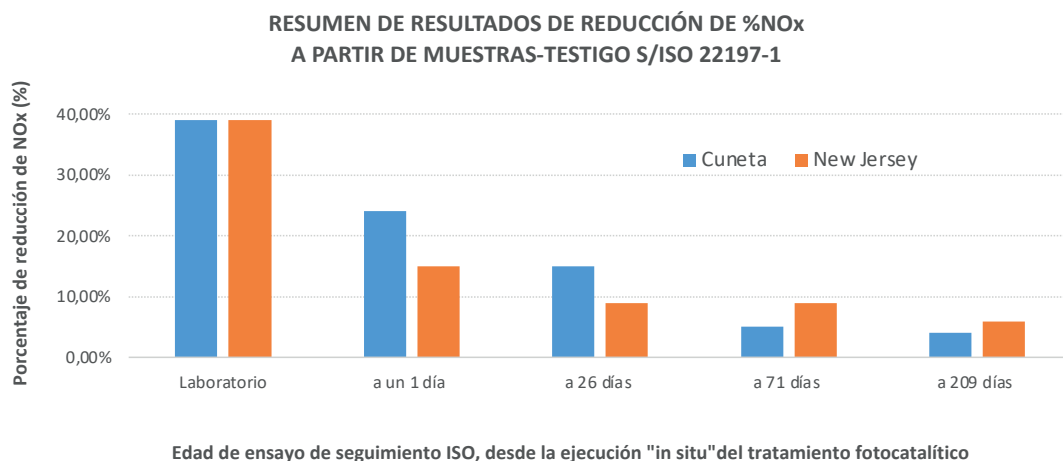


Figura 89: Resumen de resultados de eficiencia fotocatalítica. Fuente: Eptisa.

iv. Los ensayos de saturación acelerada de una de las muestras, sugieren que a las 4.080 horas de exposición a 1 ppm de NO (no es un tiempo de exposición habitual para el ser humano a corto plazo), se bloquea el fotocatalizador y se pierde totalmente la eficiencia, aunque mediante ciclos de humedad-sequedad (lavados con 30 inmersiones en agua sin frotación/fricción ni uso de jabones y posterior secado a más de 100 °C), se regenera parcialmente.

v. La eficiencia fotocatalítica de las probetas obtenidas, a partir del tallado de los testigos de hormigón donde se ha realizado un estudio de sensibilidad, variando las dotaciones de producto a escala laboratorio, sugieren que, aumentos de dotación producen aumentos de degradación de contaminantes, hasta que se llega a un máximo, a partir del cual se comienza a reducir. Las dotaciones en húmedo óptimas se obtendrían a partir de los 100-150 g/m², en húmedo.

vi. Después de la exposición en campo durante un total de 209 días (6,9 meses), se observan en las probetas estudiadas eficiencias fotocatalíticas en elementos de contención, del orden del 5% para los ensayos realizados, según norma UNE ISO 22197-1:2012.

vii. Se observa mejor eficiencia fotocatalítica en las probetas embebidas en la cuneta de mediana que en las de elementos de contención, con una eficiencia del orden del 10%.

viii. Después de los lavados de las probetas para su nuevo ensayo, se observa mejor recuperación de la efectividad fotocatalítica en la probeta de cuneta que en las de elementos de contención.

ix. Los materiales fotocatalíticos han demostrado, por tanto, mejoras en la calidad del aire, en aquellos activos de infraestructuras, donde se han aplicado, funcionando como tratamiento pasivo y autoregenerante, mediante el agua de lluvia.

x. Los análisis de las aguas de lixiviado tras las aplicaciones fotocatalíticas, indican que la movilización de partículas de dióxido de titanio (en las aguas de recogida de pluviales) son extremadamente reducidas, sugiriendo una buena adherencia del fotocatalizador al soporte de aplicación.

8.2.2 ELEMENTOS DE CONTENCIÓN EN CARRETERA BI-637 (VIZCAYA)

En el periodo 2021-2023, la Diputación Foral de Bizkaia, promovió un proyecto piloto de I+D+i para la mejora de la calidad del aire en un tramo periurbano con congestión de vehículos en horas punta, y configuración en “Street Canyon”, a partir de la aplicación de tecnología fotocatalítica sobre elementos de contención existentes.

El objetivo del proyecto era principalmente la reducción de la contaminación en la zona de intervención, y la obtención de un efecto autolimpiante en los elementos de contención: barrera New Jersey.

La Empresa adjudicataria de los trabajos fue Eptisa, Servicios de Ingeniería, que contó con la colaboración de AIF. La duración del proyecto fue de 24 meses.

El procedimiento general que se siguió durante el proyecto, se resume a continuación:



Figura 90: Planta de localización de aplicaciones. Carretera BI-637 (Túneles de la Avanzada). Fuente: Eptisa.



Figura 91: Sección de uno de los tramos de aplicación. Fuente: Google Maps.

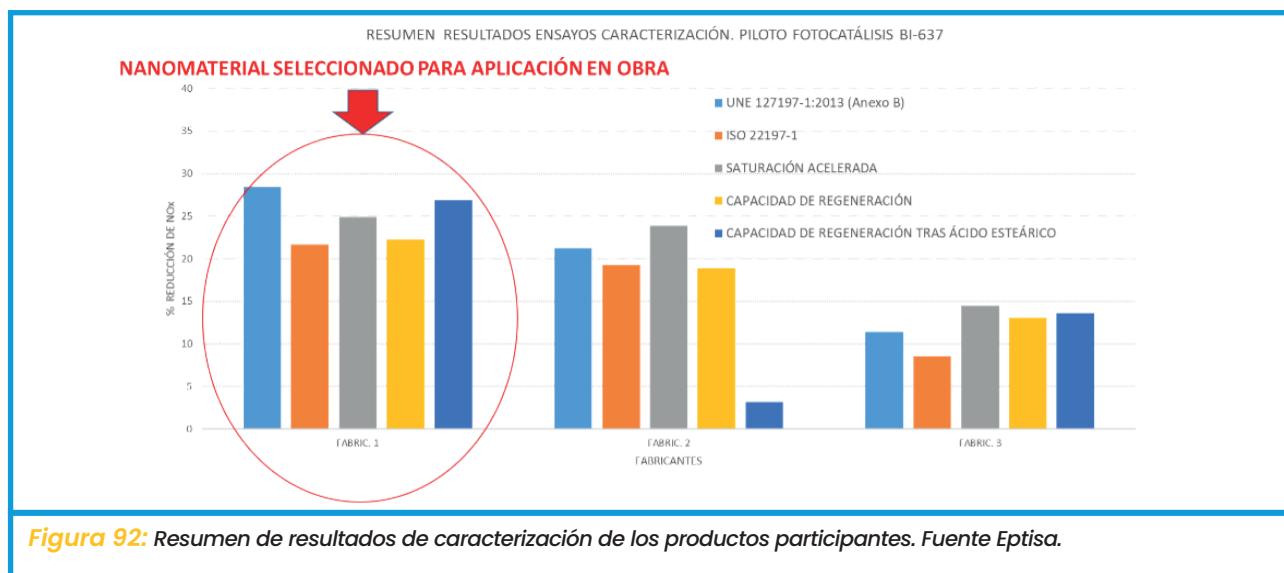


1. Fase previa

- Análisis de condicionantes medioambientales y selección del emplazamiento.
- Selección de activos del transporte susceptibles de fotocatalizar y conocimiento previo de sus características (tipo de material, textura, porosidad, etc).
- Pre-selección de materiales fotocatalíticos, exclusivamente de productos fabricados por socios de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis – AIF (datos de alta en su web oficial: <https://www.fotocatalisis.org/listado-de-socios/>), pues son los únicos del mercado que cuentan con Certificados de Eficiencia de actividad fotocatalítica.
- Extracción de muestras de activos del transporte similares a los que se va a aplicar el tratamiento fotocatalítico.
- Calibración de equipos de medición de actividad fotocatalítica.
- Realización de ensayos de caracterización de laboratorio:
 - Ensayos de determinación de eliminación de óxidos de nitrógeno mediante fotocatalisis, según la Norma UNE 127197-1:2013 (Anexo B), para evaluar la capacidad fotocatalítica del material a medio plazo.
 - Ensayos de determinación de eliminación de óxidos de nitrógeno mediante fotocatalisis, según la Norma UNE ISO 22197-1:2012.

- Ensayos de durabilidad, mediante pruebas de saturación acelerada.
- Ensayos de determinación de la capacidad de regeneración.
- Ensayos de autolimpieza, según la Norma ISO 27448:2009 (Test Method for self-cleaning performance of semiconducting photocatalytic material-Measurement of water contact angle) de ángulo de contacto, adaptada a soportes porosos, en su caso.
- Ensayos de resistencia al envejecimiento a la intemperie.
- Ensayos de adherencia al soporte.
- Recomendable que haya una estación meteorológica cercana para conocer el histórico de temperaturas, lluvias, velocidad del viento y humedad relativa, en su caso.
- Selección de producto fotocatalítico, donde el fabricante aporta:
 - Fórmula de trabajo.
 - Certificado de Eficiencia de Producto expedido por la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis.
 - Dotación (g/m^2) de fotocatalizador residual, es decir, dotación en seco y también en húmedo.
 - Declaración de maquinaria de aplicación, incluyendo dotaciones y presiones de aplicación.
 - Recomendaciones de periodicidad de limpieza para el correcto mantenimiento de la superficie tratada. Esta se realizará sólo con agua (sin barredora), o con una disolución de agua y desengrasante.

El resumen de resultado de ensayos de caracterización se muestra en la gráfica siguiente:





2. Fase de construcción

- Gestión de permisos de corte de tráfico.
- El aplicador debe contar con la maquinaria adecuada y todos los medios auxiliares necesarios de suministro eléctrico y agua para la correcta ejecución de las obras.
- El soporte de aplicación deberá estar limpio y seco evitando la presencia de fuertes vientos, o temperaturas fuera del rango 5 °C – 35 °C.
- Control de procesos:
 - El contratista debe disponer de una maquinaria de aplicación que posea, tanto un sistema de control de dotación en húmedo y en seco como un sistema de control de presiones de aplicación.
 - Antes de las obras se deberá calibrar la presión y caudales de aplicación con la dotación a colocar en obra.
- Presencia de un director de obra y recurso preventivo durante las obras, para verificación de las declaraciones del fabricante en fase previa.
- Incorporación de estaciones de medición de calidad del aire o muestras testigo fácilmente desmontables *in situ* (mismo sustrato y condiciones de ejecución), para la fase de seguimiento.



Figura 93: Limpieza previa de la superficie de aplicación. Fuente: Eptisa.



Figura 94: Aplicación de tratamiento fotocatalítico sobre elemento de contención. Fuente: Eptisa.



3. Fase de seguimiento a partir de probetas instaladas *in situ* (ver Apartado 7.2, de normativa de ensayos *in situ*)

- Establecimiento de protocolo patrón de recepción de muestras, en consonancia con el protocolo de limpieza declarado por el fabricante en la fase previa.
- Realización de control de seguimiento de eficiencia descontaminante, a partir de muestras testigo.
- Redacción de informes de seguimiento.

CONCLUSIONES DEL ESTUDIO:

I. Los materiales fotocatalíticos han demostrado mejoras en la calidad del aire, en aquellos activos de infraestructuras donde se han aplicado, funcionando como tratamiento pasivo y autoregenerante, mediante el agua de lluvia.

II. Se observa una tendencia asintótica en cuanto a la eficiencia descontaminante de las muestras instaladas en obra, que se mantiene en el tiempo. Los resultados de eficiencia descontaminante medidos, tras 443 días de exposición a la intemperie, están en el entorno del 6 – 10% de capacidad descontaminante, teniendo en cuenta las limitaciones de este tipo de metodologías de análisis, incluidas en el [apartado 7.2](#).

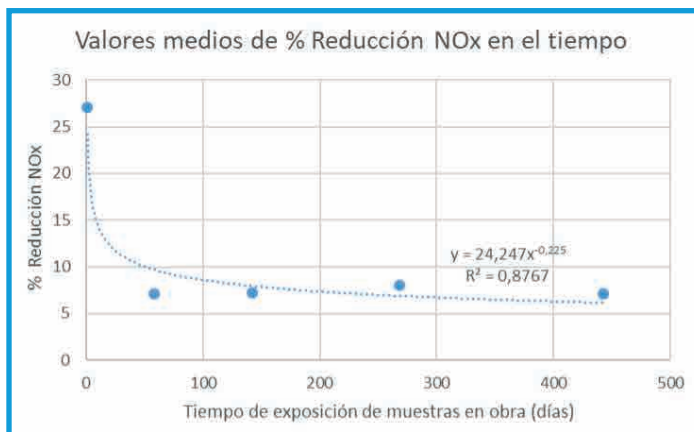


Figura 95: Resultados de degradación de NOx en el tiempo, con el método de instalación de muestras in situ. Fuente: Eptisa.

III. A partir del resultado anterior, teniendo en cuenta que en el piloto se aplicó un tratamiento para una superficie aproximada de 400 m², con un consumo total de unos 33 litros de material fotocatalítico, y suponiendo una eficiencia descontaminante del mismo del 7%, se podría establecer las siguientes equivalencias (información facilitada por el fabricante):

- Los 400 m² de material fotocatalítico aplicado eliminarían la contaminación producida por 10 coches al año.
- Los 400 m² de material fotocatalítico aplicado equivaldrían a plantar 660 árboles.

8.2.3 TÚNELES FOTOCATALÍTICOS (MADRID)

Dentro del Programa Operativo FEDER Madrid 2007-2013 (Iniciativa Urbana), el Ayuntamiento de Madrid adjudicó la primera obra de aplicación de productos fotocatalíticos a gran escala en España, sobre una superficie total de unos 21.000 m² en el distrito de Villaverde (proyecto de innovación y desarrollo tecnológico en materia de fotocatalisis para la descontaminación del aire ambiente: aplicación de pavimentos y revestimientos sostenibles para la descontaminación del aire mediante la eliminación de óxidos de nitrógeno en el distrito de Villaverde).

Para su consecución, el Ayuntamiento de Madrid preparó los siguientes proyectos y contratado su ejecución:

Contrato de obras para la aplicación de pavimentos y revestimientos sostenibles en el distrito de Villaverde.

Contrato mixto servicios–suministro para la evaluación de la incidencia sobre la calidad del aire de esa aplicación.

Dentro de esos contratos se realizó la aplicación y seguimiento de pintura fotocatalítica en el túnel de El Espinillo, en los hastiales, compuestos de lamas metálicas (1.565 m^2) y vigería de la parte superior, de hormigón armado (2.364 m^2).

Previamente a la aplicación de la pintura fotocatalítica, se instaló iluminación artificial LED, con radiación en el espectro ultravioleta, sustituyendo a las luminarias existentes.

También antes de la aplicación del tratamiento fotocatalítico, se realizó una limpieza para favorecer la adherencia entre el sustrato y el propio tratamiento.

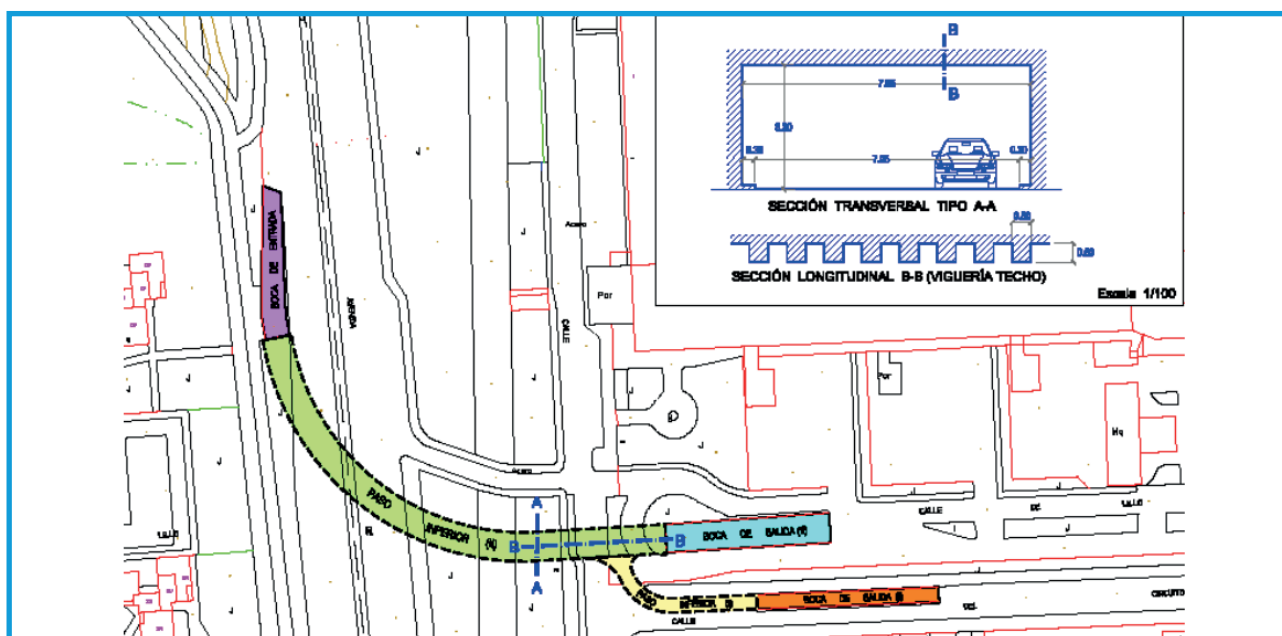


Figura 96: Aplicación en el túnel de El Espinillo de Villaverde (Madrid). Fuente: Ayuntamiento de Madrid.



Figura 97: Cambio de luminarias existentes a LED, para activación del fotocatalizador, en el túnel del El Espinillo. Fuente: Ayuntamiento de Madrid.

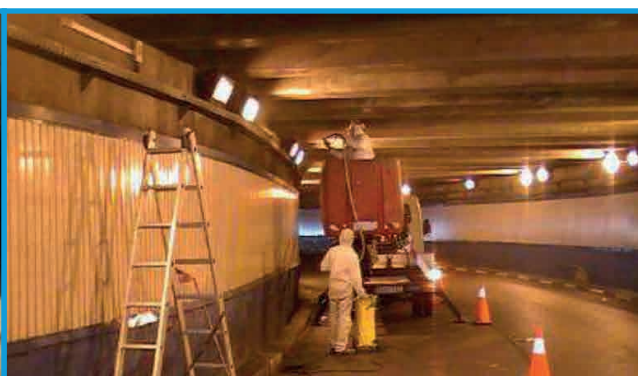


Figura 98: Proceso de cambio de luminarias en el túnel. Fuente: Ayuntamiento de Madrid.

Sobre la pintura de túnel, además de realizar ensayos de seguimiento de la actividad descontaminante, también se realizaron los siguientes ensayos:



1. Ensayo de densidad sobre película líquida.



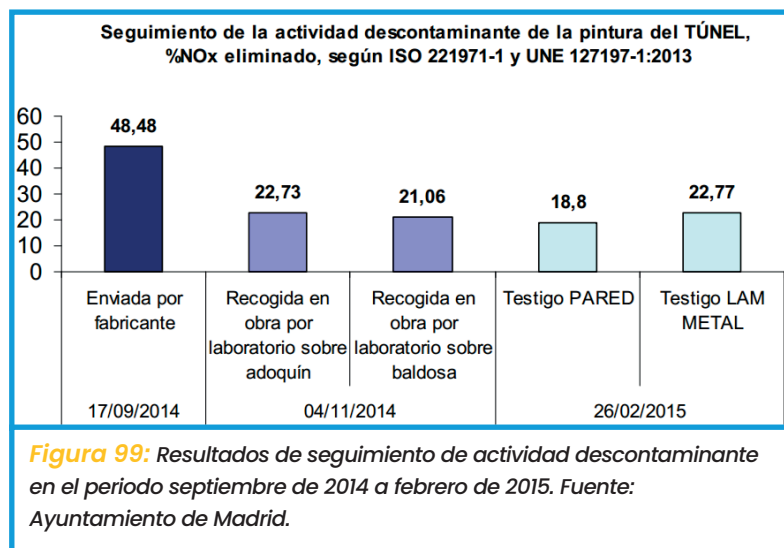
2. Ensayos de difracción de rayos X sobre película de pintura raspada sobre probeta, así como directamente sobre pintura líquida seca.



3. Análisis elemental por fluorescencia de rayos X (FRX) sobre película de pintura raspada sobre probeta (12 muestras), así como directamente sobre pintura líquida seca (14 muestras).

El resumen de los ensayos de eficiencia fotocatalítica, entre los meses de septiembre de 2014 y febrero de 2015, mostró que las reducciones de las concentraciones de NOx se situaban en el rango 18% - 23%.

Es destacable señalar que el producto fotocatalítico seleccionado para la aplicación en túnel, se encontraba en posesión del Certificado de Eficiencia Fotocatalítica que otorga AIF.



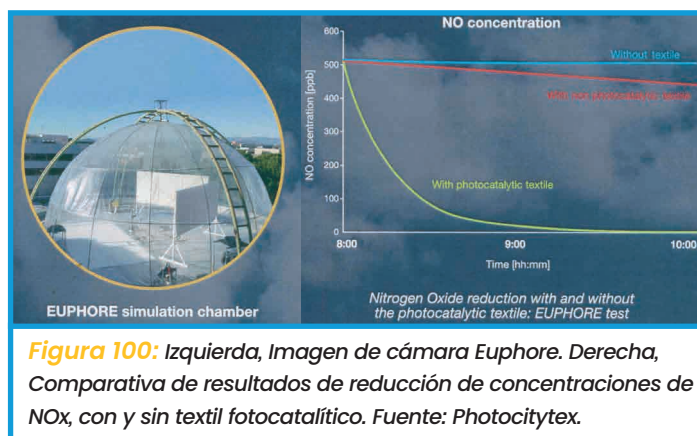
8.2.4 TELAS DESCONTAMINANTES (VALENCIA)

El propósito del proyecto LIFE PHOTOCITYTEX <http://photocitytex.eu/> fue evaluar la efectividad del uso de materiales fotocatalíticos basados en TiO₂ en la construcción de textiles, como una forma de mejorar la calidad del aire en zonas urbanas. El proyecto estaba coordinado por el CEAM, a través de la doctora Amalia Muñoz, y contaba con los siguientes socios: Aitex, el Ayuntamiento Quart de Poblet, Legambiente y Next Technology.

En particular, el proyecto pretendía:

- Revisar las tecnologías actuales disponibles e identificar compuestos fotocatalíticos que son adecuados para su uso con textiles.
- Revisar la legislación europea relacionada con la concentración de contaminantes en los entornos urbanos para establecer las condiciones de demostración a gran escala.
- Desarrollar prototipos textiles a escala industrial en forma de toldos y cubiertas de paredes.

- Demostrar a gran escala el uso de textiles fotocatalíticos para la descontaminación de los entornos urbanos mediante el empleo de las cámaras EUPHORE.
- Adquirir información sobre productos secundarios formados durante las pruebas, mejorar la comprensión de todo el proceso y de sus implicaciones.



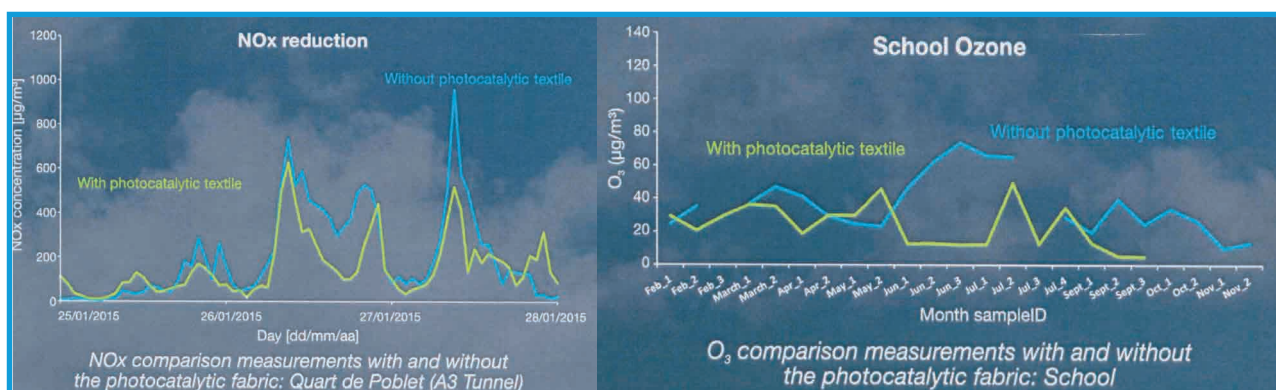
- Instalar los textiles fotocatalíticos en dos localizaciones urbanas en Quart de Poblet (Valencia).

A tal fin se comenzó primero a tratar de estimar la eficacia de los textiles fotocatalíticos identificados, lona y toldo, en condiciones controladas atmosféricas, usando la cámara de simulación atmosférica EUPHORE.

Posteriormente, se instalarían esos mismos dos textiles, lona y toldo, en la entrada a un falso túnel urbano de la Autovía A-3 en el municipio de Quart de Poblet, y en un colegio de la misma población (C.P. Ramón Laporta), respectivamente, midiendo la polución, antes y después de la instalación de ambos textiles.

Las conclusiones del proyecto demostraron reducciones de las concentraciones de NOx, del orden del 25%, y de Ozono (O_3), según expuso la Dra. Amalia Muñoz (CEAM) en la Jornada de Fotocatálisis: Materiales de última generación para construcciones sostenibles (Valencia) con fecha 30 de noviembre de 2017.

Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos desde que se comenzara el proyecto, se diseñó una herramienta matemática para simular cómo la instalación de textiles fotocatalíticos puede ayudar a reducir la contaminación, disponible en la página web del proyecto <https://photocitytex.eu>.



8.3 ENVOLVENTES DE EDIFICACIÓN

8.3.1 CUBIERTAS FOTOCATALÍTICAS (MADRID)

Se trata de cubiertas planas descontaminantes (no transitables), formadas por una lámina asfáltica autoprotegida con unos micro-gránulos aditivados con fotocatalizador.

Estas cubiertas impermeabilizantes fotocatalíticas han sido sometidas a ensayo de eficiencia descontaminante (NOx) por el Instituto de Combustión, Aerotermia, Reactividad y Medioambiente (ICARE) de Francia. El ensayo trató de reproducir los niveles de concentración medios de NO y NO₂ habituales en una gran ciudad, como fue el caso de París. Primero se realizó el ensayo con un “blanco” (sin muestra, en este caso) con y sin radiación ultravioleta, y posteriormente, con la cubierta impermeabilizante fotocatalítica, con y sin radiación.



Figura 102: Cubiertas impermeabilizantes fotocatalíticas en centro logístico de Amazon. Getafe (Madrid). Fuente: BMI.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 15
Comparativo de resultados de eficiencia descontaminante. Fuente: BMI

		Concentraciones iniciales NOx ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ eq NO ₂)	Concentraciones finales NOx ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^3$ eq NO ₂)
En la oscuridad	Sin muestra fotocatalítica	577,6	539,33
	Con muestra fotocatalítica	464,7	457,5
Bajo radiación	Sin muestra fotocatalítica	539,3	501,1
	Con muestra fotocatalítica	457,7	53,2

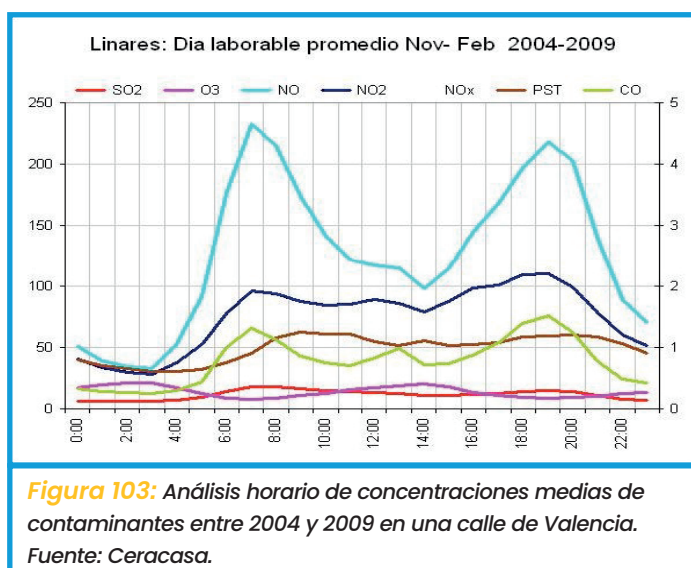
Estas láminas asfálticas han sido implantadas a lo largo de todo el mundo y en especial en España. Algunos ejemplos de ello son las tiendas Ikea de A Coruña, Sevilla, San Sebastián, las tiendas de Leroy Merlin de Azuqueca de Henares, Oviedo, Alboraya, Sevilla, el almacén logístico de Amazon en Getafe, los depósitos de agua Canal Isabel II de Collado Villalba y San Fernando de Henares, así como un considerable número de cubiertas de edificios residenciales con cubierta plana no transitable.

8.3.2 REVESTIMIENTOS CERÁMICOS FOTOCATALÍTICOS PARA FACHADAS (VALENCIA)

La empresa Ceracasa encargó en su día al Centro de Estudios Experimentales del Mediterráneo (CEAM) la evaluación de la eficiencia fotocatalítica de un revestimiento cerámico de fachadas en Valencia.

Las pruebas se realizaron en la Cámara Euphore (CEAM), pero para ello, se tuvieron que simular las condiciones ambientales reales de una calle de Valencia como base del estudio.

Para el establecimiento de las condiciones experimentales a simular en la cámara, en cuanto a niveles de óxidos de nitrógeno y humedad relativa en un ambiente urbano, se tomaron los datos de contaminación ambiental de la estación calidad del aire de la calle Linares en Valencia, por considerarse representativos del ambiente en grandes avenidas y calles con elevado tráfico. Se utilizaron los valores promedio calculados entre noviembre y febrero de 2004 a 2009.



Los experimentos se llevaron a cabo durante los cinco primeros días de febrero de 2010, durante un periodo de anticiclón que se mantuvo mientras se realizó el ensayo.

Las características de las pruebas fueron las siguientes:

- Cámara Euphore: cúpula presurizada de 200 m³.
- Monitorizada en todo momento para el control del aire y su variación con el tiempo.
- Con una insolación natural durante dos días (22 horas) sobre 5 m² de cerámica fotocatalítica, situada hacia distintas orientaciones. El formato de la cerámica utilizada fue de 49x98.2 cms.
- Introduciendo de forma continua, bajo demanda de NO Y NO₂ en cantidades reales de (150-250 ppb NOx), simulando el aire de una ciudad.
- Se controló la superficie cerámica para la evaluación de nitratos y nitritos.

El primer experimento (sin cerámica fotocatalítica, es decir el experimento "blanco") se realizó el 1 de febrero desde las 14:00h (hora solar) al día 2 de febrero a las 14:00h (hora solar).

El segundo y tercer experimentos se realizaron desde el 2/2/2010 a las 23:00h (hora solar) al 2/3/2010 a las 22:00h (hora solar) de un día soleado y desde el 4/2/2010 a las 16:00h (hora solar) hasta el día 5/2/2010 a las 15:17h (hora solar) de un día nublado.

A la hora de interpretar estos resultados, se debe tener en cuenta que, en la atmósfera simulada en los laboratorios EUPHORE las especies de partida fueron NO y H₂O; no se estudió el efecto sobre otros compuestos.



Figura 104: Vista de la Cámara Euphore. Fuente: CEAM.

<i>Experimento</i>	<i>Inicio: Fecha y hora (solar)</i>	<i>Fin: Fecha y hora (solar)</i>
BLANCO	01/02/2010 – 14:00h	02/02/2010 – 14:00h
CICLO 1	02/02/2010 – 23:00h	03/02/2010 – 22:00h

Figura 105: Fechas, horas y ciclos de experimentación.

En base a los resultados obtenidos se pudo concluir lo siguiente:



1. Se observó una disminución de los niveles de ácido nítrico (HNO₃) al utilizar las placas cerámicas fotocatalíticas dentro de la cámara. Concretamente, una disminución con respecto al experimento en blanco del 74.44% en el Ciclo 1 (día nublado) y el 57.65% en el Ciclo 2 (día soleado).



2. Con las piezas cerámicas fotocatalíticas se detectaron niveles más bajos de radicales HO₂, es decir, el ciclo de reacciones químicas se encuentra desplazado hacia la formación de radicales OH que, junto con el metano (CH₄) que siempre está presente en el aire utilizado en los simuladores (es un compuesto difícil de ser eliminado por el sistema de acondicionamiento de aire), da lugar a la formación de formaldehído (HCHO).



3. También se detectó ácido fórmico (HCOOH) que es el siguiente producto de oxidación del formaldehído lo que indica que existe cierta actividad fotoquímica dentro de la cámara.



4. En el lavado de las piezas se obtuvo una concentración media de nitratos de 9,71 mg/m² mientras que la de nitritos fue de 0,014 mg/m², no pudiéndose confirmar que existan diferencias significativas en cuanto a la orientación de las piezas cerámicas.

5. Se ha confirmado que el nitrato analizado procede de la propia actividad fotocatalítica de las piezas y no es producto de su deposición directa sobre las mismas, debido a que los niveles detectados se encuentran por debajo de sus límites de detección.
6. Al realizar un balance global de Nitrógeno, el 9,21% del nitrógeno introducido fue abatido por las piezas en forma de NO_3 , mientras que el 0,02% en forma de NO_2 .
7. Utilizando el nitrógeno como especie trazadora, se estimó que la cantidad de nitrógeno recogida en forma de nitratos y nitritos equivale a un total de 5,96 mg/m² de NO_x, que teniendo en cuenta el número de horas de exposición solar durante el experimento, y extrapolando al número total de horas de sol en la ciudad de Valencia de noviembre a enero, equivalen a 132 mg/m² de NO_x (bajo las condiciones de simulación en la cámara EUPHORE).

Se puede concluir que los estudios realizados por el Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (Fundación CEAM) en la cámara EUPHORE, han señalado que las piezas cerámicas fotocatalíticas ensayadas a escala real son capaces de descomponer el NO_x y HNO₃ en una atmósfera real con humedad y concentraciones de contaminación iguales al aire que se respira en una gran ciudad con paso de tráfico permanente de vehículos. De igual forma, se ha contrastado que el efecto descontaminante de estas cerámicas fotocatalíticas actúa de forma continuada, siempre que haya radiación solar.

8.3.3 PINTURAS PARA FACHADAS EN ALCOBENDAS (MADRID)

Dentro del Proyecto MINOX STREET, también se llevaron a cabo análisis de comportamiento de pinturas fotocatalíticas aplicadas sobre diferentes tipos de fachadas.

Una de las empresas que suministró al proyecto tres de sus pinturas fotocatalíticas fue Nanopinturas. En primer lugar, se evaluó la actividad fotocatalítica de las tres pinturas, sobre diferentes tipos de fachadas, mediante la Norma ISO 22197-1.

La aplicación de las pinturas sobre los distintos soportes de fachada se realizó según las indicaciones del fabricante.

Muestra	Descripción	Área muestra cm ²	FOTO
M17A	Fachada Rugosa con NP 231K	46,1	
M17B	Ladrillo Tipo 1 con NP 231K	48,5	
M17C	Ladrillo Tipo 2 con NP 231K	49,0	

Figura 106: Presentación de pinturas de fachada bajo el código de muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET.

En segundo lugar, se analizó la concentración de nitratos y nitritos tras la reacción fotoquímica, el efecto del envejecimiento y la respuesta a un proceso de lavado con agua, de las muestras que presentaban mayor capacidad de eliminación de NOx.

Las pinturas analizadas se codificaron, dentro del proyecto, como muestras, 17, 25 y 26.

A continuación, se presentan los resultados de los estudios realizados sobre la serie de la muestra 17: 17A, 17B y 17C, aplicadas sobre fachada de piedra rugosa, sobre ladrillo cerámico tipo 1 y sobre ladrillo cerámico tipo 2, respectivamente.

En la siguiente figura se muestran los resultados de eliminación de NOx.

	X _{NO} (%)	X _{NOx} (%)	NO _{x,e} (μmol)	NO _e (μmol)	NO _{2f} (μmol)
M17A	37	28	10,9	14,8	3,3
M17B	29	15	5,6	10,9	5,0
M17C	18	11	6,9	4,8	2,8

Figura 107: Eliminación de NOx. muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET.

Se puede observar que los mejores resultados se han obtenido sobre la fachada rugosa, con un 28% de reducción de concentraciones de NOx.

Posteriormente, siguiendo la norma anteriormente citada, se ha analizado la concentración de nitratos y nitritos en la muestra mediante cromatografía iónica (Dionex ICS-2000). Los resultados se muestran en la siguiente figura.

El siguiente paso fue la realización de ensayos en cámara de envejecimiento acelerado (Aralab Fitoclima 200-EDTU) sometiendo las muestras a condiciones severas de 500 horas al 85% de humedad relativa y 85 °C, conforme a la Norma UNE EN 61215 para módulos expuestos a condiciones de intemperie.

	pNO ₃ (mg/l)	pNO ₂ (mg/l)
M17A	6,2	1,7
M17B	6,5	<0,1
M17C	4,2	<0,1

Figura 108: Concentraciones de nitritos y nitratos. muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET.

	X _{NO} (%)	X _{NOx} (%)	NO _{x,e} (μmol)	NO _e (μmol)	NO _{2f} (μmol)
M17A-cámara	10	6	2,5	3,9	0,7

Figura 109: Envejecimiento en cámara de envejecimiento acelerado. muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET.

La muestra que mejores resultados obtuvo en el ensayo ISO 22197-1 de laboratorio fue la que se eligió para este ensayo acelerado. En esta ocasión, los resultados obtenidos mostraban un nivel de reducción de NOx del 6%.

	Tiempo exposición h	LAVADO	X _{NO} (%)	X _{NOx} (%)	NO _x (μmol)	NO _e (μmol)	NO _{2f} (μmol)
M17B	-	L-S	41	26	9,4	15,2	6,0
M17B	500	L-S	34	19	7,4	13,2	6,3
M17B	1000	L-S	30	17	6,0	10,7	5,3
M17B	1000	L-S+ L-F	10	6	2,1	3,51	1,8
M17C	-	L-S	36	22	8,6	14,1	5,6
M17C	-	L-S+ L-F	14	8	3,3	5,6	2,5

Figura 110: Envejecimiento a la intemperie y efecto de lavados. muestra 17. Fuente: LIFE MINOX STREET.

Por último, se realizaron ensayos de envejecimiento manteniendo las muestras en condiciones de intemperie, situándolas en un panel con orientación sur y ángulo de inclinación de 45° (latitud 40° 27' 20" N, longitud 3°43'48" W). En estas condiciones las muestras permanecieron expuestas a los cambios de radiación solar, variación de la temperatura y humedad, así como a concentración de óxidos de

nitrógeno y otros contaminantes presentes en el aire exterior, característicos del ciclo día-noche.

Los ensayos de lavado con agua denominados Suaves "L-S" se realizaron sumergiendo las muestras 30 veces consecutivas en agua destilada, a una velocidad de 5 cm s⁻¹. De forma complementaria se hicieron lavados denominados Fuertes "L-F" de acuerdo al lavado detallado en la norma ISO 22197-1 para la extracción de nitratos y nitritos tras el análisis de la eficiencia fotocatalítica.

La cara con el componente fotoactivo de la muestra se sumergió en agua destilada durante 60 minutos. Tras este periodo, se cambió el agua de lavado y se repitió el proceso. El recipiente donde se colocó la muestra con el agua, se sometió a un ligero movimiento, en un equipo Heidolph Titramax 1000 a 150 rpm para favorecer el proceso de lavado.

Muestra	Descripción	Área muestra cm ²	FOTO
M25	Ladrillo Tipo 2 con NP23/2K	48,7	
M26A	Ladrillo Tipo 2 con NP x2 23/2K	49,5	
M26B	Ladrillo Tipo 2 con NP x2 23/2K solo COMPONENTE A	49,5	

Figura 111: Presentación de pinturas para ladrillos cerámicos. muestras 25 y 26. Fuente: LIFE MINOX STREET.

La muestra M17B sometida a lavados suaves fue la que obtuvo mejores resultados, hasta un 26% de reducción de NO_x, incluso mejorando los resultados obtenidos antes de envejecimiento, que eran del 15%. El mismo fenómeno se ha producido, aunque en menor medida, con las muestras M17B y M17C: en ambos casos se observa una mejora sustancial de eficiencia fotocatalítica, tras el ensayo de envejecimiento y el efecto del lavado sobre las muestras, con respecto al ensayo inicial realizado con ISO 22197-1.

A continuación, se analizan las muestras codificadas como M25 y M26 (esta última con dos variantes M26A y M26B).

En la siguiente figura podemos observar los resultados de eliminación de NO_x de las muestras analizadas.

	X _{NO} (%)	X _{NOx} (%)	NO _x (μmol)	NO _e (μmol)	NO _{2f} (μmol)
M25	4	3	1,5	1,1	0,7
M26A	10	6	3,9	2,5	1,7
M26B	26	17	10,4	6,7	3,9

Figura 112: Eliminación de NO_x. muestras 25 y 26. Fuente: LIFE MINOX STREET.

La muestra 26B es la que mejores resultados presenta, con un 17% de eliminación de NO_x.

8.3.4 PINTURAS AUTOLIMPIANTES EN DARMSTADT (ALEMANIA)

A continuación, se expondrá un breve resumen de la prueba a escala real que la empresa KEIM realizó durante 5 años en sus instalaciones de Alemania, para demostrar la capacidad autolimpiante de dos de sus pinturas al silicato fotocatalíticas, una de ellas representada por las muestras 10651 y 1062 y otra, por las muestras 10657 y 10658, con respecto a pinturas convencionales (que se comercializan como especialmente limpias) codificadas como Comp A (muestras 10663 y 10664) y Comp B (muestras 10669 y 10670).



Figura 113: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.

Para ello se pintaron 8 paneles, 4 con pinturas fotocatalíticas y otros 4 con pinturas convencionales y se expusieron a la intemperie durante 5 años.



Figura 114: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.



Figura 115: Comparativa de autolimpieza de pintura fotocatalítica con convencionales tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.

Cada año se han ido tomando microfotografías de cada uno de los paneles, con objeto de analizar las impurezas (componentes orgánicas o inorgánicas) que iban quedando adosadas a las superficies de la pintura, donde se obtuvieron los siguientes resultados comparativos:

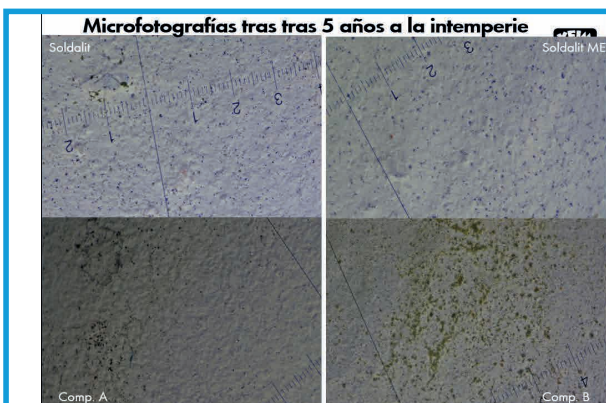


Figura 116: Comparativa de microfotografías tomadas sobre los paneles tratados y no tratados con fotocatalisis, tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.

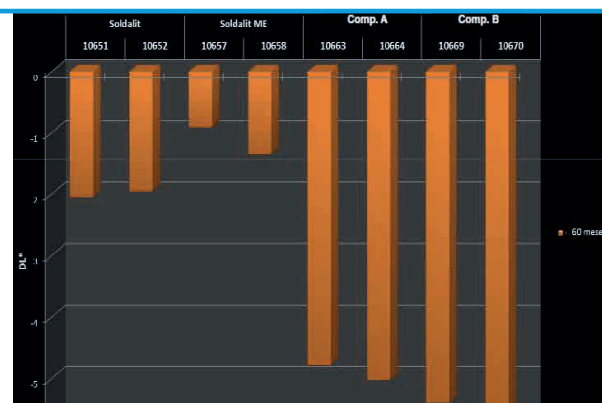


Figura 117: Comparativa de resultados de microfotografías tomadas sobre los paneles tratados y no tratados con fotocatalisis, tras 5 años de exposición a intemperie. Fuente: KEIM.

8.4 INTERIORES FOTOCATALÍTICOS

8.4.1 OFICINAS (REINO UNIDO)

ECO-SEE (<https://www.eco-see.eu>) es un proyecto de cuatro años de duración (2013 – 2017), que se propuso desarrollar y evaluar el desempeño de materiales innovadores de construcción ecológica, entre los que estaban las aplicaciones fotocatalíticas para interiores.

Con la eficiencia energética en los edificios a la cabeza de la agenda política europea, Bruselas es, sin duda, el lugar donde mayor conciencia hay sobre la importancia de generar edificios con alto rendimiento energético. Sólo una minoría de la población mundial es consciente de que la calidad del aire en espacios interiores es un serio problema que debe abordarse con urgencia, por las graves consecuencias que tiene sobre la salud.

Según figura en la documentación pública de la web del Proyecto ECO-SEE, el aire interior de los edificios podría estar entre 2 y 5 veces más contaminado que en el exterior, debido a la presencia de contaminantes como los compuestos orgánicos volátiles (COV), liberados por muebles, productos de limpieza y textiles. También el moho y las bacterias resultantes de niveles excesivos de humedad son habituales en baños y cocinas.

En reconocimiento de este problema, la Comisión Europea ha apoyado una serie de proyectos de investigación que desarrollan materiales ecológicos para mejorar la calidad ambiental interior. El proyecto ECO-SEE, financiado con fondos europeos, ha desarrollado recubrimientos higrotérmicos que regulan los niveles de humedad relativa y la temperatura, materiales de aislamiento biológicos modificados para capturar los VOC y recubrimientos fotocatalíticos para eliminar los contaminantes interiores utilizando fuentes de luz visibles. Además, como estos materiales son naturales, la energía incorporada para producirlos es muy baja y al final de su vida útil pueden eliminarse de forma segura o, incluso, reciclarse.

Los resultados del proyecto se mostraron en un taller final en Bruselas el 29 de junio de 2017. Los socios desarrollaron un panel de pared "multifuncional", que integraba varios de los materiales ecológicos mejorados durante el proyecto, para mostrar el potencial de los mismos cuando se combinan. El panel estuvo en exhibición durante el evento, habiendo completado recientemente pruebas a escala real en con demostradores en el Reino Unido y en España.

Las principales conclusiones fueron las siguientes:

- 60% de mejora en la resistencia térmica y 80% de mejora en el rendimiento de amortiguación de la humedad de los revoques de arcilla;
- 180-720% de mejora en el potencial de captura de COV del aislamiento de lana de oveja;

- Desarrollo de revestimientos fotocatalíticos para la eliminación de contaminantes orgánicos (COV) bajo fuentes de luz visible. De hecho, a día de hoy, según se establece en el apartado “Eco materiales en el mundo real” del Booklet ECO-SEE, ya se han instalado paneles fotocatalíticos en las oficinas centrales de la empresa Skanska en Reino Unido para mejora de la calidad del aire interior.
- Hasta un 50% de mejora en el rendimiento energético de la pared ECO-SEE en comparación con paneles convencionales que se tomaron de referencia, donde se emplearon materiales de aislamiento tradicional y acabado estándar.

Esta información ha sido extraída en su totalidad del Booklet ECO-SEE, February 2017 (Ling, J. et al.) y de la web: <https://www.eco-see.eu>.

8.4.2 AULAS UNIVERSITARIAS (MADRID)

La redacción del apartado que a continuación se facilita, está íntegramente basado en el artículo publicado por los autores, Antonio Nieto-Márquez (*Departamento de Ingeniería Mecánica, Química y Diseño Industrial, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, UPM*) y Manuel de Mateo, Andrea Barrios, M. del Mar de la Fuente García-Soto y Adolfo Narros (*Departamento de Ingeniería Química Industrial y del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, UPM*), en la revista indexada Elsevier ScienceDirect, y publicada en Junio de 2023, dentro de la temática: Investigación sobre contaminación atmosférica. La selección de fragmentos del citado artículo ha corrido a cargo del coordinador de este Libro Blanco.

INTRODUCCIÓN

Las personas pasan más del 90% de su vida en espacios interiores y, por tanto, la exposición a contaminantes puede ser muy elevada cuando hay presente mala calidad del aire en dichos espacios.

Los contaminantes presentes en el interior de un edificio provienen del interior del propio edificio (contaminantes producidos por materiales de construcción, por los materiales que componen el mobiliario, por la propia actividad desarrollada, por la contaminación biológica que generan los usuarios, etc), o desde el exterior (tráfico, actividad industrial cercana, etc). Estas circunstancias, junto a las dificultades que entraña la limpieza y mantenimiento de los elementos de climatización de un edificio por su difícil acceso, hacen que la contaminación en interiores requiera un análisis con mayor profundidad, con carácter general.

Entre las técnicas de mejora de la calidad del aire en interiores, los materiales de construcción que incorporan un fotocatalizador se consideran una alternativa prometedora.

La fotocatalisis es un proceso de oxidación avanzada que consiste en la oxidación/mineralización de contaminantes en contacto con una superficie fotocatalítica, bajo la presencia de irradiación UVA y solar.

CASO DE ESTUDIO

En este estudio, una pintura fotocatalítica basada en TiO_2 y activada con la iluminación apropiada (ProCleanAir®, de PROQUICESA S.L.) fue objeto de análisis en un aula universitaria de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, donde se evaluaron las concentraciones de NO_2 presentes en el aula, a partir del método de instalación de captadores pasivos, antes de la aplicación de la pintura y posteriormente a la misma (ver limitaciones de esta metodología en el [apartado 7.3.3](#)).

RESULTADOS

Los resultados presentados anteriormente confirman un efecto positivo de mejora de la calidad del aire en el aula, tras la aplicación de la pintura fotocatalítica.

La concentración de NO_2 disminuyó tras la aplicación de la pintura, en el rango comprendido entre el 9,4% y el 37,5%, según los análisis estadísticos realizados.

Se observó un patrón estacional en la actividad de eliminación de la contaminación interior, observando mayores niveles de abatimiento de NO_2 en periodos del año donde se produjeron temperaturas más altas y menores humedades relativas.

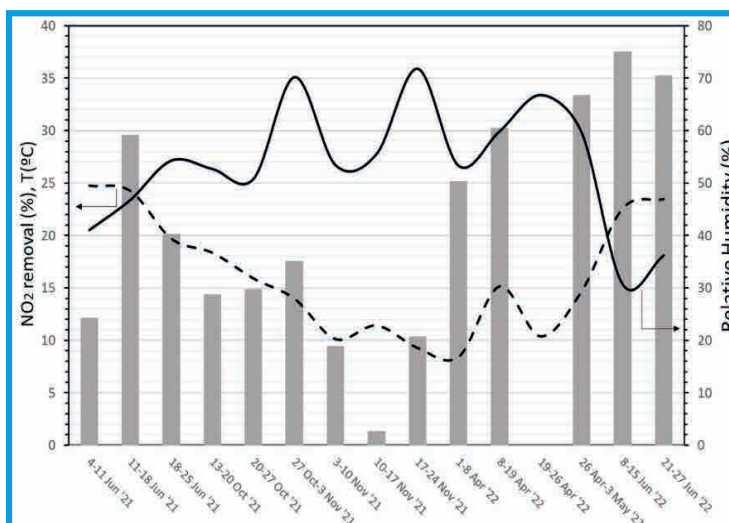


Figura 118: Porcentajes de reducción de concentraciones de NO_2 (diagrama de barras, eje izquierdo), obtenido a partir de captadores pasivos. Temperatura media semanal (curva de puntos discontinua, eje izquierdo) y humedad relativa (Curva continua, eje derecho). Fuente: Nieto-Márquez y col. 2023.

A pesar de que los porcentajes de reducción de la contaminación interior obtenidos no son lo suficientemente altos como para hablar de una solución única y definitiva, esta tecnología debe ser considerada como una medida a tener en cuenta, con mucho potencial y recorrido de mejora, que podría combinarse con otras medidas complementarias para tener unas aulas libres de contaminación.

Para sacar conclusiones más avanzadas, se recomienda que este caso de estudio sea escalado y muestreado a mayor nivel en distintas localizaciones y escenarios.

El documento completo está disponible en el siguiente link de descarga: <https://www.fotocatalisis.org/wp-content/uploads/2023/07/1-s2.0-S1309104223001812-main.pdf>.

8.4.3 SANIDAD

8.4.3.1 FRENTE AL VIRUS SARS-COV-2. COVID-19 (MADRID)

Ver apartado 4.6.2, donde se trata con detalle esta temática.

8.4.3.2 FRENTE AL HUMO DEL TABACO (GALICIA)

Se trata de un proyecto de investigación, promovido y coordinado por la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis entre los años 2021 y 2022, y cofinanciado, tanto por el equipo de neumólogos participantes como por la AIF, como por Levenger Nanotecnología.

El grupo de trabajo que desarrolló el proyecto estuvo constituido por los doctores Marcos García Rueda (*Unidad de Tabaquismo. Servicio de Neumología. Hospital Regional Universitario de Málaga*), Carlos Rábade Castedo (*Unidad de Tabaquismo. Servicio de Neumología. Hospital Clínico Universitario Santiago de Compostela*) y Carlos A. Jiménez-Ruiz (*Unidad Especializada en Tabaquismo. Hospital Clínico San Carlos. Madrid y presidente de la Sociedad Española de Neumología y Cirugía Torácica, SEPAR*), por David Almazán (*presidente de AIF y director técnico adjunto de Eptisa*), y por Jirko Bezdic (*director gerente de Levenger Nanotecnología*).

OBJETO

El objetivo de la investigación se centraba en la evaluación del porcentaje de abatimiento de la concentración de algunas sustancias tóxicas de los ambientes cerrados, contaminados por humo de tabaco, mediante la utilización de un equipo portátil de purificación del aire, en forma de placa de espuma cerámica fotocatalítica, tipo ACEAIR (en adelante, PPFCA), en relación con la disminución o eliminación de algunos de los componentes de humo del tabaco en un entorno cerrado y controlado.



Figura 119: Placa PPFCA. Fuente: AIF y Levenger.

EXPERIMENTOS: RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se llevaron a cabo dos experimentos en una habitación de fumador doméstico: En el primero, se encendió un cigarrillo en una habitación cerrada en ausencia de

ventilación, donde posteriormente se activó la placa fotocatalítica. Se calculó la concentración de partículas ($PM_{2,5}$, PM_1 y PM_{10}), compuestos orgánicos volátiles (COV) y formaldehídos, antes, y a los 15 minutos y a las 24 horas de la activación de la PPFCA. En un día posterior, se realizaron las mismas determinaciones en condiciones similares, pero en ausencia de la PPFCA.

En el segundo experimento, se encendió un primer cigarrillo y se continuó encendiendo un nuevo cigarrillo cada hora, durante 8 horas consecutivas, con el objeto de simular una situación más habitual en la vida cotidiana, en espacios reservados a fumadores. Durante el proceso, se midieron los mismos contaminantes con y sin placa fotocatalítica.

En relación a los resultados obtenidos, se destaca que se produjeron reducciones promedio, de cada uno de los componentes tóxicos analizados con la utilización de la PPFCA, que oscilaron entre un 34 y un 63%, dependiendo del experimento y el instante en que se realizó la medida.

Componente	Mejora (%)
PM 2,5	61,66
PM 1	62,98
PM 10	59,69
Formaldehído	42,60
COV	41,84

Figura 120: Resultados promedios de mejora de la calidad del aire interior, obtenidos en el experimento 1, tras 8 horas de funcionamiento de la placa fotocatalítica. Fuente: M. García Rueda, C. Rábade Castedo, C.A. Jiménez-Ruiz.

Componente	Mejora (%)
PM 2,5	51,90
PM 1,0	43,76
PM 10	47,75
Formaldehído	34,50
COV	35,27

Figura 121: Resultados promedios de mejora de la calidad del aire interior, obtenidos en el experimento 2, entre las 8 y 16 horas de funcionamiento de la placa fotocatalítica. Fuente: M. García Rueda, C. Rábade Castedo, C.A. Jiménez-Ruiz.

Como conclusión, se pudo constatar que la utilización de la PPFCA sirvió para reducir una parte de las concentraciones de las sustancias tóxicas analizadas, pero no fue capaz de provocar la completa eliminación de las mismas.

El documento completo está disponible en el siguiente link de descarga: <https://www.fotocatalisis.org/eficacia-de-una-placa-fotocatalitica-en-la-exposicion-al-humo-del-tabaco-en-ambientes-cerrados/>

8.4.3.3 FRENTE A CONTAMINACIÓN MICROBIANA (MADRID)

INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

Las consultas de podología son centros sanitarios clínico-asistenciales destinados a la prevención y tratamiento de todas las alteraciones del pie, donde se abordan problemas diversos relativos a la biomecánica, la cirugía y también la dermatología de piel y uñas del pie.

En concreto, y dentro de esta última especialidad, las enfermedades fúngicas y bacterianas están a la orden del día, siendo las primeras, las que con mayor presencia aparecen en los pacientes, en forma de onicomycosis y/o dermatomycosis. Dentro de ellas, las onicomycosis son la patología más prevalente, presentándose en 1 de cada 4 pacientes con alteraciones ungueales crónicas, bien como infección primaria, o bien, como infección oportunista (seguida de otra alteración primaria que debilita la uña del paciente).

El tratamiento de estas patologías fúngicas infecciosas pasa por su abordaje farmacológico y físico/mecánico. En este sentido, es imprescindible realizar un pulido mensual de la placa ungueal afectada para conseguir eliminar mediante abrasión, la mayor superficie ungueal afectada por el hongo para dejar que la uña nueva crezca sin infección y, además, para adelgazar lo máximo posible a la uña infectada, para que el fármaco tópico en cuestión, pueda penetrarla hasta alcanzar el lecho ungueal, que es donde frecuentemente anida el hongo.

Este proceso de pulido y desbastado de la uña se realiza mediante micromotores incorporados al propio sillón de podología y durante el proceso se generan contaminantes en forma de bioaerosoles, donde los microorganismos viajan por el ambiente sobre las partículas de queratina volátiles. Estas partículas en suspensión y aerosoles biológicos están compuestos por:

- Queratina o hidrolizados de queratina.
- Hongos y artrosporas fúngicas.
- Filamentos y otros residuos microbianos y restos celulares.

Los hongos filamentosos son los más comunes; emiten esporas que se diseminan por el aire y, por lo tanto, el profesional está expuesto a ellos, mediante la inhalación, la vía oral, la transcutánea y la ocular.

El uso de mascarillas no protege del todo al podólogo, pues el 86% de las partículas de polvo tienen entre 0,8 y un 1,6 μm de diámetro y los bioaerosoles contaminados que viajan en ellas, entre 0,1 y 100 μm de diámetro, mientras que las mascarillas N95 tienen microporos de 8 μm de diámetro, por lo que todas las partículas menores, son capaces de atravesar esa barrera protectora.

Las partículas podrían alcanzar los bronquiolos y alveolos pulmonares pudiendo producir:

- Rinitis.
- Asma.
- Tos productiva.

El uso de mascarillas N95 sólo previene entre un 40 - 56% de las VRI por aerosoles en ambientes sanitarios de riesgo.

OBJETIVO

Evaluar la influencia de los equipos de purificación del aire por fotocatálisis, en la disminución de la contaminación microbiológica ambiental del entorno asistencial, como mecanismo de prevención del riesgo de exposición del podólogo a patógenos exógenos y endógenos.

ÁMBITO DE INTERVENCIÓN

El estudio experimental se desarrolló en una Clínica Pododinámica® especializada en podología deportiva, biomecánica y quiropodología de Madrid.

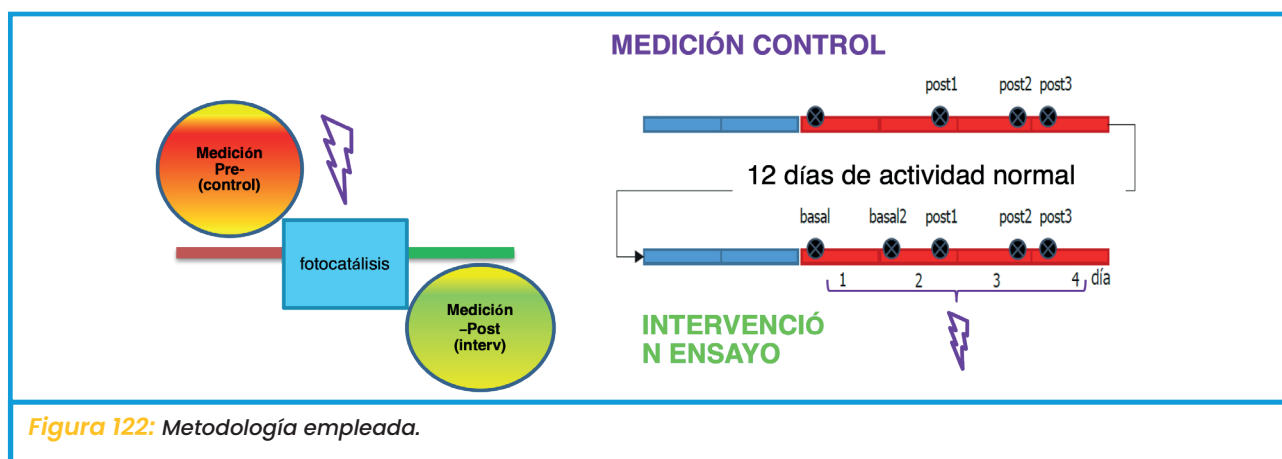
Para la intervención se seleccionó un área clínica predispuesta, debido a los procedimientos empleados para la actividad asistencial, a un riesgo crítico de contaminación del ambiente por la producción de bioaerosoles.

El área de la intervención mantuvo, exceptuando los periodos de inactividad programados, una actividad asistencial normal y continuada. La limpieza y desinfección del área fue la habitual después de cada asistencia sanitaria y al finalizar el día. Entre los periodos de asistencia sanitaria o en los periodos de inactividad programados, el área se precintó para evitar contaminaciones desde el exterior.

La capacidad del área de la intervención fue de 37,87 m³; superficie de 14,29 m², altura de 2,65 m.

DISEÑO DEL ESTUDIO

Consistió en el muestreo del aire del área de la intervención antes (intervención control) y después (intervención de ensayo) de la instalación de un equipo de purificación del aire por fotocatálisis, para valorar el impacto del sistema en el patrón de contaminación microbiológica del ambiente. Ambas intervenciones estuvieron precedidas por dos días de inactividad y separadas por un periodo de 14 días (5 días de actividad asistencial normal, 2 días de cese de actividad y 5 días adicionales de actividad asistencial) ([ver figura 122](#)).



INSTRUMENTACIÓN

Se usó un equipo ventilador fotocatalítico con un catalizador impregnado en dióxido de titanio, unos emisores LED de luz ultravioleta (UVA) de 365 nm y 12 W de iluminación y un ventilador que atraía un flujo de aire (contaminado), y otro ventilador que lo expulsaba tras de sí (descontaminado). La calidad del aire fue medida con un equipo M Air T (Merck-Millipore®) y las muestras, en el laboratorio de Microbiología de la Universidad Complutense de Madrid.

RESULTADOS

Los recuentos de bacterias y hongos determinados durante la intervención control y de ensayo y los cambios en la contaminación a lo largo de la intervención con respecto a la contaminación basal, se describen resumidamente en la tabla siguiente.

Como se puede apreciar en las tablas, las unidades formadoras de colonias (UFC) de bacterias sin la intervención de fotocatalisis, aumentaron, de 30 a 60, mientras que bajaron de 166 a 32 con la intervención de la fotocatalisis.

Los hongos filamentosos son los más comunes; emiten esporas que se diseminan por el aire y, por lo tanto, el profesional está expuesto a ellos...

Tabla 16

SIN FOTOCATÁLISIS Recuento (UFC/m³ y Log UFC/m³) de bacterias y hongos en la intervención control y cambio en la contaminación ambiental (CCA, en Log UFC/m³)						
	Bacterias			Hongos		
Muestra	UFC/m ³	Log UFC/m ³	CCA	UFC/m ³	Log UFC/m ³	CCA
Basal	30	1,48		8	0,90	
Post 1	98	1,99	0,51	8	0,90	0,00
Post 2	456	2,66	1,18	8	0,90	0,00
Post 3	60	1,78	0,30	6	0,78	-0,12
CON FOTOCATÁLISIS Recuento (UFC/m³ y Log UFC/m³) de bacterias y hongos en la intervención de ensayo y cambio en la contaminación ambiental (CCA, en Log UFC/m³)						
	Bacterias			Hongos		
Muestra	UFC/m ³	Log UFC/m ³	CCA	UFC/m ³	Log UFC/m ³	CCA
Basal	166	2,22		44	1,64	
Basal 2	68	1,83	-0,39	14	1,15	-0,50
Post 1	102	2,01	-0,21	10	1,00	-0,64
Post 2	92	1,96	-0,26	4	0,60	-1,04
Post 3	32	1,51	-0,71	2	0,30	-1,34

Los datos con las UFC en lo que a hongos se refiere, son menos significativos, pues el tiempo de cultivo es mucho mayor, y no se realizó un análisis tan largo, aún así, sin fotocatálisis, se mantuvo bastante estable, con 8 UFC, mientras que con la fotocatálisis se redujo de 44 a 2 UFC.

CONCLUSIONES

- El uso del dispositivo de fotocatálisis disminuye significativamente la presencia de bacterias en un 80% y de hongos en un 95% en el ambiente clínico podológico.
- El propio efecto de la descontaminación natural del ambiente es un factor potenciador del efecto de la fotocatálisis que hay que tener en cuenta en futuros estudios con una mayor muestra de clínicas de estudio y en más intervenciones.
- Limitaciones: poco tamaño muestral; poco tiempo de incubación de las muestras.

APLICABILIDAD CLÍNICA Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las bacterias pueden viajar hasta 4m en el aire y permanecer hasta 10h en suspensión.

Sin embargo, en los quirófanos de cirugía ambulatoria de las clínicas de podología, no se exige por ley ningún sistema de purificación del aire.

Teniendo en cuenta que la **infección** es la mayor causa de incidencia en el fracaso de la cirugía del pie y que esta es una cirugía abierta considerada “sucia”, dado que, por ejemplo, la cirugía ungueal tiene entre un 6-18,9% de tasa de infección postquirúrgica, podemos afirmar que la fotocatálisis podría ser una herramienta útil y válida como método efectivo preventivo de la infección en las consultas de podología donde se realice cirugía ambulatoria.

Futuros estudios con mayor tamaño muestral y mayor tiempo de incubación de las muestras recogidas, podrían ofrecer datos aún más claros sobre la efectividad de la fotocatálisis, no solo para las consultas donde se realicen tratamientos ungueales, sino también en la actividad quirúrgica.

Asimismo, se pueden desarrollar otros estudios donde la acción fotocatalítica esté en la pintura de las paredes de la habitación a analizar y no sólo en una zona donde se necesite un aparato fotocatalítico.

El informe completo de este caso de éxito está disponible en el siguiente link de descarga: <https://www.fotocatalisis.org/impacto-de-los-equipos-de-purificacion-del-aire-por-fotocatalisis-en-la-disminucion-del-riesgo-de-contaminacion-microbiana-en-el-entorno-asistencial/>.



8.5 INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS FOTOCATALÍTICAS

En el contexto del Grupo de trabajo GT-06 de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, cuya finalidad es la identificación de necesidades de mejora en la captación de energía eléctrica en huertos solares, mediante la incorporación de materiales fotocatalíticos, se ha llevado a cabo el siguiente caso de estudio.

OBJETIVOS:



1. Incentivar el impulso de la investigación.



2. Identificar demandas del mercado, en términos de mejoras en la captación de energía solar, para su transformación en energía eléctrica.



3. Estimular nuevos desarrollos de materiales fotocatalíticos y/o mejoras en los mismos, aprovechando su capacidad autolimpiante.

ENTIDADES PARTICIPANTES EN EL GRUPO DE TRABAJO:

- Ecooo Energía Ciudadana (Coordinador)
- Biorisk
- Laborat
- Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis
- Asociación Ibérica de la Fotocatálisis
- Eptisa, Servicios de Ingeniería, SL

CONTEXTO

Las dos instalaciones fotovoltaicas están ubicadas en la cubierta de unas naves industriales en Loeches (Madrid), con las mismas características técnicas entre ellas.

Cada planta dispone de dos inversores, con una producción también muy similar, sobre las que se realizarán las siguientes actividades:

- Habrá una planta de referencia, HSU71, que sólo será objeto de limpieza convencional, es decir, sin aplicación de tratamiento fotocatalítico, sobre un total de 148,50 m².
- Habrá una segunda planta, HSU66, tratada fotocatalíticamente sobre un total de otros 148,50 m².

De esta forma se aplicará el producto al conjunto de módulos que conectan a los dos inversores de cada planta, con el fin de analizar y comparar la diferencia de producción entre las instalaciones.

Cada planta consta de 3 bancadas de 30 módulos fotovoltaicos cada una, disponiéndose en 3 filas de 10 paneles, haciendo un total de 90 módulos por instalación.

Los paneles se fijan a estructuras trianguladas de aluminio con un ángulo aproximado de 30° sobre la horizontal y con orientación sur. A su vez, estos triángulos están anclados a paneles metálicos de acero galvanizado con relieves trapezoidales de la cubierta.

APLICACIÓN

En una primera fase se realizó la limpieza de las plantas objeto de estudio.



Figura 123: Ejemplo de estado de conservación de panel fotovoltaico, antes de la limpieza. Fuente: Biorisk.

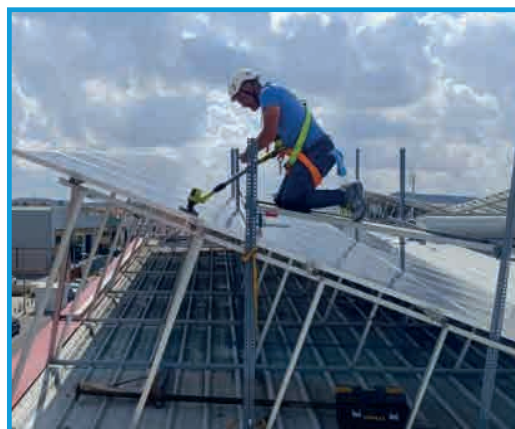


Figura 124: Estado final, tras la aplicación con tratamiento fotocatalítico. Fuente: Biorisk.



Figura 125: Limpieza de paneles fotovoltaicos. Fuente: Biorisk.

Una vez seca la superficie, tras la limpieza, se aplicó un producto fotocatalítico, producido por Photocat, con capacidad autolimpiable, que permite la degradación de la materia orgánica que se deposita en las superficies fotovoltaicas, facilitando su eliminación. Esta materia disgregada y degradada es arrastrada por el agua de la lluvia o por aportes de agua exterior, de mantenimiento, dejando la superficie activa libre de esta suciedad. Dentro de esta llamada suciedad, se encuentran los excrementos de aves, líquenes, hongos y mohos que se depositan en las superficies fotovoltaicas deteriorándolas.



RESULTADOS

Todos los elementos aplicados están monitorizados, de manera que se conoce en tiempo real la producción de energía eléctrica, de cada módulo.

Hasta la fecha no se dispone de resultados, pues la aplicación se llevó a cabo unos días antes de la publicación de este documento.



9 CRITERIOS DE DISEÑO Y APLICACIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS

En la literatura científica se encuentran múltiples contribuciones, analizando el efecto que tienen sobre el rendimiento fotocatalítico en laboratorio variables como: caudal de aire contaminado, concentración inicial de contaminante, humedad relativa, intensidad de radiación, exposición, longitud de onda de la radiación, concentración de catalizador en el material de construcción, tamaño de partícula, fase cristalina, zona geográfica, tipo de sustrato sobre el que se aplica, etc. (Ballari y col. 2010).

El rendimiento de la tecnología fotocatalítica aplicada sobre infraestructuras puede verse afectado por factores medioambientales como la intensidad de la radiación incidente, humedad relativa, temperatura y viento, pero también depende de otros factores intrínsecos del fotocatalizador cuando está asociado a un soporte existente, como su porosidad, el tipo y tamaño de los áridos o carga mineral que lo componen, el método de aplicación, la dotación aplicada, el grado de adherencia al soporte y la resistencia al envejecimiento (Shen y col. 2012).

9.1 DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES. EMISIÓN E INMISIÓN

- Se define como **emisión** de un contaminante, la cantidad emitida desde una fuente contaminante en un tiempo definido, expresándose en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o partes por millón (ppm).
- Se define como **inmisión**, la cantidad de contaminante que alcanza un punto determinado tras su transporte y difusión en la atmósfera. Los valores de inmisión de un lugar determinado dependen de sus características: condiciones atmosféricas, localización geográfica, características topográficas, etc.

Los estudios de **dispersión de contaminantes** y su impacto ambiental se realizan mediante programas de cálculo, capaces de modelizar de forma representativa los procesos de emisión e inmisión, en función del tiempo y el espacio.

Los modelos son una vía de evaluación local, regional y global del impacto de una fuente contaminante, y se consideran instrumentos válidos para planificar y adoptar medidas paliativas. Mediante estos modelos, se localizan las zonas que sufren un mayor impacto de la contaminación atmosférica.

Por lo que respecta a fuentes móviles, los métodos para estimar la concentración de los contaminantes que generan, se basan en el conocimiento de los vientos imperantes y la estabilidad atmosférica, ya que dicha concentración es directamente proporcional al número de fuentes emisoras, pero inversamente a la velocidad del viento. Por otra parte, la permanencia de los contaminantes depende de diferentes factores, como los mencionados vientos, las lluvias y la reactividad química del contaminante, entre otros. El conocimiento a día de hoy de los factores físicos y químicos que determinan el transporte, la dispersión, la transformación y la deposición de los contaminantes es limitado, puesto que dependen de un gran número de variables que no pueden ser cubiertos en su totalidad por los modelos.

En entornos urbanos es importante tener en cuenta, a la hora de realizar estimaciones de dispersión de contaminantes, los tipos de vía y sus características: amplitud, pendiente, carriles utilizados, velocidades permitidas, puntos de parada de vehículos, combustibles empleados, dispositivos reductores de emisiones, estado técnico de los vehículos, etc.

En resumen, la dispersión de los contaminantes emitidos por diferentes fuentes móviles puede ser modelizada mediante métodos complejos de computación. Algunos de ellos son de acceso libre, como los de la *Environmental Protection Agency* americana, que han sido mejorados en sucesivas versiones, como por ejemplo las CALINE 2, CALINE 3, CAL3QHC, CAL3QHCR y CALINE 4.

9.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DINÁMICA DE DISPERSIÓN

9.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS EMISIONES

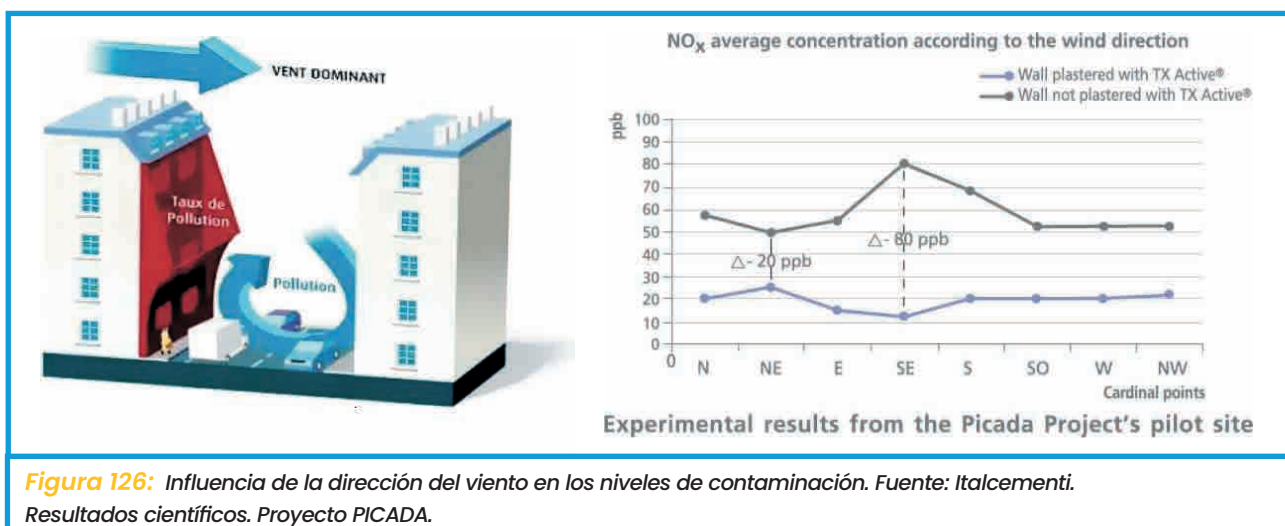
- **Naturaleza del contaminante:** Los gases permanecen durante períodos de tiempo más largos en la atmósfera que los sólidos o los líquidos, que tienden a precipitar.
- **Temperatura de emisión:** Para el caso de gases contaminantes, la temperatura de la fuente determina su comportamiento en la atmósfera. Así, si son emitidos a mayor temperatura que la ambiente, tenderán a ascender favoreciéndose su dispersión. Si su temperatura es menor, se acumularán en las capas bajas de la atmósfera.

- **Velocidad de salida:** Cuanto mayor sea la velocidad a la que es emitido el contaminante, tenderá a ascender más rápido. En caso de inversión térmica, con mayor velocidad la probabilidad de atravesar la capa se invierte y por tanto, su facilidad de dispersión será mayor.
- **Altura de la fuente:** Si la fuente se encuentra a mayor altitud, los contaminantes se dispersarán más fácilmente.

9.2.2 CONDICIONES ATMOSFÉRICAS

Como se ha indicado anteriormente, la dispersión de los contaminantes depende en gran medida de las condiciones atmosféricas, siendo los factores más importantes los siguientes:

- **Temperatura de aire y su variación con la altitud:** El gradiente térmico vertical. En los casos (la mayoría) en que la temperatura disminuye con la altitud, los contaminantes ascenderán con el aire y se irán diluyendo hasta alcanzar la estratosfera donde se dispersarán totalmente, debido a los vientos en altura. Si no se dan estas corrientes de aire, los contaminantes se dispersarán más difícilmente. En el extremo, en zonas de inversión térmica, donde la temperatura aumenta con la altitud, los contaminantes se quedan en las capas bajas de la atmósfera. Los anticiclones, con pocos vientos, gran estabilidad atmosférica y mayor probabilidad de inversión térmica, favorecen esta última situación.
- **Velocidad del viento:** Determina la rapidez con la que se dispersan los contaminantes.
- **Dirección del viento:** Determina las zonas hacia las que se desplazan los contaminantes.



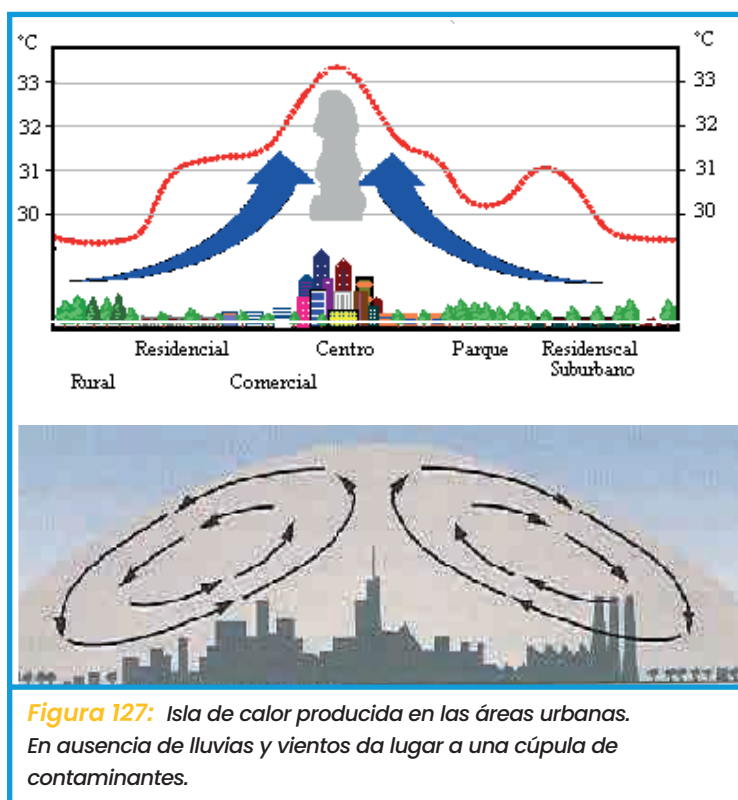
- **Dirección del viento:** Determina el área hacia donde se pueden desplazar los contaminantes emitidos.
- **Precipitaciones:** Tienen un efecto positivo en la eliminación de los contaminantes atmosféricos, arrastrándolos al suelo y “lavando” la atmósfera. Las bajas precipitaciones impiden este lavado y favorecen la resuspensión de los contaminantes depositados por el tráfico rodado y otras fuentes de emisión.
- **Insolación:** La luz solar inicia reacciones fotoquímicas que generan contaminantes secundarios. En verano, la elevada insolación y las situaciones anticiclónicas favorecen la formación de aerosoles (p. ej. de sulfato y nitrato), NO_2 y ozono y su permanencia en la troposfera. Por este motivo, a igualdad de emisiones, el tráfico u otras fuentes de emisión, producen una mayor contaminación atmosférica en zonas del sur de Europa frente al centro y al norte.

9.2.3 CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS Y GEOGRÁFICAS

Como se indicó anteriormente, la situación geográfica de una localización y su relieve, influyen en los vientos que provocan la dispersión o la acumulación de contaminantes.

Por otra parte, las masas vegetales disminuyen la contaminación del aire, puesto que al oponerse a la velocidad del viento favorecen su deposición en el suelo.

Por lo que respecta a la topografía, esta puede favorecer la inversión térmica, bien por la presencia de montañas en zonas costeras que dificulten la acción de los vientos marinos, o bien por la existencia de valles profundos con poca insolación en invierno.



- **Islas de calor:** Las grandes urbes producen calor, no solo por las propias actividades que lo generan, sino también por la presencia de materiales (ladrillo, asfalto, cemento...) que lo retienen en mayor medida que el suelo y la vegetación. Por otra parte, generan contaminación cuya dispersión por el viento se dificulta por las construcciones que frenan los vientos. El nombre de “islas de calor” deriva del hecho de que en las ciudades se suelen registrar varios grados más de

temperatura que en las afueras. Por este motivo, el aire urbano asciende y es sustituido por aire de la periferia, donde suelen estar las industrias contaminantes, que a su vez se desplazará hacia la ciudad donde se calentará y continuará el ciclo (**Ver figura 127**). A falta de vientos fuertes y lluvias, este ciclo dificulta enormemente la dispersión de los contaminantes, dando lugar a las cúpulas de contaminación que suelen lucir las grandes ciudades (**Ver figura 127**).

- **Brisa montaña-valle:** En zonas montañosas se suele dar este tipo de brisa. Las laderas de las montañas se calientan durante el día, provocando una corriente de aire hacia arriba, mientras que en el valle sin insolación se acumula el aire frío, originándose una inversión térmica que dificulta la dispersión de contaminantes, como se ha explicado anteriormente. Durante la noche se acentúa esta inversión al descender el aire frío por la ladera.
- **Brisa marina:** En zonas de costa se producen brisas que, durante el día, al calentarse más la tierra que el mar, llevan aire marino al interior llevándose la contaminación, mientras que de noche se da la situación contraria. Esto favorece la dispersión de los contaminantes, pero al ser un fenómeno cíclico, éstos no se dispersan completamente.

La situación geográfica de una localización y su relieve, influyen en los vientos que provocan la dispersión o la acumulación de contaminantes

9.3 DURABILIDAD DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS

La durabilidad de los materiales fotocatalíticos depende de muchos factores.

En primer lugar, se han de considerar las condiciones geográficas, topográficas y ambientales del emplazamiento a tratar.

En segundo lugar, es importante tener en cuenta las características y el estado del soporte de aplicación, así como los ensayos de caracterización del material fotocatalítico ([ver apartados 9.4 del libro y el apéndice](#)).

En tercer lugar, debe considerarse el uso que se la va a dar. No es lo mismo un pavimento sometido a la abrasión del tráfico que una pintura de fachada o una cubierta no transitable, por citar algunos ejemplos.

En cuarto lugar, no debe olvidarse el cumplimiento de los propios procesos de aseguramiento de la calidad del fabricante, desde la fase de suministro del principio activo o fotocatalizador. Es decir, la calidad del fotocatalizador y la calidad del proceso de fabricación y aplicación es esencial. En este sentido, es importante destacar que las aplicaciones se deben realizar sobre soportes limpios y secos.

En quinto lugar, estaría la calidad en la aplicación y/o colocación del material fotocatalítico en obra, teniendo en cuenta las posibles limitaciones ambientales en el momento de la colocación, especialmente a nivel de temperatura y viento, dependiendo del material fotocatalítico a emplear. Por último, y no menos importante, estarían las operaciones de mantenimiento, sobre todo limpieza, y especialmente en pavimentos fotocatalíticos.

A continuación, se procede a describir brevemente algunos de estos factores, cuyo efecto tendría un considerable impacto en la durabilidad.

Adicionalmente, se recomienda la lectura del apartado de la guía de uso de materiales fotocatalíticos de este documento ([ver apartado 9.4 y el apéndice](#)).

9.3.1 LIMPIEZA DE PAVIMENTOS E IMPACTOS SOBRE E.D.A.R.

La aplicación de materiales fotocatalíticos en zonas urbanas es una tecnología que mejora la calidad del aire en áreas contaminadas, como se ha demostrado anteriormente.

La formación de nitratos originados en la reducción de la contaminación de óxidos de nitrógeno en aire, tanto en materiales con recubrimientos fotocatalíticos como en hormigones fotocatalíticos para infraestructuras urbanas, da lugar a concentraciones muy poco significativas. Estos valores representan concentraciones de nitratos en aguas prácticamente despreciables o apenas cuantificables a la hora de tratar los residuos acuosos de zonas urbanas en estaciones depuradoras de aguas residuales (E.D.A.R.).

A modo de ejemplo, si tenemos en cuenta la ciudad de Madrid (España), con una población de 3.332.035 personas (personas empadronadas según el INE de 2023), con un consumo de agua diario de 436.216 m³/día (usando 129 L/heq/día), y considerando una superficie fotocatalítica de 1.000.000 m², donde se aplicaría el proceso fotocatalítico estudiado de la reducción de la concentración de óxidos de nitrógeno en aire, se podrían llegar a formar en torno a 0,06 g/m² de nitrato de superficie (valor que depende obviamente del material fotocatalítico utilizado). Este dato de nitratos superficiales podría dar lugar a una concentración de nitratos en agua de 0,13 mg/L al lavar completamente con agua la superficie fotocatalítica considerada, la cual es despreciable si tenemos en cuenta que el límite para consumo humano de nitratos es de 50 mg/L ([Real Decreto 902/2018, de 20 de julio y Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first addendum, 4th ed + 1st add WHO; 2017](#)). (Datos suministrados por el Laboratorio de Análisis y Ensayos de la Fundación CARTIF).

No obstante, los materiales fotocatalíticos para infraestructuras urbanas, basados en dióxido de titanio como catalizador, pueden llegar a adsorber superficialmente nitratos formados en la eliminación de los NO_x, lo cual podría provocar, en el caso de exposiciones muy prolongadas, un cierto grado de nitrificación en su superficie con la consiguiente pérdida parcial o total de su actividad fotocatalítica a lo largo del tiempo. A la pérdida de la actividad de un catalizador heterogéneo se le denomina comúnmente desactivación del catalizador y su posible regeneración, para recuperar de nuevo sus propiedades catalíticas, depende en gran medida del tipo de mecanismo que originó esta pérdida de actividad. En primer lugar, si la desactivación del catalizador ha tenido lugar por fouling o ensuciamiento de la superficie del fotocatalizador, éste podría ser regenerado *in situ* mediante lavados periódicos con agua o desengrasantes, recuperando de nuevo sus propiedades fotocatalíticas. Sin embargo, cuando el material fotocatalítico es sometido a altas concentraciones de óxidos de nitrógeno, durante periodos muy prolongados de tiempo en ausencia de lluvias, podría llegar a tener lugar un fenómeno químico que diese lugar a una pérdida permanente de sus propiedades fotocatalíticas (Richarson 1989). En estas condiciones, se adsorberían concentraciones tan altas de nitratos que podrían provocar una serie de reacciones químicas con la consiguiente formación de nitratos de titanio muy estables, originando un fenómeno de desactivación química permanente del material fotocatalítico que difícilmente podría ser regenerado para recuperar de nuevo sus propiedades fotocatalíticas. Para evitar este fenómeno de desactivación química permanente, muy perjudicial en los materiales fotocatalíticos de infraestructuras urbanas, sería necesario que se produjeran episodios de precipitaciones atmosféricas con cierta regularidad, y en caso de que esto no ocurriera, establecer un [protocolo de lavados periódicos y controlados](#), que evitasen la adsorción prolongada de elevadas concentraciones de nitratos, eliminando de este modo parte o todos los nitratos adsorbidos en su superficie con las aguas de lavado. (Recomendable al menos mensualmente, salvo que se produzcan episodios de lluvia con cierta regularidad).

No obstante, y de acuerdo con la bibliográfica científica y distintos análisis realizados en laboratorios de control de calidad, según la norma ISO 22197-1:2007, se obtienen diferencias significativas en el rendimiento fotocatalítico de eliminación de NO_x, según se trate de un recubrimiento fotocatalítico tipo emulsión o de una lechada fotocatalítica percolada para infraestructuras urbanas.

9.3.2 INFLUENCIA DE LA HUMEDAD RELATIVA

Al contrario de lo que se pensaba hace años, se observa que los rendimientos o porcentajes de eliminación de óxidos de nitrógeno pueden variar significativamente con la humedad relativa de la zona de aplicación, lo que determina la considerable influencia de este parámetro en la reducción final de NO_x para los materiales fotocatalíticos.

Una de las muchas conclusiones extraídas del Proyecto LIFE MINOX STREET es que, para garantizar el mayor rendimiento de los materiales fotocatalíticos, se recomienda que estos se apliquen en zonas geográficas que tengan unos valores de humedad relativa comprendidos entre 20% y 90%.

9.3.3 ABRASIÓN SUPERFICIAL (SOLO PARA PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS)

Los pavimentos fotocatalíticos pueden contribuir a reducir la contaminación, debida al tráfico rodado, al situarse cerca de la fuente contaminante y al tener una gran superficie de contacto con el aire contaminado. Sin embargo, también debido a su emplazamiento, sufren un estrés mecánico a causa del tráfico y una erosión por las condiciones meteorológicas que pueden derivar en la liberación ([ver apartados 11.14 y 12.2](#)) y la pérdida del fotocatalizador. Por ello, los estudios de viabilidad de estos materiales deben incluir todo su ciclo de vida.

Estos estudios se han realizado en varios proyectos, pero quizá el Proyecto LIFE PHOTOSCALING y recientes casos de estudio ([ver apartados 8.1.6.2 y 8.2.1](#)), sean unos de los que más han incidido en analizar esta cuestión. Los resultados obtenidos dependen de varios factores, aunque quizá los más influyentes sean la capacidad de adherencia al soporte y la resistencia a la abrasión del tráfico de cada producto. ([Se recomienda la lectura del apartado 8.1.5](#)).

9.3.4 LUZ

La luz es un componente esencial del proceso fotocatalítico, puesto que activa el fotocatalizador. En ausencia de luz, por tanto, el proceso simplemente no se da. La longitud de

onda y, por tanto, la energía de la luz que puede activar el proceso, depende de las características del fotocatalizador. El más habitual, TiO_2 , se activa con luz en la región del ultravioleta A (UV-A), entre aproximadamente 320 y 400 nm de longitud de onda, que supone en torno al 5% de la luz solar que llega a la superficie terrestre. Por tanto, en exteriores, la luz solar es capaz de activar al TiO_2 para el proceso fotocatalítico. Sería deseable, por supuesto, utilizar en un porcentaje mayor la luz solar, por ello uno de los objetivos clásicos de la investigación en fotocatalisis es conseguir materiales que se activen con luz visible, más abundante en la radiación solar que nos llega.

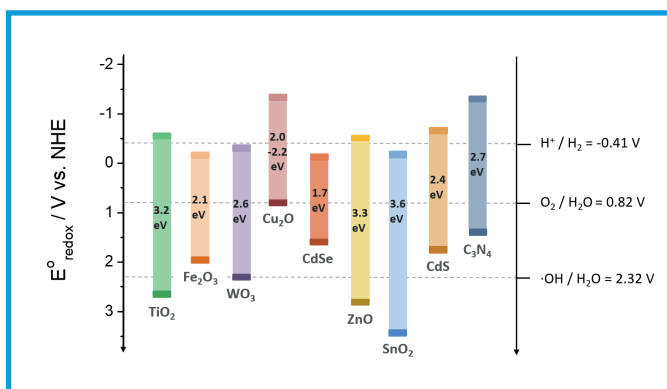


Figura 128: Potenciales redox a pH 7 frente al electrodo normal de hidrógeno de las bandas de valencia (inferior) y de conducción (superior) de algunos semiconductores potencialmente utilizables como fotocatalizadores, comparados con los de algunas semirreacciones relevantes. Los valores dentro de las barras coloreadas indican la anchura de banda prohibida (band gap) de cada material. Adaptada de Fresno y col., 2018.

En interiores, sin embargo, es necesario el uso de lámparas UV-A para activar el TiO_2 , puesto que la luz ultravioleta del Sol es filtrada por el vidrio de las ventanas y las lámparas de luz blanca habituales, que no emiten apenas luz UV. Hay que tener en cuenta, en este sentido, que debe evitarse el uso de radiaciones UV-B y UV-C que, por una parte, son nocivas para la salud y, por otra, son innecesarias para activar el proceso fotocatalítico.

En aplicaciones interiores sería especialmente importante disponer de fotocatalizadores activos bajo luz visible. A nivel de investigación, se realizan ensayos en este sentido utilizando materiales alternativos al TiO_2 (p. ej. óxido de wolframio, WO_3), o bien modificando éste mediante dopaje o combinación con otros materiales o sustancias que amplíen su espectro de actividad.

Para más información, se recomienda la lectura del [apartado 8.4](#).

9.3.5 COLOR

Los materiales de construcción con propiedades fotocatalíticas mantienen su actividad cuando se aditivan pigmentos de color, aunque los mejores resultados normalmente



Figura 129: Algunos ejemplos de gamas cromáticas de productos fotocatalíticos.



se obtienen con colores claros, o incluso incoloros. Los colorantes empleados en la formulación deben ser pigmentos inorgánicos para evitar la propia degradación de la molécula orgánica y la pérdida de su capacidad colorante debido a la actividad fotocatalítica.

9.3.6 HERRAMIENTAS DE AYUDA A LA SELECCIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS

En la actualidad hay algunas herramientas informáticas, actualmente en fase experimental y de acceso libre, que podrían emplearse para estimar la capacidad que podría tener un determinado material fotocatalítico. Este documento ha identificado dos, una asociada a textiles fotocatalíticos (<http://photocitytex.eu/>) y otra a pavimentos (PhotoScaling Decision Maker: <https://www.life-photoscaling.eu>). Para el empleo de esta última es necesario la realización de una batería de ensayos previos, de caracterización del material (**ver apartado 8.1.5**).

En cualquier caso, se recomienda que el potencial comprador de materiales fotocatalíticos solicite los pertinentes Certificados de Calidad de Producto, según los estándares ISO citados en este documento (en función de la aplicación) y el Certificado de Eficiencia Fotocatalítica que expide la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, como primer paso (**ver apartado 10.1**).

También se presenta en este libro, distintos protocolos que se han llevado a cabo en proyectos a escala real, como referencia (**ver apartados 8.1.6 y 8.2**).

Los materiales de construcción con propiedades fotocatalíticas mantienen su actividad cuando se aditivan pigmentos de color, aunque los mejores resultados normalmente se obtienen con colores claros, o incluso incoloros

9.4 GUÍA DE USO DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS – FOTOAIR

INTRODUCCIÓN

Esta guía recoge las conclusiones finales que la Unidad de Análisis y Tratamiento Fotocatalítico de Contaminantes en Aire (FOTOAir) del CIEMAT ha alcanzado después de realizar más de 418 análisis de las eficiencias fotocatalíticas obtenidas según norma ISO de un total de 26 materiales existentes en el mercado.

Un acuerdo de confidencialidad, firmado entre los empresarios suministradores de los materiales fotocatalíticos y los componentes del equipo de investigación del proyecto Life MINOX-Street, en el que se sustenta esta investigación, impide identificar por su nombre o fabricante los materiales ensayados.

OBJETIVOS

El proyecto se enmarca en la Estrategia Temática sobre la Contaminación Atmosférica de la UE, cuyo propósito es la protección de la salud pública a través del cumplimiento de objetivos de calidad del aire, limitando la concentración de determinados contaminantes.

El proyecto LIFE MINOX-STREET se ha dirigido a la reducción de óxidos de nitrógeno (NOx) en la atmósfera como principales contaminantes asociados al tráfico rodado.

Así, el proyecto ha desarrollado numerosas acciones destinadas fundamentalmente a demostrar las posibilidades reales de aplicación de los materiales fotocatalíticos en entornos urbanos.

Esta guía resume las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto por el Grupo FOTOAir del CIEMAT y se presenta a las Administraciones públicas responsables de la gestión de la calidad del aire, y al público en general, con el objetivo de establecer pautas útiles de cara a la implementación de materiales fotocatalíticos como coadyuvantes para la reducción de la contaminación atmosférica en el entorno urbano.

La Figura 127 muestra un esquema que representa la eliminación fotocatalítica de NOx mediante el uso de materiales

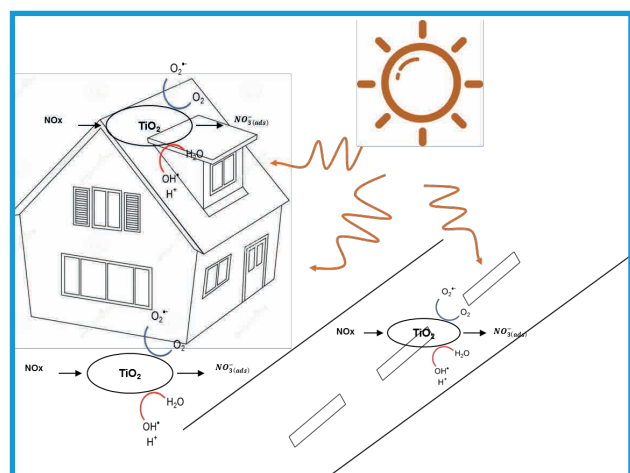


Figura 130: Eliminación fotocatalítica de NOx mediante el uso de materiales fotocatalíticos en diferentes emplazamientos. Fuente: Fotoair.

fotocatalíticos. Una revisión más profunda de los principios y fundamentos básicos que sustentan la fotocatálisis se puede leer en español en el libro editado por el CIEMAT (Blesa, 2004).

1. Selección del emplazamiento

Uno de los parámetros básicos para que la fotocatálisis funcione de la manera más eficiente posible es la relación superficie/volumen. Resulta prioritario potenciar que esta relación sea lo más alta posible. Así pues, es recomendable implementar los materiales fotocatalíticos en tejados y cubiertas de edificios, así como en calles relativamente “estrechas” con fachadas “altas”, intentando que no se vea por ello comprometida en exceso la cantidad de luz que reciben las superficies tratadas.

1.1. Sustrato

Durante el proyecto se ha trabajado con tres tipos de sustratos urbanos: asfaltos, pavimentos de acera y fachadas.

Una de las conclusiones principales del proyecto ha sido que la elección del sustrato es un factor determinante en la potencial reducción de óxidos de nitrógeno por productos fotocatalíticos. Por ello, se recomienda la realización de ensayos sobre los sustratos a seleccionar antes de decidir su aplicación sobre el producto final.

La aplicación de productos fotocatalíticos sobre cada uno de ellos tiene ventajas, inconvenientes y consideraciones especiales que deben tenerse en cuenta y que se pasan a relatar.

1.1.1. Asfaltos

En general, los asfaltos utilizados en las carreteras españolas pueden ser mezclas bituminosas abiertas (por ejemplo BBTM 11B) o cerradas (por ejemplo AC 16 S). Los ensayos realizados a lo largo del proyecto han revelado que el rendimiento fotocatalítico para la eliminación de óxidos de nitrógeno es mayor si el producto se deposita sobre mezclas cerradas. También se ha demostrado que se obtienen mejores resultados si se aplica el producto sobre asfaltos envejecidos (zonas por las que ya se haya producido tránsito de vehículos). Además, conviene realizar una limpieza a conciencia de la zona (con agua y desengrasantes comerciales) antes de aplicar el producto fotocatalítico, para mejorar de esa manera la adherencia de este al sustrato. A lo largo del proyecto se ha determinado que el tráfico rodado puede producir el arrastre del material y, consecuentemente, reducir la actividad fotocatalítica. Sin embargo, se ha demostrado que este efecto no es tan influyente como la deposición de grasas, partículas y suciedad, procedentes de los vehículos a motor. Algunos productos han demostrado que pueden conservar actividad fotocatalítica después de 20 meses desde su aplicación.

Por último, es necesario tener en cuenta que los productos fotocatalíticos pueden modificar las propiedades del material soporte, por lo que es necesario asegurar que no se producen pérdidas de las propiedades físico-mecánicas exigidas para su uso.

Por este motivo, se hace necesario ensayar estos aspectos con el fin de asegurar que el material soporte sigue cumpliendo, tras la aplicación del producto fotocatalítico, las normas específicas para su aplicación. Estos ensayos pueden llevarse a cabo en el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

1.1.2. Pavimentos de acera

A lo largo del proyecto se han ensayado hasta 9 sustratos de acera diferentes: baldosas, loseta, adoquines negro y rojo, terrazos blanco y rojo, cemento gris y hormigones.

Tras analizar todas ellas, se determinó que los sustratos con mayor porosidad eran los más adecuados para la aplicación de productos fotocatalíticos. El aumento de la porosidad tiene como consecuencia un incremento de la superficie específica del sustrato. Así, el producto aplicado sobre una mayor superficie específica tendrá más centros activos disponibles para que se den las reacciones por las cuales se mineralizan los NOx presentes en el aire ambiente.

A la vista de los resultados obtenidos, resultó más adecuada la selección de mezclas cementosas u hormigones para la aplicación de productos fotocatalíticos, en detrimento de baldosas o adoquines.

Al igual que para las mezclas asfálticas, se hace necesario asegurar que no se producen pérdidas de las propiedades físico-mecánicas exigidas para el uso de los pavimentos de acera.

1.1.3. Fachadas

El principal sustrato de fachada utilizado en España es el ladrillo. De esta manera, gran parte de los ensayos realizados en laboratorio para fachadas se han llevado a cabo utilizando el ladrillo como soporte. Además, 14 de los 25 productos ensayados durante el proyecto estaban destinados a su aplicación sobre fachadas.

Esta superficie presenta claras ventajas sobre las asfálticas y de acera, ya que en ella no se produce desgaste por el tránsito de vehículos y personas. Además, las fachadas tienden a ensuciarse en menor medida que las superficies pisables.

Lamentablemente, los resultados obtenidos a partir de los materiales fotocatalíticos ensayados para fachadas presentaron una menor durabilidad que los preparados para asfaltos y aceras.

Este hecho puede deberse a la falta de rugosidad de este tipo de materiales, que tiene como consecuencia una peor adherencia del producto sobre el sustrato y, por lo tanto, una menor eficiencia fotocatalítica.

Así pues, para obtener actividad de los productos fotocatalíticos estudiados sobre fachadas, es necesario implementarlos en sustratos más rugosos que el ladrillo, como son el hormigón o el cemento.

1.2. Condiciones ambientales

La climatología de la zona en la que se pretenda implementar los productos fotocatalíticos es otro de los factores a tener en cuenta a la hora de seleccionar un emplazamiento.

En las zonas muy ventosas, se hace difícil que se produzcan episodios de contaminación importantes, ya que predomina el efecto de dispersión de los contaminantes.

Resulta evidente que la presencia de luz solar es uno de los parámetros clave para el óptimo desarrollo de los procesos de eliminación fotocatalítica de NOx. Los ensayos en laboratorio han revelado que no es necesaria una gran irradiancia para obtener un rendimiento óptimo (a partir de 10 W m^{-2} el rendimiento es máximo, aunque aumente la irradiancia). A efectos prácticos, se debe buscar un emplazamiento que tenga las máximas horas de luz diarias y tener en cuenta que los productos fotocatalíticos pueden seguir funcionando con actividades aceptables aún con la presencia de nubes.

En cuanto al grado de humedad, en general se ha observado que los productos fotocatalíticos tienen mejor rendimiento con bajos porcentajes de humedad relativa y presentan su máximo de actividad entre el 40% y el 50%.

En cuanto a la concentración de NOx en la zona, se ha demostrado que no es un factor dominante en lo que a la actividad fotocatalítica significa. En términos prácticos, los gestores de los municipios ubicados en lugares con humedad relativa elevada, han de tener en cuenta este parámetro para la selección de un producto fotocatalítico adecuado a las condiciones en las que debe operar (materiales hidrófobos, entre otros).

2. Selección del producto fotocatalítico

Entre los productos fotocatalíticos comerciales estudiados, existe una gran variabilidad en las eficiencias de reducción fotocatalítica de NOx. Esta es una de las principales conclusiones del proyecto Life MINOx-Street.

La ausencia de una norma común para determinar la actividad fotocatalítica de los productos presentes en el mercado a día de hoy, hace difícil la elección al usuario final.

Por este motivo, urge la adopción de sistemas de control oficiales que garanticen los datos ofrecidos en el etiquetado de los productos.

Hasta que estos sistemas de gestión queden establecidos, los usuarios finales de los productos fotocatalíticos deberán acudir a laboratorios especializados en la realización de ensayos normalizados y reproducibles, como el grupo Fotoair de CIEMAT.

Los laboratorios especializados deberán acreditar si el producto que se desea implementar posee un aceptable rendimiento fotocatalítico para la reducción de NO_x, una durabilidad máxima y una elevada capacidad de regeneración tras lavado.

2.1. Evaluación de la actividad fotocatalítica inicial

Se debe evaluar el potencial de eliminación de NO_x de los materiales comerciales mediante ensayos estandarizados (norma ISO 22197-1:2007 y UNE-ISO 22197-1:2012) o similares, con el fin de poder comparar claramente las capacidades fotocatalíticas de los diferentes productos.

Desde el grupo FOTOAir-Ciemat se ha propuesto una clasificación de los materiales en función de su actividad fotocatalítica inicial. La clasificación se describe en la tabla siguiente:

Tabla 17
Clasificación propuesta para la actividad fotocatalítica inicial de materiales evaluados según norma ISO

Clasificación	NO _x (μmol)	XNO _x (%)
A	> 10	> 25
B	5 < B < 10	12,5 < B < 25
C	0,5 < C < 5	1,2 < C < 12,5

Resulta deseable que la capacidad de eliminación mostrada por el producto sea lo más alta posible (tipo A).

2.2. Durabilidad de los materiales

La durabilidad de los materiales es un parámetro clave a la hora de implementarlos en condiciones reales. Los ensayos de envejecimiento en intemperie, realizados en el marco del proyecto, han resultado muy útiles para establecer la resistencia a las condiciones de intemperie de diversos materiales. Sin embargo, estos ensayos requieren grandes periodos de tiempo para evaluar la evolución de la actividad fotocatalítica con el tiempo. Desde el grupo FOTOAir-Ciemat se propone un procedimiento alternativo, que podría evaluar la durabilidad de los materiales en cuestión de 2 días.

Este procedimiento consistiría en la saturación acelerada de los materiales en reactor y en presencia de NO. Se pretende evaluar el tiempo que tarda un material en dejar de



eliminar NO_x cuando es sometido a las condiciones establecidas en la norma ISO (salvo la concentración de NO inicial). Basándonos en ensayos previos, se recomienda una concentración inicial de en torno a 7 ppm, con el objetivo de acelerar el proceso. Así, el ensayo puede llevarse a cabo en un rango de entre 5 y 15 horas, según el material.

Por tanto, cuanto mayor sea el tiempo que tarde el material en saturarse, mayor será la durabilidad del material.

2.3. Capacidad de regeneración

Como se ha establecido en las conclusiones del proyecto, la pérdida de actividad fotocatalítica debida a la acumulación de nitratos en la superficie fotoactiva, procedentes de las reacciones de fotooxidación de NO_x, puede revertirse mediante lavado con agua de lluvia o procesos de baldeo.

El último factor a evaluar sería el grado de recuperación que se puede alcanzar tras la desactivación total del material y posterior lavado. El ensayo consistiría en realizar un lavado de 15 minutos con agua destilada de la muestra saturada anteriormente en reactor. El tiempo se ha establecido en relación a los ensayos de regeneración realizados en el marco del proyecto. Así, el material que muestre una mayor conversión de NO_x tras lavado, será el que regenere sus capacidades de eliminación de NO_x en mayor proporción tras los procedimientos de lavado establecidos.

3. Aplicación y mantenimiento

Una correcta aplicación de los productos fotocatalíticos y un mantenimiento periódico de las zonas fotocatalíticas son imprescindibles para el correcto funcionamiento de los mismos.

3.1. Aplicación

Sea cual sea la superficie sobre la que se van a implementar los productos fotocatalíticos, esta debe encontrarse limpia antes de la aplicación de los mismos. Se debe llevar a cabo, pues, una limpieza concienzuda de la zona, utilizando para ello agua y desengrasantes comerciales. Este proceso asegurará la correcta adherencia del producto al sustrato.

En cuanto al método de aplicación, en muchas ocasiones es el fabricante el que recomienda el que más favorece a las especificaciones de su producto. Asimismo, conviene tener en cuenta la posibilidad de que el fabricante/suministrador únicamente asegure los resultados del producto si es él mismo quien se encarga de su aplicación, en cuyo caso será necesario prever los aspectos logísticos y los costes asociados a esta elección. En cualquier caso, debe asegurarse que el producto se aplique con la máxima homogeneidad posible, ya que es un factor determinante en la actividad fotocatalítica. A efectos prácticos, una aplicación con rodillo resulta más eficaz que la aplicación mediante spray.

Ciertos productos requieren de un proceso de activación previa, como un simple lavado con agua que promueve sus propiedades fotocatalíticas. Este proceso elimina de su superficie restos del proceso de síntesis que inhiben su capacidad descontaminante. Por ese motivo, es recomendable la realización de un lavado de la superficie cuando el producto se encuentre totalmente seco.

Por último, cabe mencionar la importancia de no reabrir el tramo implementado al tránsito normal (de peatones o de vehículos para aceras y asfaltos) hasta que el producto se encuentre totalmente seco.

3.2. Mantenimiento

Una de las principales conclusiones del proyecto ha sido que, en condiciones de exposición a intemperie, los materiales muestran una reducción de sus capacidades fotocatalíticas. Este decaimiento en la actividad se ha relacionado con la acumulación de nitratos en la superficie del material y con la deposición de materia orgánica (hollín, partículas, suciedad...). La acumulación de nitratos en superficie es el resultado de las propias reacciones de mineralización del contaminante, que tienen como subproducto final los óxidos de nitrógeno.

Tras los estudios de regeneración realizados en el marco del proyecto, se puede concluir que los lavados con agua y desengrasantes comerciales son un método efectivo para la eliminación tanto de los nitratos como de la materia orgánica acumulada.

Así pues, las tareas de baldeo de calles y aceras realizadas habitualmente por los ayuntamientos y lavado producido por el agua de lluvia de manera natural son métodos más que suficientes para la regeneración de los materiales fotocatalíticos. No obstante, conviene tener en cuenta que los baldeos realizados con barredora pueden resultar un método demasiado abrasivo, lo que puede traducirse en una pérdida de material fotocatalítico, por lo que se recomienda no utilizar estas barredoras en las zonas implementadas con productos fotocatalíticos.

Además de las tareas de lavado, resulta necesario realizar un seguimiento del rendimiento a lo largo del tiempo mediante un sistema de medidas *in situ* de la actividad fotocatalítica, con el fin de conocer cómo evoluciona la capacidad de reducción de NOx del material y establecer cuándo es necesario reaplicar el producto. Las normas de estandarización seguidas en este proyecto han requerido unas dimensiones de las probetas determinadas lo que ha influido en la actividad fotocatalítica final de las mismas. Se recomienda evitar el corte de las probetas de forma posterior a su implementación en escenario real para alterar lo menos posible la superficie fotoactiva. De acuerdo con lo indicado en el apartado de durabilidad, será necesario tener prevista la necesidad de reaplicar el producto en el momento en que, conforme a lo identificado en el seguimiento de la evolución de su rendimiento fotocatalítico, éste se encuentre por debajo del nivel que se considere aceptable.

10 AVANCES EN FOTOCATÁLISIS EN ESPAÑA DURANTE EL SIGLO XXI

En el tercio final del siglo XX, la fotocatálisis era una tecnología prácticamente desconocida en gran parte del mundo y, por supuesto, en Europa. Solo Japón, gracias al gran crecimiento económico vivido entre los años 60 y 80 (conocido como el “Milagro Japonés”), pudo desarrollar ampliamente esta tecnología y aplicarla con carácter general a sus infraestructuras. El profesor y Dr. Akira Fujishima (expresidente de la prestigiosa Universidad de Ciencias de Tokio y actual director del Centro Internacional de Investigación de Fotocatálisis), es a día de hoy el máximo exponente científico-técnico del sector de la fotocatálisis.



Figura 131: Dr. Akira Fujishima, director del Centro Internacional de Fotocatálisis en Tokio, y el presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, David Almazán, en un Congreso de Fotocatálisis celebrado en Copenhague en abril de 2018. Fuente: AIF.

A principios del siglo XXI la fotocatálisis se comenzó a desarrollar en Europa, pero no fue hasta la primera década del año 2000 cuando se comenzaron con las primeras aplicaciones. El caso más destacado es el de Italia, que contaba por decenas sus aplicaciones en construcción durante esos primeros años. Posteriormente, otros países como Alemania, Francia, España y Dinamarca tomaron la iniciativa. Especial mención merece España que durante la década del 2010 ha llevado a cabo numerosos proyectos de investigación, cuyo objetivo fue aumentar el conocimiento en las condiciones de aplicación de la tecnología fotocatalítica, así como establecer protocolos de medida de su eficiencia. España y resto de países del sur de Europa, por su gran cantidad de horas de radiación solar, se sitúan como los países del mundo con mayor potencial de aplicación de estas tecnologías.

Sin embargo, el desconocimiento de esta tecnología, por parte de numerosas Administraciones públicas y privadas, la ausencia de protocolos de actuación y medición de su eficiencia, el intrusismo de empresas fraudulentas que comercializan productos fotocatalíticos sin realmente serlo, y el coste de estos nuevos materiales, hacían que el mercado no estuviera suficientemente maduro en la actualidad.

Sin embargo, la llegada de la pandemia COVID-19, en 2020, estableció un punto de inflexión, que invirtió la tendencia de la demanda de materiales fotocatalíticos en multitud de sectores y que, consecuentemente, ha despertado el interés de los mercados. Esta circunstancia ha permitido desarrollar y probar a escala real ininidad multitud de materiales con éxito, tal y como se deduce de los casos de éxito recogidos en este volumen, permitiendo establecer protocolos de diseño, aplicación y medición, también incluidos en este documento ([ver capítulo 8 y apéndice](#)).



Figura 132: Iglesia Dives in Misericordia. Roma (Italia), construida con elementos prefabricados de hormigón blanco con cemento fotocatalítico de Heidelberg Cement Group y cuyo arquitecto fue Richard Meier.

A continuación, se describen brevemente algunos de los logros que se han llevado a cabo en materia de fotocatalisis en los últimos años.

10.1 CERTIFICADO DE EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA

Entre los años 2011 y 2013, Eptisa, Servicios de Ingeniería, con financiación del CDTi, desarrolló el primer prototipo multiensayo de evaluación de la eficiencia fotocatalítica de productos, en cuanto a sus prestaciones de abatimiento de NOx se refiere. Este prototipo permitía realizar ensayos tanto con la Normativa ISO 22197-1, como con la Norma UNI 11247:2010, aunque también se desarrolló una metodología de ensayo *in situ*, que evitaba la extracción de testigos de la superficie descontaminante.

Para la realización de las pruebas de verificación del equipo multiensayo se realizaron ensayos interlaboratorios, en una primera fase de comprobación de resultados. Y en una segunda fase, se hizo un llamamiento al mercado para evaluar la eficiencia descontaminante de productos, por las Normas ISO y UNI antes mencionadas.

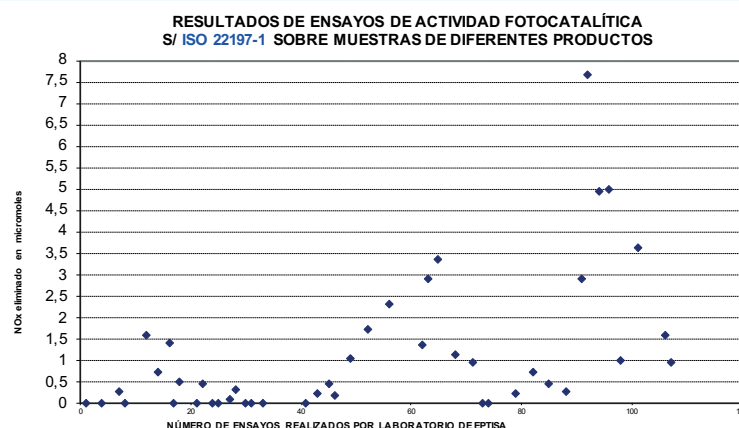


Figura 133: Resultados de ensayos realizados por EPTISA durante los años 2011 y 2013, con la Norma ISO 22197-1.

Con la Norma ISO se realizaron más de 50 ensayos durante los años 2011 y 2013. Los resultados obtenidos fueron muy heterogéneos y en esos años no había un umbral de aceptación, a partir del cual se considerase que un producto era fotocatalítico en el mercado español. Por ello se acudió a adoptar los umbrales aceptados en Japón. En este país un producto tenía la consideración de fotocatalítico, en cuanto a abatimiento de óxidos de nitrógeno se refiere, en cuando el ensayo demostraba un abatimiento de 0,5 micromoles.

De los resultados obtenidos se pudo concluir que, prácticamente la mitad de los productos comerciales ensayados en el mercado, no tenían actividad fotocatalítica, y sin embargo se vendían como tal. Por cautela, todos aquellos ensayos que sugerían una actividad fotocatalítica inferior a 0,5 micromoles eran repetidos nuevamente en laboratorio. Si bien, los resultados no fueron distintos.

De la misma manera que se hizo con la Norma ISO, se hizo con la Norma UNI. En este caso la unidad resultante son porcentajes de NO_x eliminados. Igualmente, los resultados obtenidos fueron muy heterogéneos, pues estaban comprendidos en el rango 0% a 48% de reducciones de NO_x.

En esta ocasión no existía un umbral de aceptación, a partir del cual se puede clasificar un producto como fotocatalítico o no.

En esos años comenzaban las primeras demandas de nuevos materiales fotocatalíticos en el sector de la construcción y, con ello, la mejora en la eficiencia descontaminante de los productos

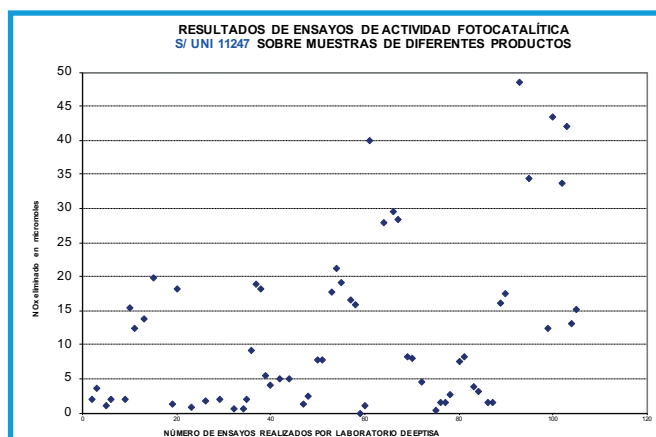


Figura 134: Resultados de ensayos realizados por EPTISA durante los años 2011 y 2013, con la Norma UNI 11247.

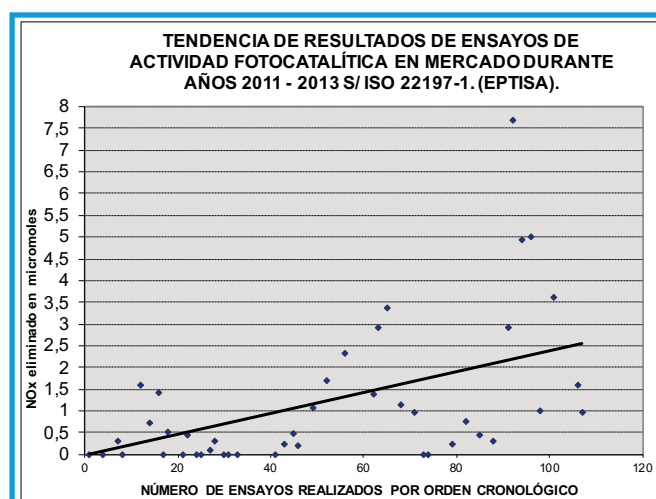


Figura 135: Tendencia de mejora de eficiencia de materiales fotocatalíticos entre los años 2011 y 2013, según la Norma ISO. Fuente: Laboratorio de EPTISA.

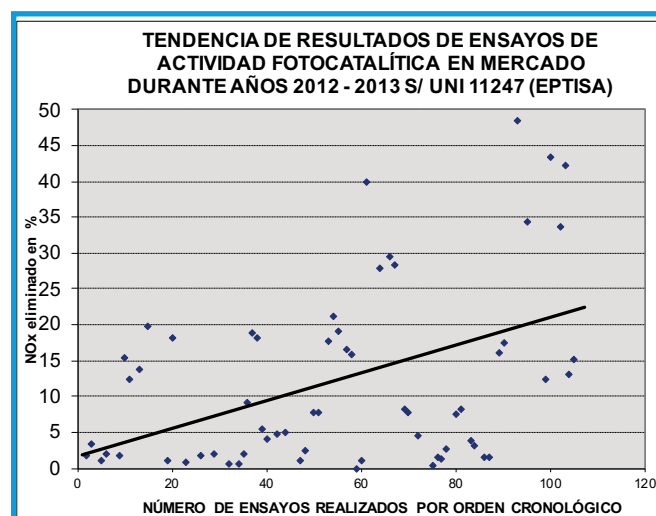


Figura 136: Tendencia de mejora de eficiencia de materiales fotocatalíticos entre los años 2011 y 2013, según la Norma UNI. Fuente: Laboratorio de EPTISA.

ensayados. En este sentido, los resultados obtenidos por el laboratorio de Eptisa se ordenaron cronológicamente, tanto los realizados con la Norma ISO como con la Norma UNI, donde se pudo demostrar una clara tendencia en la mejora de materiales fotocatalíticos.

A partir de este estudio, donde quedó de manifiesto la circulación de productos fraudulentos en el mercado, la AIF empezó a trabajar, en colaboración con la Federación Europea de Fotocatálisis (en adelante, EPF), en la elaboración de un certificado que diera más información al cliente final del producto que se adquiría y que de manera indirecta permitiera regular el mercado, eliminando los productos fraudulentos.

La complejidad de crear una metodología europea común para otorgar Certificados de Eficiencia Fotocatalítica de materiales, debido a la gran diversidad de productos, a las distintas culturas que poseen los países que componen la EPF y al distinto grado de avance de la tecnología fotocatalítica en cada mercado, ha propiciado que cada país miembro de la EPF diseñe y otorgue su propio certificado de producto.



Figura 137: Imagen de prototipo multiensayo.
Fuente: Eptisa.

DEFINICIÓN DE PROTOCOLO DE ARTICULACIÓN DE CERTIFICADO EN LA AIF

El Certificado de Producto Fotocatalítico se otorgará, por parte de AIF, en las siguientes condiciones:



1. Sólo se otorgará a socios fabricantes y distribuidores de AIF, ya que su ingreso en la citada institución está condicionado a demostrar científicamente la eficiencia fotocatalítica de su producto.



2. Se otorgará por producto y no por empresa y se anexará el ensayo que certifique la eficiencia fotocatalítica del mismo. Si este ensayo tuviera una antigüedad superior a un año, será un responsable autorizado de esta empresa quien emita un certificado que garantice que, tanto la formulación del producto fotocatalítico como la calidad del producto final fabricado, mediante proceso industrial, bajo las condiciones de la Norma estandarizada que avale su capacidad fotocatalítica (UNI, ISO o CPF de acuerdo al mercado CE, etc.), no ha variado con respecto al año de realización del ensayo. Este certificado se anexará al que expida AIF. En el caso de que el ensayo tuviese una antigüedad superior a dos años, necesariamente la empresa deberá aportar un nuevo ensayo normalizado, para renovar el certificado.



Figura 138: Certificado de Eficiencia de Producto Fotocatalítico. Fuente: AIF.



3. En el caso de que un socio industrial incorpore un mismo revestimiento superficial fotocatalítico, testado por un laboratorio externo y revisado en su día por el comité científico-técnico de AIF, sobre distintos productos auxiliares o soportes, deberá emitir un documento (firmado por responsable autorizado) que certifique esa casuística, exponiendo que se ha comprobado científicamente que la aplicación de este único recubrimiento sobre distintos materiales auxiliares o soportes, no modifica su eficiencia fotocatalítica. Esta situación sería también de aplicación para todos aquellos socios que comercialicen recubrimientos fotocatalíticos de distintos colores.



4. En el caso de que un socio industrial utilice un mismo material fotocatalítico, testado por un laboratorio externo y revisado en su día por el comité científico-técnico de AIF, en distintos formatos, deberá emitir un certificado (firmado por responsable autorizado) que indique que las distintas versiones del producto utilizan el mismo material fotocatalítico que el ensayado.



5. Si en alguna ocasión se produjera alguna denuncia, por parte de algún cliente a AIF o a algunos de sus socios, que demostrara que un producto certificado como producto fotocatalítico por AIF, bajo las normas establecidas por AIF, no coincidiera con lo expuesto en el certificado de garantía expedido por el responsable autorizado de la compañía involucrada, se realizará un ensayo de comprobación, preferiblemente en uno de los laboratorios de AIF, y posteriormente se revisará por el comité científico de AIF. Si el resultado es favorable, se comunicará a ambas partes. Si el resultado es desfavorable, se anulará el certificado del producto y se decidirán las acciones a llevar a cabo, respecto al socio en cuestión, mediante asamblea general.

10.2 ISLA FOTOCATALÍTICA

En el año 2012, la Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo (EMVS) del Ayuntamiento de Madrid, en colaboración con AIF, iniciaba el proceso de conversión del Ecobarrio de la Rosilla (Madrid) en una Isla Fotocatalítica. Además de perseguir los efectos descontaminantes (en activos urbanos) y autolimpiantes (en fachadas), también se implementaron otra batería de medidas encaminadas a la reducción de consumos energéticos, con carácter general.

El Ecobarrio de La Rosilla se enmarcaba en la iniciativa de la EMVS de programa piloto sobre barrios ecológicos que, junto a Plata y Castañar, San Francisco Javier, Nuestra Señora de los Ángeles, Los Olivos, El Lucero y el Barrio del Aeropuerto, expresaba la voluntad de aplicar criterios de sostenibilidad desde el primer momento de su diseño, ejecución, gestión y mantenimiento. El objetivo de la operación era convertir una superficie de 98.000 m² en 400 viviendas para más de 1.300 personas que conformen una “comunidad urbana sostenible”.

En lo que respecta a la Isla Fotocatalítica, se llevó a cabo la primera fase, fase de urbanización, donde el pavimento destinado al tráfico rodado fue fotocatalítico y el pavimento peatonal también.

Lamentablemente, debido a la fuerte crisis financiera y económica que azotó a Europa y sobremanera a España durante esos años, la segunda fase, la de edificación, no se llegó a llevar a cabo. Para esta segunda fase estaba previsto el diseño de envolventes de edificación fotocatalíticas, con objeto de completar la isla.



Figura 139: Imágenes que muestran el estado del barrio de La Rosilla (distrito de Vallecas, Madrid) antes y después de convertirlo en Ecobarrio. Fuentes: Ezquiaga Arquitectura y Eptisa.

Se trataba de experimentar un nuevo concepto de “microciudad” autónoma, energéticamente autosuficiente, que se sustente en una estrecha relación con el medio en que se sitúa, el empleo generalizado de tecnologías avanzadas y el establecimiento de un marco distinto de relaciones urbanas orientadas a favorecer su habitabilidad.

En cualquier caso, esta acción sentó las bases para futuras islas fotocatalíticas.

10.3 INCLUSIÓN EN PLIEGOS DE ADMINISTRACIONES PÚBLICAS

A principios de la década del 2010, el Ministerio de Medio Ambiente italiano publica un documento, “La calidad del aire en la escuela: Un deber de todos, un derecho de los niños”, donde en su capítulo 4 se toma como medida de mejora de la calidad del aire la tecnología fotocatalítica.

Unos años después, en la Jornada de Pavimentos y Edificios Descontaminantes y Autolimpiantes de octubre de 2014, organizada por AIF, D. Manuel Valdés, gerente de infraestructuras del Ayuntamiento de Barcelona, anunció la inclusión de los materiales fotocatalíticos en los pliegos de condiciones de proyectos y obras.

QUALITÀ DELL'ARIA NELLE SCUOLE: UN DOVERE DI TUTTI, UN DIRITTO DEI BAMBINI	
ALLEGATI	
	
4. Migliorare la qualità dell'aria utilizzando le vernici giuste: le vernici fotocatalitiche	
INDICE	
1. Principali inquinanti e allergeni indoor	3
a. Agenti biologici	8
b. Sostanze chimiche	8
c. Agenti fisici	18
2. Vivere con l'asma: alcuni consigli utili	21
a. A scuola	21
b. Fare sport	21
3. Migliorare la qualità dell'aria usando le piante	25
4. Migliorare la qualità dell'aria utilizzando le vernici giuste: le vernici fotocatalitiche	31
5. Prevenzione e gestione per l'ambiente	39

Figura 140: “La calidad del aire en la Escuela: Un deber de todos, una derecho de los niños”, reconoce el empleo de tecnología fotocatalítica como mejora de la calidad del aire. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente italiano.

Ese mismo año se incluye la tecnología fotocatalítica dentro de las *Instruccions Tècniques per a l'aplicació de criteris de sostenibilitat del Ajuntament de Barcelona* y, ya en el año 2018, se publica el documento de *Introducció de Criteris de Sostenibilitat en la Contractació*, que incluye la tecnología fotocatalítica dentro de la Guía de Contratación Pública Innovadora del mismo Ayuntamiento.



Figura 141: Portadas de documentos del Ayuntamiento de Barcelona, relacionados con los criterios de sostenibilidad puntuables en licitaciones de Proyectos y Obras, y una Guía de Contratación de Compra Pública Innovadora, donde se recogen los materiales fotocatalíticos.

En Abril de 2019 el Consejo Rector de la gerencia de Urbanismo, Obras e Infraestructuras del Ayuntamiento de Málaga, procedió a la aprobación de varias recomendaciones de empleo de materiales destinados a garantizar la sostenibilidad, durabilidad e innovación en obras promovidas por dicha gerencia.

Una de estas recomendaciones fue el empleo de pavimentos de asfalto percolado en firmes de viales, dentro de los cuales se incluyen las lechadas cementosas autopercolantes con actividad fotocatalítica.

Por otra parte, en la Jornada de Presentación de Conclusiones del Proyecto LIFE PHOTOSCALING (25 de junio de 2019. Madrid), el Ayuntamiento de Madrid, que fue invitado como ponente, anunció dos importantes medidas, que desde hace unos años se estaban materializando en aplicaciones fotocatalíticas a escala real, en la ciudad de Madrid:

- La inclusión de la fotocatálisis como criterio objetivo ambiental puntuable en las próximas licitaciones de obras de operaciones asfalto (renovaciones superficiales de pavimentos, que se realizan anualmente en Madrid).
- La actualización del pliego de condiciones de proyectos y obras del Ayuntamiento de Madrid, incluyendo las losas y adoquines hidráulicos fotocatalíticos (prefabricados de hormigón), en primera estancia y, posteriormente, los tratamientos superficiales a partir de microemulsiones fotocatalíticas.

Como resultado de estas medidas, en los últimos años, y tras la pandemia del COVID-19, el Ayuntamiento de Madrid ha establecido que el 30% de los pavimentos, sujetos a los contratos de “operación asfalto” de Madrid, sean fotocatalíticos.

Desde 2021, la fotocatálisis ha quedado incluida entre las tecnologías seleccionadas, dentro de los contratos de compra verde del Ayuntamiento de Alcobendas, donde además se establece, como requerimiento esencial para los subcontratistas, estar en posesión del Certificado de Eficiencia Fotocatalítica de Producto que otorga AIF (ver apartado 10.1). Y desde 2024 este mismo ayuntamiento se convierte en empresa colaboradora de AIF, promoviendo entre otros aspectos, que la totalidad de los pavimentos que se renueven sean fotocatalíticos. Por último, en 2024, el Congreso Nacional de Medioambiente, CONAMA, se postula como empresa colaboradora de AIF, aunque la relación entre ambas organizaciones se remonta a 2012.

10.4 GRUPO DE TRABAJO CON MINISTERIO DE TRANSPORTES

Dentro del Plan de Innovación para el Transporte y las Infraestructuras, 2017-2020, del anteriormente denominado Ministerio de Fomento, se incluyó la tecnología fotocatalítica. A tal fin, este Ministerio configuró un grupo de trabajo, con el objeto final de elaborar un manual de aplicación de las tecnologías fotocatalíticas en infraestructuras de transporte. El grupo de trabajo estaba compuesto por la Dirección General de Carreteras, CEDEX, Puertos del Estado, ADIF, INECO, CIEMAT, Fundación CARTIF, Eiffage Infraestructuras, Instituto Eduardo Torroja (CSIC) y la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (AIF).

Durante el primer semestre de 2018 se mantuvieron varias reuniones técnicas de gran utilidad, puesto que el grupo de trabajo estaba compuesto por representantes de diferentes ámbitos del sector de la construcción y con amplia experiencia en fotocatálisis, pero lamentablemente los condicionantes políticos de cambio de gobierno en junio de 2018, obligaron a suspender los trabajos.

No obstante, una buena parte de ese grupo de trabajo, liderado por la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, dio continuidad con carácter altruista a esta iniciativa, hasta convertirla en la primera edición de este documento.

En el máximo auge de incidencia de la pandemia del COVID-19, en el año 2020, el anteriormente denominado Ministerio de Transportes, Movilidad Sostenible y Agenda Urbana, retoma contacto con la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis para formar parte de un nuevo grupo de trabajo, coordinado por el CEDEX. El Ministerio promovió la aplicación piloto de tecnologías fotocatalíticas sobre varios activos del transporte, tales como cunetas revestidas de hormigón, elementos de contención y pavimentos en una autovía a escala real, la Autovía de los Llanos, a su paso por Albacete. Todos los detalles de este proyecto se han incluido en el [apartado 8.2.1](#) del presente documento.

Una vez finalizado este proyecto, en el año 2022, el Ministerio ha seguido colaborando con AIF, a nivel de diseminación y transferencia del conocimiento, en jornadas y congresos, a través del CEDEX.

Fruto de esa colaboración, en 2023, y a iniciativa del nuevo Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible, se volvió a crear un grupo de trabajo, con representantes del propio ministerio, del CEDEX, de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis (dependiente del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades) y de Eptisa, Servicios de Ingeniería, con objeto de redactar un documento de recomendaciones de uso de la tecnología fotocatalítica en infraestructuras del transporte.

10.5 APOYO INSTITUCIONAL

En el año 2021, coincidiendo con el X Aniversario de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis y aún en los albores de la pandemia de COVID-19, la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis contó, en su jornada online del mes de junio, con la presencia del Sr. Ministro de Ciencia, Innovación y Universidades, D. Pedro Duque, que tuvo a bien felicitar a la Asociación por el trabajo que está realizando, reconociendo las bondades de esta tecnología, tanto en espacios interiores como exteriores. (Para mayor detalle, se invita a visualizar el siguiente link: <https://www.youtube.com/watch?v=SwtlldebjaU>).

Por su parte, y a finales de ese mismo año, la secretaria de Estado del Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, D^a. Isabel Pardo de Vera Posada, participó en la Jornada Nacional de Fotocatálisis, en la su inauguración, donde además fue galardonada con el Premio X Aniversario de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, en reconocimiento a la Administración pública impulsora de las aplicaciones fotocatalíticas en activos del transporte. (Para mayor detalle, se invita a visualizar el siguiente link: <https://www.youtube.com/watch?v=OtNK3-gh6cl>).

En 2023, en el Congreso Nacional de Fotocatálisis se recibió el apoyo del presidente de la Asociación Madrid Capital Mundial de la Construcción (Madrid World Construction Capital - MWCC), promovida por la Comunidad de Madrid y el Ayuntamiento de Madrid. (Para mayor detalle, se invita a visualizar el siguiente link: <https://youtu.be/ICsqsVLapyU>).



Figura 142: Abajo a la izquierda, el ministro de Innovación y Ciencia, D. Pedro Duque, interviene en la Jornada X Aniversario AIF, reconociendo sus aportaciones a la sociedad. Arriba a la izquierda, la Secretaria de Estado del Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, D^a. Isabel Pardo de Vera Posada, recibe el premio X Aniversario AIF en reconocimiento de esta cartera al apoyo a la tecnología fotocatalítica. A la derecha, D. David Almazán, en la ceremonia de entrega de la Medalla de Honor de la Carretera, cuyo galardón fue entregado por D. Miguel Ángel Carrillo, presidente del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

También en el año 2023, la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis es adjudicataria de una partida presupuestaria, por parte del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, con el fin de crear y desarrollar la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, en una apuesta definitiva por este tipo de tecnologías, colaboradoras de la mejora de la calidad del aire en ambientes interiores y exteriores, la degradación de contaminantes en aguas y la generación de nuevas fuentes de energía. (<https://www.ptfotocatalisis.es/>).

Unos meses más tarde, en el año 2024, el presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, en su X aniversario como máximo representante de esta entidad sin ánimo de lucro, y de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, recibe uno de los más reconocidos galardones en el sector del Transporte, la Medalla de Honor de la Carretera. (Para mayor detalle, se invita a visualizar el siguiente link: https://www.youtube.com/watch?v=QRRvMCHj6U&embeds_referring_euri=https%3A%2F%2Fwww.fotocatalisis.org%2F&source_ve_path=MjM4NTE).

La Medalla de Honor de la Carretera es un galardón que propone la industria, y la Asociación Española de la Carretera (AEC), que otorga por toda una trayectoria profesional a personas que han sabido demostrar su capacidad técnica y su entusiasmo en el trabajo, haciendo suya la leyenda impresa en el dorso de las medallas: "Mejores carreteras para un mundo mejor". Se trata de unos premios propuestos por la industria viaria, que se celebran anualmente, y cuyo origen se remonta al año 1966. Esta convocatoria cumple su 75 aniversario.

El presidente de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (AIF) y director técnico adjunto de Eptisa, David Almazán, ha tenido el gran honor de convertirse, en 2024, en un miembro más del exclusivo grupo de galardonados que integran la historia de las medallas, por sus aportaciones al sector de la carretera desde las perspectivas de la ingeniería, la construcción, la consultoría, la docencia y la investigación, en sus casi 30 años de carrera profesional. El premio destaca entre sus méritos, sus aportaciones a la sostenibilidad y la innovación, con la promoción de la investigación y la aplicación de tecnologías fotocatalíticas a infraestructuras.

10.6 COLABORACIONES PÚBLICO-PRIVADAS

La pandemia del COVID-19, los Objetivos de Desarrollo Sostenible para 2030, establecidos por Naciones Unidas, y las nuevas políticas de sostenibilidad e innovación que demanda el mercado en la actualidad, han propiciado un espacio idóneo para la creación de colaboraciones público-privadas con un objetivo común: La mejora de las condiciones de habitabilidad, ya que estas pueden salvar vidas, prevenir enfermedades, mejorar la calidad de vida y colaborar en la mitigación del cambio climático.

Desde 2020, AIF ha participado en grupos de trabajos de colaboración público-privada a tal fin, como el promovido por el antiguamente denominado Ministerio de Transportes, Movilidad Sostenible y Agenda Urbana, en la autopista de los Llanos ([ver apartado 8.2.1](#)),



durante el periodo 2020-2022, o el impulsado por la Diputación Foral de Bizkaia, en la carretera periurbana, BI-637 (**ver apartado 8.2.2**), desarrollado entre los años 2021 y 2023, y que contó con Eptisa, como empresa adjudicataria.

La propia AIF en el periodo comprendido entre los años 2020 y 2022, fue la impulsora de varios grupos de trabajo en espacios interiores, dentro del contexto de colaboración público-privada, tales como la **evaluación de la mejora de la calidad del aire de una placa fotocatalítica en la exposición al humo del tabaco en ambientes cerrados**, y que contó con la participación de la Unidad de Tabaquismo del Servicio de Neumología del Hospital Regional Universitario de Málaga, con la Unidad de Tabaquismo del Servicio de Neumología del Hospital Clínico Universitario Santiago de Compostela y con la Unidad Especializada en Tabaquismo del Hospital Clínico San Carlos de Madrid, AIF y Levenger Nanotecnología, o la **determinación del impacto de los equipos de purificación del aire por fotocátalisis en la disminución del riesgo de contaminación microbiana en el entorno asistencial**, donde participó el Laboratorio de Microbiología del Departamento de Medicina de la Facultad de Medicina de la Universidad Complutense de Madrid, la Facultad de Enfermería, Podología y Fisioterapia de la Universidad Complutense de Madrid, la Empresa Investigación y Proyectos Microbiológicos S.L., AIF y Levenger Nanotecnología. (**Ver apartados 8.4.3.2 y 8.4.3.3**)

Tras la adjudicación de las ayudas del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, en 2023, la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, en colaboración con AIF, ha puesto en marcha varias iniciativas de colaboraciones público-privadas, que se pueden consultar en la web, <https://www.ptfotocatalisis.es/>.

10.7 TRANSFERENCIA DEL CONOCIMIENTO

Dentro de los objetivos que la AIF tiene encomendados en sus estatutos, se encuentran las tareas de difusión y transferencia del conocimiento.

Todos los avances en tecnología fotocatalítica y experiencias adquiridas en los últimos años, son periódicamente compartidas con la sociedad y la empresa, por AIF/PTF, a través de sus jornadas, congresos y talleres, que pueden ser visualizados libremente en la web <https://www.fotocatalisis.org>.

Adicionalmente, y desde 2021, AIF organiza un **Curso Práctico de Fotocatálisis: Fundamentos y Aplicaciones**, a nivel internacional, para interesados de habla hispana, que ya cuenta con más de IV ediciones. El curso se retransmite en directo, vía streaming. El cuadro docente está compuesto por doctores en fotocátalisis y especialistas en Nanociencia de la Administración pública, así como por empresas privadas fabricantes de materiales fotocatalíticos y centros tecnológicos.

Las buenas críticas cosechadas en ediciones anteriores permiten que, año tras año, se siga ofertando esta formación, al alcance de cualquier persona física o jurídica que esté interesada en esta tecnología.

10.8 GUÍA DE APLICACIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS EN ACTIVOS DEL TRANSPORTE

Fruto del trabajo y encuentros con diversas Administraciones públicas, centros de investigación y profesionales del sector, la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis ha redactado la guía de aplicación de materiales fotocatalíticos en activos del transporte, que se incluye en el apéndice de este libro.

Desde AIF, se desea agradecer a todo el sector público y privado interviniente por sus generosas aportaciones y se espera que, en los próximos años, con la vista puesta en la mejora de la habitabilidad sostenible de nuestras infraestructuras, este documento sea suscrito e integrado en sus licitaciones por las Administraciones públicas que así lo deseen.



11 PREGUNTAS FRECUENTES (FAQ)

11.1 ¿CÓMO INFLUYE LA FOTOCATÁLISIS EN LA RESISTENCIA MECÁNICA DE PAVIMENTOS?

Las experiencias llevadas a cabo por varios proyectos de investigación en los últimos años han demostrado que la influencia que tienen las aplicaciones fotocatalíticas en la resistencia mecánica de las mezclas bituminosas, las baldosas o adoquines prefabricados de hormigón, los hormigones o las piezas cerámicas es positiva. Es decir, el tratamiento fotocatalítico no sólo no tiene ningún tipo de afección sobre sus propiedades mecánicas, sino que las puede incluso llegar a mejorar sustancialmente. ([Ver apartado 8.1.4](#)).

En este sentido, un claro ejemplo serían las lechadas fotocatalíticas con base cemento, que se percolan sobre mezclas bituminosas drenantes, lo que confiere al pavimento un comportamiento semirrígido y mejor resistencia al derrame de hidrocarburos, a las deformaciones plásticas y a los fundentes en episodios de viabilidad invernal, que los pavimentos bituminosos convencionales.

Para mayor nivel de detalle se recomienda la lectura del apéndice de este volumen.

11.2 ¿CÓMO INFLUYE LA FOTOCATÁLISIS EN LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO DE PAVIMENTOS?

Este parámetro ha sido especialmente analizado en varios de los proyectos de investigación que se han llevado a cabo en pasadas décadas, y en recientes experiencias a escala real, por su posible influencia en la seguridad vial.

Concretamente en dos de los proyectos de investigación, el Proyecto LIFE MINOX STREET y la experiencia en el aeropuerto de Malpensa, Milán (Italia), (ambos recogidos

en el **apartado 8.1.7.1** de este documento), los resultados sugerían una ligera reducción (menor del 6% en el caso más desfavorable, tras 60 días de paso de tráfico) de la resistencia al deslizamiento en comparación con los pavimentos existentes antes de la aplicación del tratamiento fotocatalítico. En cualquier caso, de cara a interpretar estos resultados, merece la pena comentar que es importante conocer el tiempo que transcurrió entre la aplicación del tratamiento fotocatalítico y la medición del coeficiente de resistencia al deslizamiento en la realidad. Este parámetro es importante, porque en el sector de la pavimentación es habitual evaluar este indicador de adherencia entre neumático y pavimento, al cabo de al menos 60 días, desde la ejecución de cualquier tipo de tratamiento sobre la capa de rodadura, incluida la propia ejecución de la rodadura.

Sin embargo, en un tercer proyecto de investigación, el LIFE PHOTOSCALING, los resultados obtenidos, en este sentido, demostraban que los tratamientos superficiales fotocatalíticos incluso mejoraban este parámetro. Así lo explicó el Ayuntamiento de Madrid en la Jornada de Presentación de Conclusiones del Proyecto LIFE PHOTOSCALING del 25 de junio de 2019 (vídeo jornada: <https://www.life-photoscaling.eu/>), donde los resultados obtenidos, a nivel de macrotextura y resistencia al deslizamiento, mejoraban ambos parámetros, con respecto a los existentes, tras la aplicación a escala real de un tratamiento superficial a partir de microemulsiones. Es importante destacar que esta conclusión no tiene por qué ser extrapolable a todo tipo de aplicaciones en pavimentos, ya que lo que se testaba en este caso era un único material en unas determinadas condiciones.

Es más, pudiera ser que este parámetro mostrara unos resultados u otros, dependiendo de los condicionantes asociados (fabricante, aplicador, condiciones de tráfico, ambientales, características del soporte, etc.)

Una experiencia reciente en una autovía española, que refuerza los buenos resultados de resistencia al deslizamiento obtenidos en el Proyecto LIFE PHOTOSCALING, realizó la siguiente secuencia de actuaciones:



1. Realizó una actuación de fresado y reposición de la capa de rodadura existente. La capa de rodadura de reposición resultó ser una mezcla bituminosa delgada, de 3 cm de espesor de tipo BBTM II B con betún modificado, de acuerdo al artículo 543 del PG-3 (norma de referencia en carreteras españolas de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible). La extensión de esta capa de rodadura fue de 7.000 m aproximadamente.



2. Al cabo de un mes de la puesta en servicio de esta rodadura, se llevó a cabo un tratamiento fotocatalítico a partir de microemulsión con base acuosa, con el fin de colaborar en la mejora de la calidad del aire en toda la extensión del pavimento de la autovía, a excepción de los primeros 800 metros, que se dejaron como tramo de referencia (sin tratamiento fotocatalítico).

- 

3. Tres meses después de la ejecución del tratamiento fotocatalítico y cuatro meses después de la ejecución de la nueva capa de rodadura, se determinó el coeficiente de rozamiento transversal, CRT, mediante un vehículo de auscultación normalizado, tipo SCRIM. Merece la pena destacar que, tanto el tramo sin fotocatálisis como el de con fotocatálisis, estaban contextualizados en las mismas condiciones de ejecución, de intensidad de tráfico y ambientales y, por tanto, los resultados de CRT eran perfectamente comparables.
- 

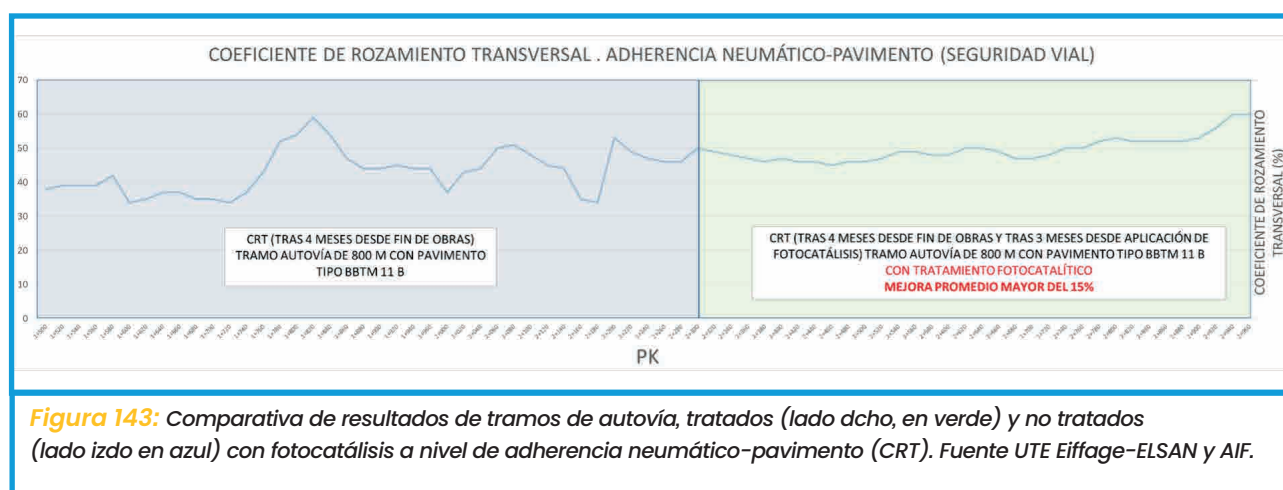
4. En un primer análisis de resultados, con el mismo tamaño muestral, es decir, comparando el tramo de referencia (sin fotocatálisis) de 800 metros, con el tramo adyacente tratado con fotocatálisis en los 800 metros siguientes, se observan mejoras medias de resultados de adherencia neumático-pavimento mayores del 15%.
- 

5. En un segundo análisis, comparando el tramo de referencia (sin fotocatálisis) de 800 metros, con el tramo adyacente tratado con fotocatálisis en los 2.330 metros siguientes, se observan mejoras medias de resultados de adherencia neumático-pavimento mayores del 11%.
- 

6. Y en un tercer análisis, comparando el tramo de referencia (sin fotocatálisis) de 800 metros, con el tramo adyacente tratado con fotocatálisis en los 7.000 metros siguientes, se observan mejoras medias de resultados de adherencia neumático-pavimento mayores del 10%.

Nuevamente, se invita a tomar con cautela estos resultados, ya que son específicos de una determinada experiencia, en unas determinadas condiciones específicas, y que no tienen por qué ser extrapolables a otras carreteras. Si bien la obtención de resultados tan prometedores, deberían estimular aplicaciones y medición a mayor escala.

Para profundizar en el conocimiento de este aspecto, desde la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis, se están llevando a cabo colaboraciones público-privadas, a partir de grupos de trabajo (<https://www.ptfotocatalisis.es>).



11.3 ¿CUÁL SERÍA LA VIABILIDAD ECONÓMICA DE ESTOS TRATAMIENTOS COMO ALTERNATIVA A LOS PAVIMENTOS EXISTENTES?

¿Qué impacto tendría sobre la salud de los ciudadanos, los costes hospitalarios y el PIB Nacional, una posible reducción de los niveles de contaminación en las grandes ciudades en torno a un 10% en un año? Se trata de un estudio macroeconómico que a día de hoy no se ha realizado, que se tenga constancia. Pero sin duda, no sería posible contestar concienzudamente a esta pregunta sin obtener la respuesta anterior.

Lo que sí existen son estudios toxicológicos y epidemiológicos que establecen una relación directa entre los ingresos hospitalarios y los episodios de alta contaminación (Fuente: Pope y Dockery, 2006). En esta misma línea, en el año 2014, la AIF mantuvo una reunión con un equipo de neumólogos del Hospital Ramón y Cajal, donde se pudo comprobar de primera mano la buena correlación que se producía entre los ingresos hospitalarios en relación con enfermedades respiratorias y cardiovasculares y las puntas de contaminación, medidas en la estación de calidad del aire más cercana a este hospital.

En cualquier caso, parecería lógico pensar que la respuesta a esta pregunta debería estar relacionada con la durabilidad de los tratamientos fotocatalíticos en pavimentos.

Algunos de los proyectos de investigación llevados a cabo ya han estudiado este parámetro, tales como los proyectos LIGHT2CAT, LIFE EQUINOX, LIFE MINOX STREET, LIFE PHOTOSCALING o las experiencias llevadas a cabo en Roskilde y la Terminal 1 del aeropuerto de Copenhague, y los resultados obtenidos son muy diversos. Hay tratamientos que están demostrando actividad fotocatalítica tras varios años de aplicación. Quizá el caso más representativo es el del proyecto LIGHT2CAT, por llevar más de 5 años desde su aplicación y seguir colaborando en la descontaminación de la calle de Valencia donde se instaló.

En este sentido, se recomienda que las Administraciones de Obras Públicas contratantes de unidades de obra fotocatalíticas, incluyan partidas económicas destinadas a evaluar la durabilidad de los tratamientos a futuro.

El proyecto LIFE PHOTOSCALING, que ha tenido en cuenta el parámetro durabilidad, ha diseñado una herramienta de evaluación de pavimentos fotocatalíticos, que redundará en una calificación de la aptitud del producto y por tanto, lleva asociada su recomendación -o no- para su puesta en obra.

También a través de los ensayos de caracterización de materiales fotocatalíticos, se puede realizar una estimación de la durabilidad de estos, mediante ensayos de saturación acelerada y capacidad de regeneración.

11.4 ¿CUÁL ES LA EFICACIA DESCONTAMINANTE DE LOS PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS?

No todos los pavimentos fotocatalíticos son iguales y, por tanto, sus eficiencias son también muy diversas.

Desde el punto de vista de lo que sería la escala laboratorio, donde se emplea la Norma ISO 22197-1 (o UNE 127197-1:2013, o UNE 83321 EX:2017), como referencia, existen productos que registran niveles de descomposición de NOx de más del 50%.

Pero la medición de la eficacia, como ya se ha comentado en el [apartado 7.3](#) de este documento, va a depender de la metodología empleada a tal fin. En este sentido, las últimas experiencias en la Autopista C-31 ([ver apartado 8.1.6.2](#)), apuntan a que la metodología más representativa, cuando esta se hace a escala real, es la medición a través de estaciones de calidad del aire, previamente calibradas con estaciones oficiales.

En esta autopista se han alcanzado reducciones promedio de concentraciones de dióxidos de nitrógeno del orden del 30%, a escala real, durante un periodo de 8 meses, cuando los ensayos de caracterización de laboratorio sugerían unos valores inferiores. ([Ver apartado 8.1.6.2](#)).

Sin embargo, empleando otras metodologías de medición sobre materiales analizados en recientes proyectos de investigación (e incluidos en el presente documento), a partir de sensores de bajo coste o muestras testigo colocadas en obra, han demostrado eficiencias superiores al 10%, tras varios años de aplicación.

En definitiva, la eficiencia y durabilidad del tratamiento fotocatalítico depende de numerosos factores: calidad del producto, calidad de la aplicación, dotación, estado y tipo de soporte, horas de exposición a luz, condiciones geográficas y ambientales, sistema de medida de la eficiencia, etc.

Por último, es recomendable destacar la importancia del mantenimiento de los pavimentos fotocatalíticos, de cara a mantener o incluso mejorar su eficiencia descontaminante. En este sentido se recomienda consultar el [apartado 8.1.6.2](#) de este volumen, donde se puede observar la influencia tanto de las horas de luz como de la regeneración del fotocatalizador por efecto de las lluvias. Ha quedado demostrado que la ausencia de lluvias o lavados, por un periodo prolongado, puede bloquear el fotocatalizador y, con ello, su funcionamiento.

Se recomienda, por tanto, que se realicen lavados periódicos de los pavimentos fotocatalíticos, normalmente con desengrasantes (ya han demostrado su efectividad en varios ayuntamientos españoles), para mantener o mejorar su capacidad descontaminante.

A falta de otros datos aportados por el fabricante, se recomienda llevar a cabo operaciones de baldeo de calles con carácter mensual, salvo que se produzcan precipitaciones atmosféricas, en cuyo caso se podrían posponer estas en la misma medida.

11.5 INFLUENCIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS

Los derrames puntuales de hidrocarburos (aceites, lubricantes, combustibles, etc.) normalmente se producen en zonas de estacionamiento. Si el pavimento reservado a estas zonas fuera fotocatalítico, es posible que el derrame de estas sustancias bloquee la exposición del fotocatalizador al efecto de la luz y, por tanto, en esas zonas puntuales no funcione su capacidad descontaminante, pero en el resto de la superficie sí.

La forma de mitigar estos efectos no deseados sería mediante operaciones de limpieza de calles (baldeos), y el empleo de desengrasantes, que permitan renovar la exposición del fotocatalizador al efecto de la luz.

Por otra parte, los pavimentos percolados con lechada fotocatalítica ([ver apéndice](#)) han demostrado ser una medida adecuada de mitigación de este efecto.

11.6 POTENCIAL AUTOLIMPIANTE DE PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS

El concepto de autolimpieza está más asociado a las envolventes de edificación (paramentos verticales), pues esta capacidad fotocatalítica lo que evita es que se le adhieran elementos orgánicos a su superficie.

El concepto de autolimpieza debe entenderse como un mantenimiento más prolongado de la cualidad estética de la envolvente (color, brillo, etc.) frente a la pérdida de esta por acumulación de suciedad. Esta capacidad no es, ni una protección antigrafiti, ni permite la eliminación de compuestos o materiales químicamente muy estables, pues de ser así, no serían susceptibles de ser oxidados por las reacciones fotoquímicas que favorece la fotocatalisis. Un ejemplo de estos materiales sería las partículas de arena que pudieran quedar incrustadas en los poros de una envolvente fotocatalítica.

En el caso de los pavimentos, dado que se trata de superficies horizontales, cualquier material particulado que exista en el ambiente, con independencia de su origen, tenderá a depositarse sobre el pavimento por gravedad. De hecho, si la densidad de

este material particulado fuese excesiva, podría acabar bloqueando el fotocatalizador, siendo necesarias las operaciones de limpieza de calles para desbloquearlo, dentro de las actividades de conservación que los ayuntamientos tienen encomendadas.

11.7 DURACIÓN DE LA ACTIVIDAD FOTOCATALÍTICA

En las respuestas a las preguntas 11.3 y 11.4 queda contestada esta cuestión.

11.8 CONDICIONES DE MANTENIMIENTO DE PAVIMENTOS

En la respuesta a la pregunta 11.4 queda contestada esta cuestión.

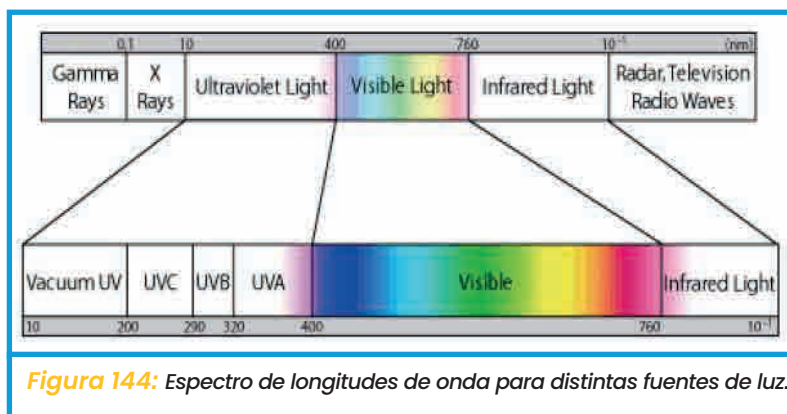
11.9 ¿EN QUÉ RANGO DE LONGITUDES DE ONDA SE OBTIENEN LAS MEJORES EFICIENCIAS?

Las ondas electromagnéticas pueden tener diferentes longitudes de onda. El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético, y el conjunto de las longitudes de onda emitidas por el sol se denomina espectro solar.

La proporción de la radiación solar en las distintas regiones del espectro es aproximadamente:

- **Ultravioleta: 5%**
- **Luz visible: 45%**
- **Infrarrojo: 50%**

Normalmente los pavimentos fotocatalíticos se diseñan para que se activen por efecto de la luz ultravioleta (UVA), es decir, con espectros comprendidos entre los 320 y los 400 nanómetros. Si bien,



en la última década se están estudiando formulaciones que permitan la activación del fotocatalizador también bajo luz visible (tal fue el caso del pavimento colocado bajo el proyecto Light2cat, que ha mostrado unos resultados muy prometedores). Esto se puede conseguir modificando la química del fotocatalizador (dopándolo) o modificando la fuente de luz (cambio a LEDs).

Por otra parte, en base a las lecciones aprendidas de los proyectos de investigación recientemente realizados e incluidos en este documento, niveles de irradiancia superiores a 8 W/m^2 permiten la activación de los fotocatalizadores habituales.

Por último, merece la pena destacar que el espectro de luz no es un parámetro único en la reacción química que activa el fotocatalizador; pues también hay otros tales como el pH del soporte sobre el que se aplica el pavimento, la celeridad en que se produce la reacción de reducción del oxígeno, la humedad relativa, el régimen de vientos, la temperatura y la zona geográfica en general. No se puede olvidar que la calidad del producto fotocatalítico desde el origen, pasando por la fabricación y aplicación, es fundamental.

11.10 ¿SE PODRÍAN EMPLEAR REVESTIMIENTOS FOTOCATALÍTICOS EN TÚNELES?

Siguiendo con la reflexión de la pregunta anterior, en los túneles no se dispone de luz ultravioleta. Por lo tanto, las opciones son dos: actuar sobre el fotocatalizador, dopándolo, o actuar sobre la fuente de luz y cambiarla a luminarias de tipo LEDs (la tecnología LED UV funciona en el rango espectral entre 365 nm y 405 nm). Se recomienda la consulta del [apartado 8.2.3](#) del presente documento.

En el proyecto ECO-SEE, por citar un ejemplo, se han desarrollado recubrimientos para interiores activados bajo luz visible, que ya se están empleando en oficinas, según se explica en el Booklet de conclusiones del proyecto en 2017.

Ejemplos adicionales son las experiencias llevadas a cabo en espacios cerrados de los [apartados 8.4.3.2 y 8.4.3.3](#), donde la luz ultravioleta no queda ni visible, ni en contacto con los usuarios, pero la capacidad de descomposición de agentes contaminantes es elevada.

11.11 INFLUENCIA DE CONDICIONES METEOROLÓGICAS, HUMEDAD, VIENTO, LUZ, ETC

Para responder esta pregunta se recomienda la lectura del [apartado 9.2](#), *Criterios de diseño y aplicación de materiales fotocatalíticos*, incluido en el presente documento.

11.12 INFLUENCIA DEL COLOR EN LA EFICIENCIA FOTOCATALÍTICA

Aunque esta pregunta quedaría respondida en el **apartado 9.3.5**, incluido en el presente documento, merece la pena mencionar que lo habitual es trabajar con materiales fotocatalíticos de colores claros, con objeto de aumentar el efecto albedo (las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras; un albedo alto enfría el entorno porque la radiación de luz absorbida que calienta el elemento es mínima, mientras que un albedo bajo calienta el elemento, porque la mayor parte de luz es absorbida por el mismo) y, por tanto, colaborar en la reducción del calentamiento de las ciudades.

Desde hace unos años las demandas del mercado se posicionan más sobre materiales fotocatalíticos incoloros, que no modifican la estética del soporte sobre el que se aplica.

11.13 INFLUENCIA DE LA DISTANCIA DE MEDIDA AL FOCO CONTAMINANTE

Distintos estudios de investigación realizados en la pasada década y en la actualidad en España (e incluidos en este documento), han demostrado que la eficiencia descontaminante de los materiales fotocatalíticos depende de muchos factores, pero uno de ellos es la metodología de medición y la altura a la que se coloquen los dispositivos de control de eficiencia.

A continuación, se pondrán de manifiesto dos experiencias con metodologías de medición distintas y alturas de control también diferentes.

EXPERIENCIA 1

En la Jornada de Presentación de Conclusiones del Proyecto LIFE PHOTOSCALING del 25 de junio de 2019 (<https://www.life-photoscaling.eu/>), se describió el estudio realizado *in situ* en la C/José Antonio de Armona, mediante captadores pasivos, sobre una superficie aproximada de 2.500 m² (ver limitaciones de este tipo de metodología de control de eficiencia en el **apartado 8.1.5**).

En esta experiencia se instalaron en báculos de alumbrado una red de 75 unidades de captadores pasivos de NO₂ a una altura de 3 metros respecto del nivel del suelo, en dos calles (la tratada con tecnología fotocatalítica y la no tratada).

Las conclusiones finales fueron las siguientes:

- Se observan reducciones medias del orden del 7%, con respecto a la calle no tratada.
- Se observan cambios en la eficiencia descontaminante, dependiendo de la altura de colocación de los captadores. Más eficiencia cerca del foco (nivel suelo).

Por tanto, los mejores resultados de capacidad descontaminante se obtuvieron con sensores colocados a 2 cm del pavimento fotocatalítico. Aquellos sensores que se colocaron a 3 metros del pavimento también han registrado el efecto descontaminante, pero en menor medida que el anterior.

Finalmente, merece la pena comentar que estas conclusiones no tienen por qué ser extrapolables a todo tipo de aplicaciones en pavimentos, ya que la metodología de medición empleada tiene asociada sus limitaciones.

EXPERIENCIA 2

En la Autopista C-31, sobre la que se aplicó un tratamiento fotocatalítico en una superficie de unos 200.000 m² ([ver apartado 8.1.6.2](#)), las estaciones de calidad del aire que se colocaron en obra, en los arcones, se dispusieron a unos 50 cm de la capa de rodadura.

En esta experiencia se obtuvieron resultados medios de abatimiento de dióxidos de nitrógeno, medidos durante un periodo de 8 meses consecutivos (de agosto de 2023 a marzo de 2024), del orden del 30%.

En síntesis, parece clara la influencia de la distancia de medida al foco contaminante, pero como se ha podido comprobar, además de esta, también hay otros factores que influyen en los resultados finales, como se ha comentado en apartados anteriores, pero quizás uno de los más determinantes, y a los que no se ha aludido previamente, son los metros cuadrados de superficie de aplicación. Cuantos más metros cuadrados aplicados haya, mayor capacidad de abatimiento de contaminantes se obtendrá.

11.14 GENERACIÓN DE EFECTOS ADVERSOS A LA SALUD HUMANA

Como se ha indicado en repetidas ocasiones, el TiO₂ es el fotocatalizador más ampliamente utilizado. El titanio es el noveno elemento más abundante en la Tierra (constituye el 0,63% de la corteza terrestre), y existen abundantes yacimientos de minerales que lo contienen. Por este motivo, el dióxido de titanio es un material de bajo coste, que se utiliza fundamentalmente, además de sus aplicaciones catalíticas y fotocatalíticas, como pigmento blanco en pinturas, plásticos y papel. Su baja toxicidad lo hace también apto para su uso en productos de consumo humano, por lo que se emplea como excipiente en medicamentos, como componente de cremas solares de

alto factor de protección y de pastas dentífricas, e incluso como colorante alimentario (el colorante E-171 aprobado por la EFSA). Desde el punto de vista ecológico, sus efectos ambientales negativos son sólo apreciables en el caso de vertidos masivos.

Aunque este óxido no sea una sustancia tóxica, existen discrepancias acerca de su posible efecto en formato nanoparticulado (**ver apartados 12.3 y 12.4**). Esto, unido a la evidente pérdida de actividad del producto asociada al desprendimiento del fotocatalizador, hace que un aspecto de gran relevancia en el desarrollo de un producto fotocatalítico sea maximizar su adherencia a las superficies sobre las que se vaya a aplicar.

Recientes investigaciones sobre el comportamiento de los pavimentos fotocatalíticos en España (se hace referencia a los pavimentos porque son los que están sometidos a la abrasión de cargas de tráfico y, por tanto, son las condiciones más desfavorables para evaluar un material fotocatalítico), apuntan a que la capacidad de liberación de nanopartículas de titanio a la atmósfera no supone una amenaza para la salud humana. Concretamente en la Jornada de Presentación de Conclusiones del Proyecto LIFE PHOTOSCALING del 25 de junio de 2019 (<https://www.life-photoscaling.eu/>), en relación a los efectos adversos para la salud pública por liberación de aerosoles y nanopartículas, se midió la concentración de estas últimas en ambiente, no detectándose variación estadísticamente significativa en la concentración numérica o la distribución del tamaño de partículas finas suspendidas en la calle con pavimento fotocatalítico, en comparación con las calles vecinas (sin tratar). Se tomaron muestras de aire para análisis de partículas y sólo ocasionalmente las partículas capturadas contenían Ti (con tamaños inferiores a 20 μm), pero siempre estaban en el rango de tamaño de micrómetros (el umbral de alerta estaría por los 360 μm). Esto llevó a la conclusión de que para este producto las nanopartículas no se liberaron en una cantidad significativa al aire, con lo cual no se generaron efectos adversos a la salud.

Tabla 18
Cálculo del rendimiento de eliminación de NO, NO₂ y NOx y evaluación de movilización de partículas en la Autopista C-31

Mes	Rendimiento Eliminación (%)			Diferencia PM _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
	NO	NO ₂	NOx	
Agosto	-7%	58%	33%	-1,62
Septiembre	21%	35%	29%	-0,13
Octubre	27%	23%	25%	-0,73
Noviembre	16%	22%	18%	0,71
Diciembre	22%	2%	0%	2,38
Enero	2%	7%	4%	2,24
Febrero	12%	29%	20%	0,87
Marzo	14%	58%	17%	1,54
Promedio	13%	29%	18%	-

Continuando con experiencias en carreteras, en la Autopista C-31 también se midió la posible movilización de partículas en suspensión, por efecto del paso del tráfico por el tratamiento fotocatalítico, pero en los resultados obtenidos no se observaron fluctuaciones significativas en las tendencias a lo largo de los tramos monitoreados. Se verifica, por tanto, que este parámetro no está influenciado por la aplicación del tratamiento fotocatalítico, y que los resultados obtenidos concuerdan con la hipótesis inicial de poder realizar comparaciones entre el tramo de ensayo (con tratamiento fotocatalítico), y el de referencia (sin tratamiento), al contar con condiciones de tráfico similares. A continuación, se incluyen los resúmenes de resultados, donde se pueden observar las fluctuaciones de $PM_{2,5}$ durante el periodo de estudio.

En cualquier caso, es recomendable que estos aspectos sean evaluados con anterioridad a su puesta en obra, con objeto de verificarlos, pues los resultados podrían ser distintos, dependiendo del tipo de material fotocatalítico que se tratara y las condiciones de aplicación, y muy especialmente, si su uso fuera sobre pavimentos.

11.15 AFECCIONES DE LOS LIXIVIADOS A LAS ESTACIONES E.D.A.R.

Una de las referencias que se poseen a este respecto es la Jornada de Presentación de Conclusiones del Proyecto LIFE PHOTOSCALING del 25 de junio de 2019 (<https://www.life-photoscaling.eu/>), donde se realizaron controles de lixiviado, tras la aplicación de un pavimento fotocatalítico en una calle de Madrid.

Los controles de niveles de lixiviado se realizaron mediante sonda multiparamétrica. Las concentraciones que se obtuvieron de partículas de titanio en agua fueron de 0,015 ppm. Y las concentraciones de nitratos en agua fueron menores de 50 ppm. En ambos casos, las concentraciones tienen la consideración de bajas, a día de hoy, pero lo cierto es que los umbrales de aceptación no están definidos en la actualidad.

Por otra parte, en la aplicación sobre activos del transporte realizada en la autovía de Los Llanos en 2021 (**ver apartado 8.2.1**), también se midió la movilización de dióxido de titanio sobre la superficie de aplicación del tratamiento fotocatalítico, para evaluar la calidad de las aguas de lixiviado, donde se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La movilización de partículas de dióxido de titanio en las aguas de recogida de pluviales es extremadamente reducida, sugiriendo una buena adherencia del fotocatalizador al soporte de aplicación.
- En los lavados realizados sobre las muestras testigo, se observa una buena estabilidad del titanio, ya que su concentración en agua se encuentra por debajo del límite de detección analítico. Sí que se identifica la presencia de nitratos arrastrados por el agua de lavado. Esta conclusión induce a pensar que el fotocatalizador ha quedado suficientemente anclado en el soporte y que el

proceso fotocatalítico de mejora de calidad del aire funciona, al detectarse los nitritos en agua.

Merece la pena destacar que estas conclusiones no tienen por qué ser extrapolables a todo tipo de aplicaciones fotocatalíticas.

Para más información se recomienda la lectura del [apartado 9.3.1](#).

11.16 DIFERENCIAS DE RESULTADOS ENTRE LABORATORIOS

Desde que en el año 2012 se identificara este problema, donde los resultados de eficiencia descontaminante de un material fotocatalítico podrían variar dependiendo del laboratorio que los realizara, la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis ha llevado a cabo una serie de acciones encaminadas a mitigarlo.

La primera acción fue la realización de una batería de ensayos interlaboratorios (dentro de AIF hay tres laboratorios que realizan el ensayo ISO 22197-1 o el UNE 127197-1:2013) sobre mismas familias de muestras, pero de distintos fabricantes, que se repartieron entre los tres laboratorios, y siempre con un “blanco” (muestras sin tratamiento fotocatalítico) en cada familia. Los resultados obtenidos fueron bastante homogéneos por parte de los tres laboratorios, en algunos materiales, pero no tanto en otros. Tras esta primera acción, se pudieron identificar algunas diferencias entre los tres laboratorios, pero no se encontró ningún patrón que indujera a pensar dónde podían estar generándose las diferencias. Este estudio tuvo secuelas, pues hubo intercambios de las mismas muestras ensayadas por parte de los tres laboratorios. De este estudio se sacaron algunas conclusiones, entre las que estaba la posible heterogeneidad fotocatalítica en algunas de las muestras ensayadas.

Entre los años 2014 y 2015 se llevó a cabo un nuevo estudio interlaboratorios, por parte de AIF. En esta ocasión se pidió a un único fabricante que elaborara 15 muestras patrones iguales (tres de ellas serían “blancos” sin tratar), que se codificarían y repartirían entre los tres laboratorios.

Antes de llevar a cabo los ensayos se estableció un protocolo de trabajo que consistió básicamente en los siguientes puntos:



1. Influencia de lámpara y radiómetros. Se realizaron pruebas conjuntas de irradiancia (lámpara- radiómetro) en uno de los laboratorios miembros de AIF, así como un ensayo supervisado, por los tres laboratorios.



2. Selección de lámpara para ensayo. Finalmente, se identificó una fuente de luz tipo común, de acuerdo con la norma UNE 127197-1:2013.



3. Muestra patrón. Crear muestra patrón de ensayo (forma común de aplicación y dotaciones) aplicada sobre soporte liso común, con objeto de crear 15 muestras iguales y repartirlas entre los laboratorios AIF.



4. Protocolo ensayo. Se siguió la metodología Round-Robin de actividad fotocatalítica según la norma UNE 127197-1:2013, pero creando una plantilla de cálculo común para uso de los laboratorios AIF.



5. Concentraciones de entrada de NO. Con objeto de reducir posibles dispersiones de ensayo entre laboratorios AIF, se acordó acotar las concentraciones de entrada de NO, siempre en cumplimiento de la Norma UNE 127197-1:2013.

Este estudio permitió acotar considerablemente los parámetros fundamentales que pudieran tener influencia en el resultado final.

Desde el año 2016, los laboratorios miembros de AIF se reúnen con la periodicidad que se estableciera en asambleas generales para calibrar medidas de radiómetros.

En la actualidad, los tres laboratorios miembros de AIF están interconectados y trabajan de manera coordinada dentro de un grupo de trabajo de la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis (<https://www.ptfotocatalisis.es>). Cualquier problema que pudiera surgir con alguna muestra es analizado, a modo de contraste, por al menos otro laboratorio.

11.17 ¿EN QUÉ MATERIA SE TRANSFORMAN LOS NO_x, SO_x Y COV, TRAS LA FOTOCATÁLISIS Y CÓMO SE EVACUAN?

El objetivo de la fotocatalisis es mineralizar los contaminantes, es decir, transformarlos en compuestos totalmente oxidados, que en el caso que nos ocupa son inocuos y de fácil eliminación. En el caso de los COV, la mineralización total da lugar a CO₂ y agua fundamentalmente. La segunda sustancia no precisa ningún comentario, mientras que el CO₂, por su estado gaseoso en condiciones atmosféricas, se libera inmediatamente a la atmósfera. Hay que decir en este sentido que, efectivamente, el CO₂ es un gas de efecto invernadero y que sus emisiones antropogénicas representan uno de los factores clave en la lucha contra el cambio climático. Podrían plantearse, por tanto, dudas razonables acerca de la benignidad medioambiental de este proceso. Sin embargo, puede considerarse que el efecto pernicioso de la formación de CO₂ y su liberación a la atmósfera, en este caso, es insignificante con respecto al efecto positivo, tanto para el medio ambiente como para la salud, de eliminar los COV. Por lo que respecta a contaminantes inorgánicos como NO_x y SO_x, los productos finales de oxidación serán nitratos y sulfatos que, por su solubilidad en agua, se eliminarán fácilmente por la lluvia o mediante limpieza, según la aplicación.

11.18 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS

Para responder esta pregunta se recomienda la lectura del [capítulo 9](#), *Criterios de diseño y aplicación de materiales fotocatalíticos*, y el [apéndice](#) de este volumen.

11.19 ¿SE GENERA O₃ O PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN CON LA FOTOCATÁLISIS?

El fotocatalizador más habitual, TiO₂, no es termodinámicamente capaz de generar ozono (O₃) a partir del oxígeno (O₂) o del agua (H₂O). Por tanto, este gas no se produce en los procesos fotocatalíticos, ni es un intermedio habitual de las reacciones involucradas en estos procesos.

Aunque una pequeña parte de los productos de degradación de contaminantes sean sólidos, en general, se puede decir que la generación de materia particulada susceptible de afectar negativamente al ser humano es poco probable. Sí puede darse, en el caso de la aplicación de la fotocatálisis en superficies (pavimentos o fachadas, entre otros) el desprendimiento de partículas de TiO₂, pero para ello se recomienda la consulta del [apartado 11.14](#), donde este efecto no se ha detectado en las investigaciones realizadas a escala real.

11.20 ¿CUÁNTO CUESTAN LOS MATERIALES FOTOCATALÍTICOS?

La respuesta a esta pregunta dependerá de los condicionantes del mercado del momento y de la cuantía de material a aplicar o colocar, como es lógico.

A modo orientativo, se puede decir que un material fotocatalítico sería del orden de un 20% más caro que su homólogo convencional.

11.21 ¿DÓNDE SE PUEDEN COMPRAR ESTOS PRODUCTOS?

Aunque desde hace años ya se pueden encontrar algunos materiales fotocatalíticos en almacenes de suministro habituales de grandes superficies, es relativamente complicado encontrarlos, pues nunca aparecen por el apelativo “fotocatalítico”. Esto es debido a que sigue siendo un término desconocido para el usuario final y, por tanto, un hándicap para las campañas de marketing de las empresas. Es más habitual verlos como “ecológicos”, “sostenibles”, “autolimpiantes” o “purificadores de aire”.

En cualquier caso, tanto para pedir asesoramiento como para solicitar ensayos de control de eficiencia, solicitar presupuestos, o para localizar materiales fotocatalíticos, se recomienda que se consulte la siguiente web, <https://www.fotocatalisis.org>, donde están reunidos todos los fabricantes, laboratorios, ingenierías, arquitectos, centros tecnológicos y universidades de la asociación.

El objetivo de la fotocatálisis es mineralizar los contaminantes, es decir, transformarlos en compuestos totalmente oxidados, inocuos y de fácil eliminación

12

SEGURIDAD Y SALUD

12.1 FICHAS DE SEGURIDAD DE CADA PRODUCTO

Todos los materiales fotocatalíticos deben tener asociada una hoja de seguridad (también HDS), que será el documento que describa los riesgos de un material y suministre información sobre cómo se puede manipular, usar y almacenar el material con seguridad.

Dicha hoja debe hacer referencia a los parámetros establecidos en las normas vigentes tanto nacionales como internacionales, en su caso.

12.2 SEGURIDAD Y SALUD DURANTE LA FABRICACIÓN Y LA APLICACIÓN

El uso de nanopartículas en la producción de materiales con propiedades fotocatalíticas puede provocar una pequeña liberación de las mismas al medio ambiente. Esta se produciría durante la fabricación del catalizador nanoparticulado y es en su aplicación mediante mezclado en seco, en emulsión, lechada, mortero, etc. cuando se produce el máximo riesgo para la salud humana. Se han realizado ensayos de laboratorio comparando actividades similares con y sin el empleo de nanopartículas de óxido de titanio, analizándose el tamaño de las partículas generadas y liberadas al entorno sin que se haya relacionado su utilización con un detrimento en la salud de los trabajadores.

Se puede decir que un proceso libera nanopartículas si la concentración de éstas aumenta en relación al mismo proceso sin la presencia de nanopartículas (Brouwer y col. 2009). En caso de que esto ocurra, se pueden tomar medidas para mitigarlo. Por ejemplo, un estudio de referencia (Dylla y col. 2012) demuestra que el uso de agua durante la manipulación de un material que contiene nanopartículas reduce la exposición a éstas, debido a la coalescencia en partículas de mayor tamaño.

Los recubrimientos fotocatalíticos limitan en gran medida la liberación de partículas, puesto que éstas están inmovilizadas en un soporte.

La seguridad de los composite y los materiales con base cemento en los que el fotocatalizador se ha añadido másicamente, y no en forma de recubrimiento, en general, es mayor, puesto que el fotocatalizador está más fuertemente unido al soporte y tolera mejor las condiciones ambientales (Chen y col. 2011).

12.3 IMPLICACIONES EN REACH

REACH es una normativa de la Unión Europea para proteger la salud humana y el medio ambiente de los posibles riesgos que plantean las sustancias químicas. Otros de los objetivos que persigue es el de mantener y mejorar la competitividad de los productos químicos europeos industria.

Este reglamento se aplica a todas las sustancias químicas de la UE.

REACH son las siglas en inglés de Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias y Preparados Químicos. La política también pretende reducir la duplicación de la investigación y promover métodos alternativos de evaluación de riesgos.

Toda empresa que fabrique o importe una sustancia química en cantidades anuales iguales o superiores a una tonelada, debe registrarla en la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos (ECHA) de conformidad con REACH. El registro incluye un expediente con información detallada sobre la sustancia química y sus usos.

La agencia europea ECHA (European Chemicals Agency) tiene registrado al dióxido de titanio como un compuesto inorgánico que, con el actual estado del conocimiento y por lo que a un uso seguro bajo REACH respecta, ha de usarse evitando emitir polvo que pueda inhalarse, implementando medidas de extracción y ventilación si fuera preciso. Además, ha de almacenarse en envases cerrados, evitando la humedad y manejándolo con atuendo de protección (guantes, gafas, mascarilla y ropa de seguridad).

La información toxicológica conocida indica que no muestra riesgos identificados por inhalación, contacto con piel y ojos o por ingestión.

Para el medioambiente no se han registrado riesgos a corto ni largo plazo para organismos acuáticos, terrestres y para la calidad del aire para organismos terrestres. En todo caso, ha de evitarse que sea liberado en el sistema hidrológico.

Para su transporte no tiene regulaciones especiales.

12.4 LA UNIÓN EUROPEA Y EL DIÓXIDO DE TITANIO

El Tribunal de Justicia de la Unión Europea ha publicado con fecha 23 de noviembre de 2022 una sentencia que ordena: «Anular el Reglamento Delegado (UE) 2020/217 de la Comisión, de 4 de octubre de 2019, que modifica, a efectos de su adaptación al progreso técnico y científico, el Reglamento (CE) nº 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas, y que corrige dicho Reglamento, en lo que respecta a la clasificación y el etiquetado armonizados del dióxido de titanio en forma de polvo que contenga el 1 % o más de partículas con un diámetro aerodinámico igual o inferior a 10 µm.»

Dicha sentencia ha basado sus argumentos en errores en la medición de los ensayos utilizados y el alcance de las conclusiones, por parte del Comité de Evaluación del Riesgo de la ECHA (CER).

El Reglamento Delegado (UE) 2020/217 de la Comisión de 4 de octubre de 2019 al que se refiere la sentencia y que modifica, a efectos de su adaptación al progreso técnico y científico, el Reglamento (CE) nº 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas, y que corrige dicho Reglamento, establecía lo siguiente:

«2.12. Mezclas que contengan dióxido de titanio que contengan un 1 % o más de partículas de dióxido de titanio, con un diámetro aerodinámico igual o inferior a 10 µm, deberá figurar la indicación siguiente»:

EUH211: «¡Atención! Al rociar pueden formarse gotas respirables peligrosas. No respirar el aerosol o la niebla».

En la etiqueta del envase de las mezclas sólidas que contengan un 1 % o más de dióxido de titanio, deberá figurar la indicación siguiente:

EUH212: «¡Atención! Al utilizarse, puede formarse polvo respirable peligroso. No respirar el polvo».

Además, en la etiqueta del envase de las mezclas líquidas y sólidas no destinadas al público en general y no clasificadas como peligrosas, etiquetadas como EUH211 o EUH212, deberá figurar también la indicación EUH210.

Por tanto, la Unión Europea anula las exigencias del etiquetado de mezclas con dióxido de titanio, y dictamina que no es peligroso.

13

CONCLUSIONES Y RETOS

La tecnología fotocatalítica aplicada al sector de la construcción lleva más de 50 años al servicio del ciudadano en el país pionero en su desarrollo, Japón.

En Europa y España, por su parte, como se puede comprobar en este documento, se han llevado a cabo, tanto decenas de proyectos de investigación en las últimas dos décadas como numerosas experiencias a escala real, con el objetivo de aumentar el conocimiento en su comportamiento a futuro, así como desarrollos de distintos mecanismos que valoren su eficiencia.

Fruto de estas investigaciones y experiencias, ya hay varias administraciones públicas españolas que han mostrado su interés en las tecnologías fotocatalíticas, incluyéndolas dentro de los pliegos de condiciones de proyectos y obras, así como de estimular su inclusión dentro de los criterios de sostenibilidad ambiental puntuables en las licitaciones públicas. También hay administraciones que solicitan el Certificado de Eficiencia de Producto, que otorga AIF, como requerimiento esencial para habilitar la aplicación del material fotocatalítico.

Por otra parte, cada vez más las ingenierías, estudios de arquitectura y departamentos de Responsabilidad Social Corporativa de las grandes compañías multinacionales que demandan materiales que incorporan un alto valor añadido, como los fotocatalíticos, para su aplicación en sus diseños e instalaciones.

Teniendo en cuenta los recientes resultados obtenidos en las experiencias nacionales e internacionales, tras la pandemia COVID-19, y los beneficios que genera, junto a las crecientes demandas del mercado, parece claro que la fotocatalisis en sus diversas aplicaciones podría ser considerada como una medida complementaria para la mejora de la vida de los ciudadanos, por sus múltiples capacidades: degradación de contaminantes en aire, agua y superficies, efecto autolimpiante, o la producción de nuevos combustibles.

Aunque no todo vale para todo. A través de este documento se ha puesto de manifiesto la importancia de tener en cuenta los criterios de diseño y aplicación, así como de establecer los mecanismos de control necesarios para evaluar o predecir el comportamiento de estos materiales. A tal fin, y ante la ausencia de normativa que lo regule, se han elaborado en este documento propuestas de protocolos para la compra de materiales fotocatalíticos, se han creado Certificados de Eficiencia de Producto y se han desarrollado herramientas de ayuda a selección de materiales fotocatalíticos, con la triple intención de minimizar el fraude de compañías que incluyen materiales



fotocatalíticos en su catálogo, cuando en realidad no lo son, dar más información al cliente final de lo que está comprando, y de estimar sus capacidades, antes de iniciar el proceso de compra.

Merece la pena destacar la gran mejora que han experimentado los materiales fotocatalíticos en los últimos años y lo prometedores que son sus resultados, aunque no siempre se hayan obtenido las mejoras deseadas. Está en la mano de todos los agentes involucrados la capacidad de sacar el máximo partido de estos nuevos materiales, en beneficio de toda la sociedad.

En cualquier caso, es necesario que los fabricantes sigan trabajando sobre la eficiencia y durabilidad de estos productos (tanto en exterior como en interior), que la comunidad científica siga avanzando en el desarrollo de tecnologías de medición y análisis más precisas y que cada vez más Administraciones públicas estimulen su uso y conocimiento de manera determinante.

En ausencia de normativa al respecto, la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis propone la adopción de este libro como referencia, para que sirva de base a técnicos y prescriptores frente a los retos que demandan las distintas fases de toda infraestructura: proyecto, obra y conservación y mantenimiento. No cabe duda de que el margen de mejora de este documento es amplio, desde muchos puntos de vista, por lo que debe ser entendido, como un documento vivo, que sea objeto de actualización con el tiempo.

Las personas y entidades interesadas en contribuir al conocimiento sobre tecnologías fotocatalíticas y sus aplicaciones pueden contactar con AIF/PTF a través del correo contacto@fotocatalisis.org

14

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamson, I.Y.R., Prieditis, H., Hedgecock, C., Vincent, R. (2000). Zinc Is the Toxic Factor in the Lung Response to an Atmospheric Particulate Sample. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 166, 111–119.
- Adamson, I.Y.R., Prieditis, H., Vincent, R. (1999). Pulmonary Toxicity of an Atmospheric Particulate Sample Is Due to the Soluble Fraction. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 157, 43–50.
- Adamson, I.Y.R., Vincent, R., Bjarnason, S.G. (1999). Cell Injury and Interstitial Inflammation in Rat Lung after Inhalation of Ozone and Urban Particulates. *Am. J. Respir. Cell Mol. Biol.* 20, 1067–1072.
- Advances in Solar Energy Research; Himanshu, T., Agarwal, A. K., Chakraborty, P. R., Powar, S., Ed.; Springer Nature, Singapore, 2019.
- AEMA (2020): Agencia Europea de Medio Ambiente, <https://www.eea.europa.eu/es>.
- Aguado, M. A., Giménez, J., Cervera-March, S. Continuous photocatalytic treatment of Cr(VI) effluents with semiconductor powders. *Chemical Engineering Communications, Volume 104*, 1991, 71–85.
- AIDICO (2012) Instituto de la Construcción, www.aidico.es.
- AIF (2020): Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, <https://www.fotocatalisis.org>.
- Almazán, D., Rovito, G. (2012). Evaluación del Comportamiento de los Pavimentos Descontaminantes. *Jornadas Nacionales de ASEFMA* en Madrid.
- Almazán, D., Rovito, G. (2012). Evaluación del comportamiento de los pavimentos descontaminantes. *VII Jornada Nacional ASEFMA 2012*. Comunicación 27.
- Amiri, R., Rezaei, A., Fattahi, N., Pirsahab, M., Rodríguez-Chueca, J., Moradi, M. Carbon quantum dots decorated Ag/CuFe₂O₄ for persulfate-assisted visible light photocatalytic degradation of tetracycline: A comparative study, *Journal of Water Process Engineering, Volume 47*, 2022, 102742.
- Appl. Sci. 2019, 9(22), 4837; <https://doi.org/10.3390/app9224837>.
- B. Bowe, Y. Xie, T. Li, Y. Yan, H. Xian, and Z. Al-Aly, "The 2016 global and national burden of diabetes mellitus attributable to PM 2.5 air pollution," *Lancet Planet. Heal.*, vol. 2, no. 7, pp. e301– e312, 2018, doi: 10.1016/S2542-5196(18)30140-2.



- Baena, J.M., Lesueur, D., Rousseau, P. (2009). Carreteras descontaminantes: El firme NOXER de Madrid (IV Jornadas Nacionales de ASEFMA).
- Ballari, M.M., Hunger, M., Hüsken, G., Brouwers, H.J.H. (2010). Modelling and experimental study of the NO_x photocatalytic degradation employing concrete pavement with titanium dioxide. *Catal. Today* 151, 71–76.
- Baniamerian, H., Safavi, M., Alvarado-Morales, M., Tsapekos, P., Angelidaki, I., Shokrollahzadeh, S. Photocatalytic inactivation of *Vibrio fischeri* using Fe₂O₃-TiO₂-based nanoparticles, *Environmental Research*, Volume 166, 2018, 497–506.
- Baudys, M., Berthet, E., Macak, J.M. et al. Photocatalytic degradation of gaseous pollutants on nanostructured TiO₂ films of various thickness and surface area. *Photochem Photobiol Sci* 22, 883–892 (2023). <https://doi.org/10.1007/s43630-022-00359-0>.
- Blesa, M.A.; Sánchez B. (Eds.) (2004). *Eliminación de contaminantes por fotocatálisis heterogénea*, CIEMAT, Madrid.
- Broekhuizen, P., Broekhuizen, F., Cornelissen, R., Reijnders, L. (2011). Use of nanomaterials in the European construction industry and some occupational health aspects thereof. *J. Nanopart. Res.*
- Brouwer, D., Duuren-Stuurman, B., Berges, M., Jankowska, E., Bard, D., Mark, D. (2009). From workplace air measurement results toward estimates of exposure? Development of a strategy to assess exposure to manufactured nano-objects. *J. Nanopart. Res.* 11, 1867–1881.
- Bruner, L.; Kozak, J. Z *Elektrochem. Agew. P.* 1911, 17, 354.
- Carp, O., Huisman, C.L., Reller, A. (2004). Photoinduced reactivity of titanium dioxide. *Progr. Solid State Chem.* 32, 33–177.
- CARTIF (2012). <https://www.cartif.es>.
- Cassar, L., Pepe, C., Tognon, G., Guerrini, G.L., Amadelli, R. (2003). *11th Congress on the chemistry of cement (ICCC) Vol. IV* (Durban, South Africa) p. 2012.
- Castellote Armero, M. (2015). Construcciones sanas para un entorno mejor: Calidad del aire interior y fotocatálisis en construcción. 2015. *Libro de Ponencias. Seminario 11*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. IETcc. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Catalysts 2023, 13(12), 1466; <https://doi.org/10.3390/catal13121466>.
- Catalysts 2013, 3(1), 189–218; <https://doi.org/10.3390/catal3010189>.
- Chai, Y., Lee, J., Kim, B. Photocatalytic Disinfection of *E. coli* in a Suspended TiO₂/UV Reactor. *Korean Journal of Chemical Engineering*, Volume 17, 2000, 633–637.

- Chen, J., Kou, S., Poon, C. (2011). Photocatalytic cement-based materials: Comparison of nitrogen oxides and toluene removal potentials and evaluation of self-cleaning performance. *Build. Environ.* 46, 1827–1833.
- Chen, J., Poon, C. (2009). Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. *Build. Environ.* 44, 1899–1906.
- Chen, J., Poon, C.S. (2009). Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. *Build. Environ.* 44, 1899–1906.
- Chen, Z., Liu, X., Wei, W., Chen, H., Ni, B. Removal of microplastics and nanoplastics from urban waters: Separation and degradation, *Water Research, Volume 221*, 2022, 118820.
- Chen, P., Yu, X., Zhang, J. Photocatalysis enhanced constructed wetlands effectively remove antibiotic resistance genes from domestic wastewater, *Chemosphere, Volume 325*, 2023, 138330.
- Chapter 5 – Air purification applications using photocatalysis, Editor(s): Rabah Boukherroub, Satishchandra B. Ogale, Neil Robertson, *In Micro and Nano Technologies, Nanostructured Photocatalysts, Elsevier, 2020*, Pages 99–128, ISBN 9780128178362. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817836-2.00005-3>.
- Chemical Photocatalysis; König, B., Kümmel, S., Cibulka, R., Ed.; De Gruyter, Berlin, Germany, 2013; pp 7–11.
- Chmielowiec-Korzeniowska A, Trawińska B, Tymczyńska L, Bis-Wencel H, Matuszewski Ł (2021) Microbial contamination of the air in livestock buildings as a threat to human and animal health—a review. *Ann Anim Sci* 21(2):417–431. <https://doi.org/10.2478/aoas-2020-0080>.
- Ciamician, G. *Science*, 1912, 36, 385.
- Comunidad de Madrid (2016). *Evaluación de las emisiones difusas mediante la utilización de captadores pasivos*. Instrucción técnica nº ATM-E-ED-07. https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/medio-ambiente/cma-mam-atm-e-ed-07_it_evaluacion_emisiones_difusas_mediante_captadores_pasivos-rev2.pdf.
- Crisenza, G.E.M.; Melchiorre, P. *Nat. Commun.* 2020, 11, 803.
- Cristal Global (2012). <https://argaamplus.s3.amazonaws.com/fd557b12-d62d-4e15-9c28-60004592a1e7.pdf>.
- Cruz-Ortiz, B. R., Hamilton, J. W. J., Pablos, C., Díaz-Jiménez, L., Cortés-Hernández, D. A., Sharma, P. K. Mechanism of photocatalytic disinfection using titania-graphene composites under UV and visible irradiation. *Chemical Engineering Journal, Volume 316*, 2017, 179–186.
- Dalton, J.S., Janes, P.A., Jones, N.G., Nicholson, J.A., Hallam, K.R., Allen, G.C. (2002). Photocatalytic oxidation of NO_x gases using TiO₂: a surface spectroscopic approach. *Environ. Pollut.* 120, 415–422.



- Delgado, G.C. (2010). Economics and governance of nanomaterials: potential and risks. *Technol. Soc.* 32, 137-144.
- Design of Advanced Photocatalytic Materials for Energy and Environmental Applications. Coronado, J.M., Fresno, F., Hernández-Alonso, M., Portela, R., Ed.; Springer-Verlag, London, England, 2013; pp 2-3.
- DGT (2012). Dirección General de Tráfico. <https://www.dgt.es/inicio/>.
- Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo. Calidad del aire.
- Domènech, X., Muñoz, J. Photochemical elimination of Cr(VI) from neutral-alkaline solutions. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Volume 47, 1990, 101-107.
- Doodeve, C.F.; Kitchener, J.A. *Trans. Faraday Soc.* 1938, 34, 902.
- Dunlop, P.S.M., Ciavola, M., Rizzo, L., McDowell, D., Byrne, J.A. *Effect of photocatalysis on the transfer of antibiotic resistance genes in urban wastewater, Catalysis Today*, Volume 240, Part A, 2015, Pages 55-60, ISSN 0920-5861.
- Dye, J. A., , Lehmann, J.R., McGee, J.K., Winsett, D.W., Ledbetter, A.D., Everitt, J.I., Ghio, A.J., Costa, D.L. (2001). Acute pulmonary toxicity of particulate matter filter extracts in rats: Coherence with epidemiologic studies in Utah valley residents. *Environmental health perspectives* 109(3), 395 -403.
- Dylla, H., Hassan, M.H. (2012). Characterization of nanoparticles released during construction of photocatalytic pavements using engineered nanoparticles. *J. Nanopart. Res.* 14, 825-840.
- EASHW (2012). European Agency for Safety and Health at Work. Risk Perception and risk communication with regard to nanomaterials in the workplace. European Risk Observatory.
- EC (2011). Commission Recommendation 2011. *Official Journal of the European Union*, 20.10.2011. 2011/696/EU, 18 October 2011. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reco/2011/696/oj>.
- ECHA: European Chemicals Agency. <https://chemicalsinourlife.echa.europa.eu/>.
- Eibner, A. *Chem-ZTG*, 1911, 35, 753.
- Farré, M., Sanchís, J., Barceló, D. (2011). Analysis and assessment of the occurrence, the fate and the behavior of nanomaterials in the environment. *Trends Anal. Chem.* 30, 517-527.
- Fresno, F., Villar-García, I.J., Collado, L., Alfonso-González, E., Reñones, P., Barawi, M., de la Peña O'Shea, V.A. (2018). Mechanistic View of the Main Current Issues in Photocatalytic CO₂ Reduction. *J. Phys. Chem. Lett.* 9, 7192, 7204.
- Front. Chem., 23 October 2020 Sec. *Catalysis and Photocatalysis* Volume 8 - 2020. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.551710>.
- Fujishima, A.; Honda, K. *Nature*, 1972, 238, 37.

- García-Muñoz, P., Allé, P., Bertoloni, C., Torres, A., de la Orden, M.U., Martínez Urreaga, J., Dziurla, M.A., Fresno, F., Robert, D., Keller, N. Photocatalytic degradation of polystyrene nanoplastics in water. A methodological study, *Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 10, Issue 4, 2022*, 108195.
- García-Muñoz, P., Fresno, F., Lefevre, C., Robert, D., Keller, N. Highly robust $\text{La}_{1-x}\text{Ti}_x\text{FeO}_3$ dual catalyst with combined photocatalytic and photo-CWPO activity under visible light for 4-chlorophenol removal in water, *Applied Catalysis B: Environmental, Volume 262, 2020*, 118310.
- Ghio, A.J., Devlin, R.B. (2001) Inflammatory Lung Injury after Bronchial Instillation of Air Pollution Particles. *Am. J. Respir. Crit. Care Med. 164*. 704–708.
- Gomez-Moreno, F.J., Pujadas, M., Artiñano, B., Moreno, N., Alastuey, A., Querol, X. (2004). Measurement of particulate matter emitted during bulk handling activities in a harbour area in Spain. *J. Aerosol Sci. 35*, S1001–S1002.
- Guerra-Rodríguez, S., Oulego, P., Rodríguez, E., Singh, D.N., Rodríguez-Chueca, J. Towards the Implementation of Circular Economy in the Wastewater Sector: Challenges and Opportunities. *Water, Volume 12, 2020*, 1431.
- Guerra-Rodríguez, S., Rodríguez, E., Rodríguez-Chueca, J. Pilot-scale regeneration of wastewater through intensified sulfate radical-based advanced oxidation processes (PMS/UV-A, PMS/ H_2O_2 /UV-A, and PMS/ O_3): Inactivation of bacteria and mechanistic considerations, *Chemical Engineering Journal, Volume 469, 2023*, 143859.
- Guo, L., Shan, C., Liang, J., Ni, J., Tong, M. Bactericidal mechanisms of Au@TNBs under visible light irradiation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, Volume 128, 2015*, 211–218.
- Guo, S., Wu, Z., Zhao, W. (2009). TiO_2 -based building materials: above and beyond traditional applications. *Chin. Sci. Bull. 54(7)*, 1137–1142.
- H. A. Foster, I. B. Ditta, S. Varghese, and A. Steele, "Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: Spectrum and mechanism of antimicrobial activity," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 90, no. 6, pp. 1847–1868, 2011, doi: 10.1007/s00253-011-3213-7.
- H. Cui et al., "Photocatalytic inactivation efficiency of anatase nano- TiO_2 sol on the H9N2 avian influenza virus," *Photochem. Photobiol.*, vol. 86, no. 5, pp. 1135–1139, 2010, doi: 10.1111/j.1751-1097.2010.00763.x.
- H. Nakamura, M. Tanaka, S. Shinohara, M. Gotoh, and I. Karube, "Development of a self-sterilizing lancet coated with a titanium dioxide photocatalytic nano-layer for self-monitoring of blood glucose," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 22, no. 9–10, pp. 1920–1925, 2007, doi: 10.1016/j.bios.2006.08.018.
- H. Wei et al., "The inactivation effect of photocatalytic titanium apatite filter on SARS virus," *Sheng*.



- Hangjuan Ren, Pramod Koshy, Wen-Fan Chen, Shaohua Qi, Charles Christopher Sorrell, Photocatalytic materials and technologies for air purification, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 325, 2017, Pages 340–366, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.072>.
- Hassan, M. M., Dylla, H., Mohammad, L. N., Rupnow, T. (2010). Evaluation of the durability of titanium dioxide photocatalyst coating for concrete pavement. *Constr. Build. Mater.* 24, 1456–1461. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.009.
- Hedstrand, D. M.; Kruizinga, W. M.; Kellogg, R. M. *Tetrahedron Lett.* 1978, 19, 1255.
- Hoerr R.A., Gupta A., Matuszewski M.J. (2009) Developing Practices for Safe Handling of Nanoparticles and Nanomaterials in a Development-Stage Enterprise: A Practical Guide for Research and Development Organizations. In: Webster T. (ed.) *Safety of Nanoparticles. Nanostructure Science and Technology*. Springer, New York, NY, pp 1–18.
- Howard, A. Foster, H.A., Ditta, I.B., Varghese, S. (2011). Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 90, 1847–1868.
- Hwangbo, M., Claycomb, E., Liu, Y., Alivio, T., Banerjee, S., Chu, K. Effectiveness of zinc oxide-assisted photocatalysis for concerned constituents in reclaimed wastewater: 1,4-Dioxane, trihalomethanes, antibiotics, antibiotic resistant bacteria (ARB), and antibiotic resistance genes (ARGs), *Science of The Total Environment*, Volume 649, 2019, 1189–1197.
- Hyunwoong Park, Yiseul Park, Wooyul Kim, Wonyong Choi, Surface modification of TiO₂ photocatalyst for environmental applications, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, Volume 15, 2013, Pages 1–20, ISSN 1389-5567, <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.10.001>.
- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Titanium Dioxide*. (2010) Vol. 93. Lyon (France). World Health Organization and International Agency for Research on Cancer.
- INE (2016) https://www.ine.es/prensa/essa_2016.pdf.
- ISO (2012). International Organization for Standardization, <https://www.iso.org/home.html>.
- ISO 22197-1/2007: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials —Part 1: Removal of nitric oxide.
- J. Cieniewicz and I. Jaspers, “Air pollution and respiratory viral infection,” *Inhal. Toxicol.*, vol. 19, no. 14, pp. 1135–1146, 2007, doi: 10.1080/08958370701665434.
- J. Kim and J. Jang, “Inactivation of airborne viruses using vacuum ultraviolet photocatalysis for a flowthrough indoor air purifier with short irradiation time,” *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 52, no. 5, pp. 557– 566, 2018, doi: 10.1080/02786826.2018.1431386.

- J. Li, B. Xie, K. Xia, Y. Li, J. Han, and C. Zhao, "Enhanced antibacterial activity of silver doped titanium dioxide-chitosan composites under visible light," *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 8, 2018, doi: 10.3390/ma11081403.
- Javan, K., Altaee, A.m BaniHashemi, S., Darestani, M., Zhou, J., Pignatta, G. A review of interconnected challenges in the water–energy–food nexus: Urban pollution perspective towards sustainable development, *Science of The Total Environment*, Volume 912, 2024, 169319.
- JCR 2012. JCR Reference Reports. Linsinger, T.P.J., Roebben, G., Gilliland, D., Calzolari, L., Rossi, F., Gibson, N., Klein, C. *Requirements on measurements for the implementation of the European Commission definition of the term "nanomaterial".* (2012).
- Jiménez-Relinque, E., Rubiano, F., Hingorani, R., Grande, M., Castillo, A., Nevshupa, R., Castellote, M. (2020). A New Holistic Conceptual Framework for Assessment of Photocatalytic Pavements Performance. *Front. Chem.*, en prensa, doi: 10.3389/fchem.2020.00743.
- Joseph, A., Vijayanandan, A. Review on support materials used for immobilization of nano-photocatalysts for water treatment applications. *Inorganica Chimica Acta Journal*, Volume 545, 2023, 121284.
- Kim KH, Kabir E, Jahan SA (2018) Airborne bioaerosols and their impact on human health. *J Environ Sci* 67:23–35. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.08.027>.
- Kouamé, A. N., Masson, R., Robert, D., Keller, N., Keller, V. *Catalysis Today*, Volume 209, 2013, 13–20.
- Ku, Y., Hsieh, C. B. Photodecomposition of 2,4-dichlorophenol in aqueous solution catalyzed by cadmium sulfide particles. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Volume 31, 1992, 1823–1826.
- L. Zan, W. Fa, T. Peng, and Z. kui Gong, "Photocatalysis effect of nanometer TiO₂ and TiO₂-coated ceramic plate on Hepatitis B virus," *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 86, no. 2, pp. 165–169, 2007, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2006.09.002.
- Lawryk, N.J., Wiesel, C.P. (1996). Concentrations of Volatile Organic Compounds in the Passenger Compartments of Automobiles. *Environ. Sci. Technol.* 30, 810.
- LED: light emitting diode. a) Akasaki, I. *Rev. Mod. Phys.* 2015, 87, 1119; b) Amano, H. *Rev. Mod. Phys.* 2015, 87, 1133; c) Nakamura, S. *Rev. Mod. Phys.* 2015, 87, 1139.
- Lee, J., Mahendra, S., Alvarez, P.J.J. (2009). Potential environmental and human health impacts of nanomaterials used in the construction industry. In: Bittnar, Z., Bartos, P. J. M., Němeček, J., Šmilauer, V., Zeman, J. (eds.) *Nanotechnology in Construction 3*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 1–14.
- Ley 34/2007 Calidad del aire.



- Li, C. Sun, W., Lu, Z., Ao X, Li, S., Wang, Z., Qi, F., Ismailova, O. Contribution of filtration and photocatalysis to DOM removal and fouling mechanism during in-situ UV-LED photocatalytic ceramic membrane process, *Water Research*, Volume 226, 2022, 119298, ISSN 0043-1354.
- M. Janus, E. Kusiak-Nejman, P. Rokicka-Konieczna, A. Markowska-Szczupak, K. Zajac, and A. W. Morawski, "Bacterial inactivation on concrete plates loaded with modified TiO₂ photocatalysts under visible light irradiation," *Molecules*, vol. 24, no. 17, 2019, doi: 10.3390/molecules24173026.
- M. Roser, H. Ritchie, and E. Ortiz-Ospina, "Coronavirus Disease (COVID-19) – Statistics and Research," 2020.
- M. V. Liga, E. L. Bryant, V. L. Colvin, and Q. Li, "Virus inactivation by silver doped titanium dioxide nanoparticles for drinking water treatment," *Water Res.*, vol. 45, no. 2, pp. 535–544, 2011, doi: 10.1016/j.watres.2010.09.012.
- Martín, I., Reñones, P., Rodríguez-Chueca, J., de la Peña O'Shea, V.A., Fresno, F., García-Muñoz, P. Independent and simultaneous photocatalytic decontamination and disinfection of water over In₂O₃/TiO₂ heterojunctions, *Catalysis Today*, Volume 426, 2024, 114397.
- Matthews, R. W. Purification of water with near-UV illuminated suspensions of titanium dioxide. *Water Research*, Volume 24, 1990, 653–660.
- Moradi, M., Naderi, A., Bahari, N., Harati, M., Rodríguez-Chueca, J., Kalantary, R.R., Visible-light-driven photocatalytic inactivation of Escherichia coli by titanium dioxide anchored on natural pyrite, *Inorganic Chemistry Communications*, Volume 144, 2022, 109913, ISSN 1387-7003.
- Maury, M.A., De Belie, N. (2010). State of the art of TiO₂ containing cementitious materials: self-cleaning properties. *Mater. Construcc.*, 60 (298) 33–50.
- Mauzerall, D.L., Wang, X. (2004). Characterizing distributions of surface ozone and its impact on grain production in China, Japan and South Korea: 1990 and 2020. *Atmos. Environ.* 38, 4383–4402.
- Melchionna, M.; Fornasiero, P. *ACS catal.* 2020, 10, 5493.
- Mills, A.; Hill, C.; Robertson, P.K.J. (2012) Overview of the current ISO tests for photocatalytic materials. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 237, 7–23.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Magrama. <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/aplicaciones.html#:~:text=Esta%20aplicaci%C3%B3n%20ofrece%20servicios%20de,lic%20y%20zepa%20entre%20otros.>
- Nanocare (2012) <http://www.nanocare-ag.com/>.
- Nanotechnology: Principles and Practices; Sulabha, K. K., Ed.; Springer Cham Heidelberg, New York, 2015.

- Nelson, N.; Ben-Shem, A. *Nat. Rev. Mol. Cel. Bio.* 2004, 5, 971; b) Dogutan, D. K.; Nocera, D. G. *Acc. Chem. Res.* 2019, 52, 3143.
- Núñez-Salas, R.E., Rodríguez-Chueca, J., Hernández-Ramírez, A., Rodríguez, E., Maya-Treviño, M. Evaluation of B-ZnO on photocatalytic inactivation of *Escherichia coli* and *Enterococcus* sp, *Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 9, Issue 1*, 2021, 104940, ISSN 2213-3437.
- Obee, .T.N., Brown, R.T. (1995). TiO₂ Photocatalysis for Indoor Air Applications: Effects of Humidity and Trace Contaminant Levels on the Oxidation Rates of Formaldehyde, Toluene, and 1,3-Butadiene. *Environ. Sci. Technol.* 29, 1223.
- Othani, B. (2011). Photocatalysis by inorganic solid materials: revisiting its definition, concepts, and experimental procedures. *Adv. Inorg. Chem.*, 63, 395.
- Olabarrieta, J., Zorita, S., Peña, I., Rioja, N., Monzón, O., Benguria, P., Scifo, L. (2012). Aging of photocatalytic coatings under a water flow: Long run performance and TiO₂ nanoparticles release. *Applied Catal. B: Environ.* 123-124, 182-192.
- Ostiguy, C., Soucy, B., Lapointe, G., Woods, C., Ménard, L., Trottier, M. (2008). *Health effects of nanoparticles*, 2nd edition. Studies and research projects, report R-58.
- Pichat, P. (2012) Solar energy conversion and photoenergy systems. Vol I- Solar Irradiation and TiO₂ *Render Materials Self-Cleaning*. <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C08/E6-106-14.pdf> (Consultado: Octubre 2012).
- Pope III, C.A., Dockery, D.W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 56, 709-742.
- Photochemistry and Photophysics; Balzani, V., Ceroni, P., Juris, A., Ed.; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, 2014; p 32.
- Photochemistry. Wayne, C. E., Wayne, R. P., Ed.; OXFORD UNIVERSITY PRESS, New York, USA, 1996.
- PHOTOPUR, 2024; Available at: <https://www.interreg-rhin-sup.eu>.
- Priyanka, K., Remya, N., Behera, M. Comparison of titanium dioxide-based catalysts preparation methods in the mineralization and nutrients removal from greywater by solar photocatalysis, *Journal of Cleaner Production, Volume 235*, 2019, Pages 1-10, ISSN 0959-6526.
- Proyecto ECO-SEE. <https://cordis.europa.eu/project/id/609234/es>.
- Proyecto LIFE EQUINOX. <https://www.cartif.es/life-equinox/>.
- Proyecto LIGHT2CAT. <https://cordis.europa.eu/project/rcn/102057/factsheet/en>; <https://www.facebook.com/Light2cat>



- Proyecto LIFE MINOX STREET <https://www.cartif.es/life-equinox/>, <https://www.ineco.com/ineco/proyectos/proyecto-life-minox-street>.
- Proyecto LIFE PHOTOCITYTEX. <http://photocitytex.eu/>.
- Proyecto LIFE+ PHOTOSCALING. <https://www.life-photoscaling.eu/>.
- Proyecto PICADA (2012). <https://technologycocoa.com/picada-project/>.
- Querol, X., Alatuey, A., Moreno, T., Viana, M., Casanova, J., Pérez, L., Sunyer, J., Künzly, N. (2006). Calidad del Aire Urbano, salud y Tráfico. Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera”, CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Fundación Gas Natural.
- R. J. Watts, S. Kong, M. P. Orr, G. C. Miller, and B. E. Henry, “Photocatalytic inactivation of coliform bacteria and viruses in secondary wastewater effluent,” *Water Res.*, vol. 29, no. 1, pp. 95–100, 1995, doi: 10.1016/0043-1354(94)E0122-M.
- R. Nakano et al., “Photocatalytic inactivation of influenza virus by titanium dioxide thin film,” *Photochem. Photobiol. Sci.*, vol. 11, no. 8, pp. 1293–1298, 2012, doi: 10.1039/c2pp05414k.
- Radhika V Nair et al 2022 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 55. 313003.
- Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de la calidad del aire.
- Reijnders, (2009). The release of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles from nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability* 94, 873–876.
- Richardson, J. T. (1989). *Principles of Catalysts Development*, Ed. Plenum Press.
- Rodríguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco D. y Saltiel, G. De residuo a recurso Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. Grupo Banco Mundial, 2020.
- Rodríguez-Chueca, J., Carbajo, J., García-Muñoz, P. Intensification of Photo-Assisted Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: A Critical Review. *Catalysts Volume 13*, 2023, 401.
- Rodríguez-Chueca, J., Giannakis, S., Senyuz, T., Decker, J., Oulego, P., Bensimon, M., Guillaume, T., Pulgarín, C. Sunshine and a pinch of tropical soils: A natural, low-cost photo-Fenton variation for safer water, assisted by H₂O₂ or percarbonate, *Separation and Purification Technology, Volume 321*, 2023, 124221.
- R.E. Lourenço, A.A Linhares, A. Vicente de Oliveira, M. Gomes da Silva, J. Gonçalves de Oliveira, M.C. Canela, Photodegradation of ethylene by use of TiO₂ sol-gel on polypropylene and on glass for application in the postharvest of papaya fruit, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24 (2017). 6047–6054.
- S. Moran, “Engineering science of water treatment unit operations,” in *An Applied Guide to Water and Effluent Treatment Plant Design*, 2018, pp. 39–51.

- Sakai, N., Fujishima, A., Watanabe, T., Hashimoto, K. (2003). Quantitative Evaluation of the Photoinduced Hydrophilic Conversion Properties of TiO_2 Thin Film Surfaces by the Reciprocal of Contact Angle. *J. Phys. Chem. B* 107, 1028–1035.
- Sandoval, M.A., Calzadilla, W., Vidal, J., Brillas, E., Salazar-González, R. Contaminants of emerging concern: Occurrence, analytical techniques, and removal with electrochemical advanced oxidation processes with special emphasis in Latin America, *Environmental Pollution, Volume 345*, 2024, 123397.
- Schulze, C., Kroll, A., Lehr, C.M., Schäfer, U.F., Becker, K., Schnekenburger, J., Isfort, C.S., Landsiedel, R., Wohleben, W., (2008). Not ready to use overcoming pitfalls when dispersing nanoparticles in physiological media. *Nanotoxicol.* 2, 51–61.
- Shen, S., Burton, M., Jobson, B., Haselbach, L. (2012). Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment. *Constr. Build. Mater.* 35, 874–883.
- Shim, J., Seo, Y., Oh, B., Cho, M. Microbial inactivation kinetics and mechanisms of carbon-doped TiO_2 (C- TiO_2) under visible light. *Journal of Hazardous Materials, Volume 306*, 2016, 133–139.
- Solar Photocatalysis for Environmental Remediation; Chakrabarti, S., Ed.; CRC Press Taylor & Francis Group, USA, 2019; pp 18–20.
- Som, C., Wick, P., Krug, H., Nowack, B. (2011). Environmental and health effects of nanomaterials in nanotextiles and façade coatings. *Environ. Int.* 37, 1131–1142.
- Spasiano, D., Marotta, R., Malato, S., Fernandez-Ibañez, P., Di Somma, I. Solar photocatalysis: Materials, reactors, some commercial, and pre-industrialized applications. A comprehensive approach, *Applied Catalysis B: Environmental, Volume 170–171*, 2015, 90–123.
- Sun, R., Nakajima, A., Fujishima, A. A., Watanabe, T., Hashimoto, K. (2001). Photoinduced Surface Wettability Conversion of ZnO and TiO_2 Thin Films. *J. Phys. Chem. B* 105, 1984–1990.
- T. An, H. J. Zhao, and P. K. Wong, *Advances in Photocatalytic Disinfection*. 2017.
- T. Daikoku et al., “Decomposition of organic chemicals in the air and inactivation of aerosol-associated influenza infectivity by photocatalysis,” *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 15, no. 4, pp. 1469–1484, 2015, doi: 10.4209/aaqr.2014.10.0256.
- T. Kato, H. Tohma, O. Miki, T. Shibata, and M. Tamura, “Degradation of norovirus in sewage treatment water by photocatalytic ultraviolet disinfection,” *Nippon Steel Tech. Rep.*, no. 92, pp. 41–44, 2005.
- T. von Woedtke and A. Kramer, “The Limits of Sterility Assurance,” *GMS Krankenhhyg. Interdiszip.*, vol. 3, no. 3, 2008.



- Tompkins, D.T., Zeltner, W. A., Lawnicki, B.J., Aderson, M.A. (2005). Evaluation of Photocatalysis for Gas-Phase Air Cleaning. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.* (<https://www.ashrae.org>) (Consultado Octubre 2012).
- Trommsdorff, H. *Ann. Pharm.* 1834, 11 (2), 190.
- Tsuji, J.S., Maynard, A.D., Howard, P.C., James, J.T., Lam, C., Warheit, D.B., Santamaria, A.B. (2006). Research strategies for safety evaluation of nanomaterials. Part IV: Risk assessment of nanoparticles. *Toxicol. Sci.* 89, 42–50.
- U.S. EPA (1998). Principles of Environmental Impact Assessment Review: Appendix D: Contents of Specific Environmental Impact Assessment Tools. [EPA, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos](#).
- UNI 11247/2010: Determinazione dell'indice di abbattimento fotocatalitico degli ossidi di azoto in aria da parte di materiali inorganici: metodo di prova in flusso continuo.
- Vu Khac Hoang Bui, Thanh Ngoc Nguyen, Vinh Van Tran, Jaehyun Hur, Il Tae Kim, Duckshin Park, Young-Chul Lee, Photocatalytic materials for indoor air purification systems: An updated mini-review, *Environmental Technology & Innovation, Volume 22, 2021, 101471, ISSN 2352-1864*, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101471>.
- W. A. Rutala and D. J. Weber, "Disinfection, sterilization, and antisepsis: An overview," *Am. J. Infect. Control*, vol. 44, no. 5, pp. e1–e6, 2016, doi: 10.1016/j.ajic.2015.10.038.
- Wang, N., Li, X., Yang, Y., Shang, Y., Zhuang, X., Li, H., Zhou, Z. Combined process of visible light irradiation photocatalysis-coagulation enhances natural organic matter removal: Optimization of influencing factors and mechanism, *Chemical Engineering Journal, Volume 374, 2019, Pages 748–759, ISSN 1385-8947*.
- Wang, Z., Zhuang, Q. Photocatalytic reduction of pollutant Hg (II) on doped WO₃ dispersion. *Journal of Photochemical and Photobiology A, Volume 75, 1993, 105–111*.
- Weir, A., Westerhoff, P., Fabricius, L. Hristovski, K., von Goetz, N. (2012). Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products. *Environ. Sci. Technol.* 46, 2242–2250.
- Wiesner, M.R., Lowry, G.V., Jones, K.L., Hochella, F.M., Di Giulio, R.T., Casman, E., Bernhardt, E.S. (2009). Decreasing uncertainties in assessing environmental exposure, risk, and ecological implications of nanomaterials. *Environ. Sci. Technol.* 43, 6458–6462.
- WHO, "Ambient (outdoor) air pollution." [Online]. Available: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [Accessed: 02-Dec-2020].
- X. Zheng, Z. peng Shen, C. Cheng, L. Shi, R. Cheng, and D. hai Yuan, "Photocatalytic disinfection performance in virus and virus/bacteria system by Cu-TiO₂ nanofibers under visible light," *Environ. Pollut.*, vol. 237, pp. 452–459, 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2018.02.074.

- XP B44-011:2009-12-01: Photocatalyse – Méthode d'essai pour l'évaluation des matériaux photocatalytiques vis-à-vis de la dégradation des NOx – Méthode à un seul passage en mode tangentiel.
- Xu, B., Jiang, K., Gan, Y., Zhang, K., Zhang, J., Luo, J., Xu, H., Chen, Z., Yang, W., Li, H., Lu, X. An integrated capacitive deionization and photocatalysis system for efficient ammonium removal from low-concentration wastewater, *Journal of Water Process Engineering*, Volume 58, 2024, 104912.
- Y. Yao, Y. Ohko, Y. Sekiguchi, A. Fujishima, and Y. Kubota, "Self-sterilization using silicone catheters coated with Ag and TiO₂ nanocomposite thin film," *J. Biomed. Mater. Res. – Part B Appl. Biomater.*, vol. 85, no. 2, pp. 453–460, 2008, doi: 10.1002/jbm.b.30965.
- Y. Cui et al., "Air pollution and case fatality of SARS in the People's Republic of China: an ecologic study," *Environ. Heal.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–5, 2003, doi: 10.1186/1476-069x-2-15.
- Y. Li, P. Leung, L. Yao, Q. W. Song, and E. Newton, "Antimicrobial effect of surgical masks coated with nanoparticles," *J. Hosp. Infect.*, vol. 62, no. 1, pp. 58–63, 2006, doi: 10.1016/j.jhin.2005.04.015.
- Yoneyama, H., Yamashita, Y., Tamura, H. Heterogeneous photocatalytic reduction of dichromate on n-type semiconductor catalysts. *Nature* Volume 282, 1979, 817–818.
- Yu-Wei Li, Wan-Li Ma, Photocatalytic oxidation technology for indoor air pollutants elimination: A review, *Chemosphere*, Volume 280, 2021, 130667, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130667>.
- Zhang, R., Bai, Y., Zhang, B., Chen, L., Yan, B. (2012). The potential health risks of titania nanoparticles. *J. Hazard. Mater.* 211–212, 404–413.
- Zhang Y, Hopke PK, Mandin C (eds) *Handbook of indoor air quality*. Springer, Singapore, pp 14–23. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5155-5_11-1.
- Zheng, X., Shen, Z., Cheng, C., Shi, L., Cheng, R., Yuan, D. Photocatalytic disinfection performance in virus and virus/bacteria system by Cu-TiO₂ nanofibers under visible light. *Environmental Pollution*, Volume 237, 2018, 452–459.
- <https://www.eea.europa.eu/publications/cooling-buildings-sustainably-in-europe>.
- <https://www.eea.europa.eu/publications/zero-pollution/health/air-pollution>.
- <https://iris.who.int/handle/10665/350495>.
- <https://www.eea.europa.eu/publications/healthy-environment-healthy-lives>.
- <https://www.eea.europa.eu/publications/status-of-air-quality-in-Europe-2022/europes-air-quality-status-2022/world-health-organization-who-air>.
- <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/rite.html>.

APÉNDICE

GUÍA de aplicación de materiales fotocatalíticos en activos del transporte, para la mejora de la calidad del aire.

1. INTRODUCCIÓN

Tres de los pilares principales de la transición energética requerida, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas para el año 2030, y también con las actuales políticas de "contaminación cero" de la U.E. son: la salud y el bienestar, la innovación en infraestructuras y la acción por el clima.

Por otro lado, en septiembre de 2021 la Organización Mundial de la Salud actualizó y redujo drásticamente los umbrales de salubridad ambiental máximos permitidos en espacios exteriores, debido a los graves efectos que provoca la mala calidad del aire en la salud de las personas. [1]

La mayor reducción se ha realizado sobre los *dióxidos de nitrógeno*, donde el umbral de seguridad considerado hasta el momento pasa de $40 \mu\text{m}/\text{m}^3$, a tan sólo 10. También los umbrales de las partículas en suspensión (contaminantes secundario procedentes de reacciones químicas a partir de la presencia de materiales gaseosos precursores, como los dióxidos de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x) o los compuestos orgánicos volátiles (COV)) han sufrido un considerable descenso, pues las $\text{PM}_{2,5}$ pasan de $10 \mu\text{m}/\text{m}^3$ a 5, y las PM_{10} pasan de $20 \mu\text{m}/\text{m}^3$ a 15.

Esta situación sugiere que la población afectada por la contaminación en nuestro país pase de 7 a 33 millones, lo que equivaldría a que alrededor del 70% de los españoles estarían respirando aire nocivo para la salud. [2]

En este sentido la "fotocatálisis" se ha relacionado mayoritariamente con la degradación de contaminantes (procesos de oxidación avanzados).

La fotocatalisis es una tecnología innovadora, aplicable sobre activos del transporte, tales como los pavimentos, los elementos de contención, los sistemas de drenaje superficial, los túneles, las estructuras, la señalización horizontal o los paramentos de las edificaciones de los centros de conservación, permite reducir las concentraciones de contaminantes habituales a los que la población está expuesta, tales como los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles, mejorando la calidad del aire respirable.

A modo de referencia, en las últimas operaciones de asfalto llevadas a cabo por el Ayuntamiento de Madrid, al menos el 30% de los pavimentos renovados ya son tratados con tecnología fotocatalítica, y se espera que, en los próximos años, los nuevos pavimentos del Ayuntamiento de Alcobendas (Madrid) sean fotocatalíticos al 100%. Por otra parte, por su capacidad de degradación orgánica, esta tecnología aplicada sobre superficies verticales

(túneles, estructuras, elementos de contención, etc.), les dota de carácter autolimpiante, manteniendo la estética inicial de la puesta en servicio, tal y como ha ocurrido ya a diferente escala, con cinco edificios de la Gran Vía de Madrid (España), por citar algunos ejemplos visibles. [3]

La tecnología fotocatalítica, también denominada coloquialmente descontaminante o autolimpiante a partir de materiales, puede aportar un valor añadido a los activos del transporte, por su carácter innovador y por el valor añadido que aportan a la sociedad, especialmente en tramos urbanos, periurbanos y travesías, donde la contaminación y sus efectos es más acuciante. Pueden ejecutarse en diferentes formatos y tipologías, que se tratarán en los apartados siguientes.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, es fácil enmarcar la fotocatalisis como una tecnología que puede ser útil para avanzar en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, y de "contaminación cero" de la U.E., ya que puede contribuir a la construcción de ciudades más sostenibles, a la lucha contra el cambio climático y a la mejora de la habitabilidad.

Este documento supone, por tanto, una síntesis de las conclusiones de todos los avances que se han realizado en materia de productos fotocatalíticos en los últimos años, en base a las lecciones aprendidas de las múltiples aplicaciones que se han llevado a cabo hasta el momento. A partir de las mismas se exponen en este documento unas recomendaciones de diseño, aplicación y seguimiento para su empleo en activos del transporte.

El objetivo es, por consiguiente, conocer esta tecnología y sus aplicaciones y poderla implementar cuando sea viable y efectiva.

2. FUNDAMENTOS BÁSICOS

La fotocatalisis es un proceso fotoquímico, donde a partir de la activación de un catalizador, instalado sobre la superficie de un elemento constructivo, por efecto de luz, se favorece la transformación de contaminantes existentes en la atmósfera, en sustancias más biodegradables.

El catalizador más empleado en la actualidad es el dióxido de titanio, que se obtiene a partir de procesos de manufacturación del rutilo o la anatasa.

Por tanto, la fotocatalisis se puede definir como una reacción de oxidación que se produce cuando una fuente de luz (natural o artificial) activa un catalizador en presencia de oxígeno.

La luz adecuada para activar cada fotocatalizador depende de las características específicas de éste. El dióxido de titanio, concretamente, se activa mediante luz UV-A. Este proceso propicia la mineralización total o parcial de determinados contaminantes y evita la acumulación de especies o partículas indeseables en el material sobre el que se aplica. Los materiales mineralizados, tras la reacción química, son habitualmente eliminados mediante agua de lluvia o limpiezas con agua y/o soluciones con desengrasantes a muy baja presión (tales como las operaciones de baldeo, por citar un ejemplo), sin necesidad de barrido previo.

3. MARCO NORMATIVO

El marco normativo legal europeo, la Directiva 2008/50/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, se ha traspuesto en España por el RD 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, modificado por el RD 34/2023, de 24 de enero, a partir del cual se establecen los umbrales máximos admisibles por tipo de contaminante, tanto a nivel diario, anual o umbrales de alerta. Estos valores fueron determinados tras la realización de estudios toxicológicos que demostraban una relación directa con altas hospitalarias motivadas por afecciones respiratorias o cardiovasculares. (Ver Figura 1.A)

Sin embargo, en los últimos años y tras varios estudios científicos, la OMS ha establecido que la contaminación ambiental es uno de los causantes del cáncer, de las enfermedades degenerativas, de la diabetes o de afecciones a los fetos de mujeres embarazadas, entre otros. [4]

Por este motivo, la OMS ha revisado los umbrales de aceptación de calidad del aire, que se deberían ir implantando paulatinamente, ya que esta es la causa de 7 millones de muertes prematuras cada año, en el mundo: [5], [1]

- Reduce la $[\text{NO}_2]$ de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Reduce las $[\text{PM}_{2.5}]$ de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Reduce las $[\text{PM}_{10}]$ de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Contaminante	Tiempo promedio	Meta intermedia				Nivel de las directrices sobre la calidad del aire
		1	2	3	4	
$\text{MP}_{2.5} \mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	35	25	15	10	5
	24 horas*	75	50	37,5	25	15
$\text{MP}_{10} \mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	70	50	30	20	15
	24 horas*	150	100	75	50	45
$\text{O}_3 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Temporada alta**	100	70	-	-	60
	8 horas*	160	120	-	-	100
$\text{NO}_2 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	40	30	20	-	10
	24 horas*	120	50	-	-	25
$\text{SO}_2 \mu\text{g}/\text{m}^3$	24 horas*	125	50	-	-	40
$\text{CO}, \text{mg}/\text{m}^3$	24 horas*	7	-	-	-	4

* Percentil 99 (es decir, 3-4 días de superación por año)

** Promedio de las concentraciones máximas diarias O_3 (medias octohorarias) en los seis meses consecutivos con la concentración media móvil de O_3 más alta

Figura 1.A: Niveles recomendados de las directrices sobre calidad del aire y metas intermedias de la OMS (2021).

VALORES DE REFERENCIA SEGÚN REAL DECRETO 34/2023

Contaminante	Valor límite horario. Periodo de promedio: 1 horas	Valor límite diario. Periodo de promedio: 24 horas	Valor límite anual. Periodo de promedio: 1 año civil	Nivel crítico. Periodo de promedio: 1 año civil
Dióxido de azufre	350 µg/m³ No podrá superarse en más 24 ocasiones por año.	125 µg/m³ No podrá superarse en más 3 ocasiones por año.		20 µg/m³ (1)
Dióxido de nitrógeno	200 µg/m³ No podrá superarse en más 18 ocasiones por año. (2)		40 µg/m³ (2)	30 µg/m³ (1)
Monóxido de carbono	10 mg/m³ Periodo de promedio: máxima diaria de las medidas móviles octohorarias.			
Benceno			5 µg/m³ (3)	
PM ₁₀ Partículas en suspensión <10 µm		50 µg/m³ No podrá superarse en más 35 ocasiones por año. (4)	40 µg/m³ (5)	
PM _{2,5} Partículas en suspensión <2.5 µm			20 µg/m³	
Plomo			0,5 µg/m³	
Contaminante	Umbral activación. Parámetro: promedio horario	Umbral de información. Parámetro: promedio horario	Umbral de alerta. Parámetro: promedio horario	
Dióxido de azufre	200 µg/m³	350 µg/m³	500 µg/m³ µg/m³ Cuando durante tres horas consecutivas exceda dicho valor cada hora.	
Dióxido de nitrógeno	180 µg/m³	200 µg/m³	400 µg/m³ Cuando durante tres horas consecutivas exceda dicho valor cada hora.	
PM ₁₀ Partículas en suspensión <10 µm	40 µg/m³	50 µg/m³	80 µg/m³	
PM _{2,5} Partículas en suspensión <2.5 µm	25 µg/m³	35 µg/m³	50 µg/m³	
Ozono	120 µg/m³	180 µg/m³	240 µg/m³	

(1) Solo se tomarán en consideración los datos obtenidos en las estaciones de medición definidas en el apartado II. B del anexo III del RD 34/2023.

(2) Margen de tolerancia: 50 % a 19 de julio de 1999, valor que se reducirá el 1 de enero de 2001 y, en lo sucesivo, cada 12 meses, en porcentajes anuales idénticos, hasta alcanzar un 0 % el 1 de enero de 2010. 50 % en las zonas y aglomeraciones en las que se haya concedido una prórroga de acuerdo con el artículo 23.

(3) Margen de tolerancia: 5 µg/m³ a 13 de diciembre de 2000, porcentaje que se reducirá el 1 de enero de 2006 y en lo sucesivo, cada 12 meses, en 1 µg/m³ hasta alcanzar un 0 % el 1 de enero de 2010.

(5) µg/m³, en las zonas y aglomeraciones en las que se haya concedido una prórroga de acuerdo con el artículo 23.

(4) Margen de Tolerancia: 50% mientras esté en vigor la exención de cumplimiento de los valores límite concedida de acuerdo con el artículo 23.

(5) Margen de Tolerancia: 20% en las zonas en las que se haya concedido exención de cumplimiento de acuerdo con el artículo 23.

Figura 2.A: Marco normativo legal español en materia de calidad ambiental en exteriores según el RD 34/2023.

4. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN (2011-2019)

Quizá la tecnología fotocatalítica más testada en carreteras hasta la fecha sea la que corresponde a los tratamientos superficiales aplicados sobre elementos constructivos, a partir de microemulsiones.

En España la **Asociación Ibérica de la Fotocatálisis**, creada en 2011, es una institución sin ánimo de lucro cuyo principal objetivo es el impulso de la investigación de la tecnología fotocatalítica y sus aplicaciones, la transferencia del conocimiento, la difusión y la regulación del mercado asociado al empleo de materiales fotocatalíticos, mediante la Certificación de Eficiencia de Producto. Desde esta asociación se han conducido diversos estudios y proyectos piloto a escala real en los últimos años, a través de grupos de trabajo de distintas infraestructuras.

En los últimos años en España se han llevado a cabo aplicaciones a gran escala y proyectos de investigación de larga duración, financiados o cofinanciados por la Unión Europea entre los años 2011 y 2019, donde los tratamientos superficiales sobre activos del transporte fueron algunos de los productos protagonistas. A continuación, se listan los proyectos más destacados:



1. Proyecto CDTi de Estudio, Diseño y Desarrollo de la Primera Tecnología Multiensayo de Pavimentos Descontaminante. [6]



2. Proyecto Villaverde (Madrid). [7]



3. Proyecto Light2CAT (Valencia). [8]



4. Proyecto LIFE - EQUINOX. [9]



5. Proyectos LIFE MINOX- STREET. [10]



6. Proyecto PHOTOSCALING. [11]

El objetivo fundamental de estas seis iniciativas era aumentar el conocimiento en el comportamiento de este tipo de aplicaciones, desde distintas ópticas: implicaciones en el comportamiento de los soportes sobre los que se aplica, resistencia al envejecimiento, resistencia a la abrasión del tráfico (sólo en el caso de los pavimentos), eficiencia descontaminante, y posibles efectos sobre la salud, entre otros, tal como se refiere en el Libro Blanco de la Fotocatálisis. [13]

5. CAMPOS DE APLICACIÓN

La importancia científica y tecnológica de la fotocatalisis está muy reconocida a día de hoy, al ser un proceso que permite llevar a cabo reacciones químicas a presión y temperatura ambiente, utilizando la luz como fuente de energía.

La eliminación de contaminantes en aire ha sido históricamente, junto con la del agua, la más investigada.

Cualquier elemento constructivo o activo de la infraestructura es susceptible de ser tratado con materiales fotocatalíticos, para colaborar como tratamiento pasivo en la mejora de la calidad del aire y/o en la autolimpieza del activo.

En términos de infraestructura del transporte, ya se han llevado a cabo tratamientos en los siguientes activos tanto a nivel internacional como en varias Administraciones públicas españolas:

- Pavimentos peatonales y de tráfico rodado.
- Cunetas.
- Elementos de contención.
- Túneles (antes de su aplicación se recomienda verificar la compatibilidad entre la longitud de onda de la luminaria existente y el fotocatalizador a emplear, mediante mediciones con radiómetro y ensayos de laboratorio con la Norma ISO 22197-1).
- Estructuras: Puentes y muros de contención (por citar algunos ejemplos).
- Envoltentes de edificación (interiores y exteriores): fachadas, cubiertas e interiores.
- Señalización horizontal y vertical.
- Paneles fotovoltaicos, como sistema de alimentación energético de un activo del transporte.

Desde el punto de vista de la mejora de la calidad del aire, los ámbitos de aplicación serían principalmente los tramos urbanos, periurbanos, travesías y todas aquellas vías que, por cualquier circunstancia, presenten niveles de contaminación por encima de los nuevos umbrales recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

A excepción de las superficies horizontales, tales como los pavimentos, desde el punto de vista de la conservación y el mantenimiento, cuando el objetivo de la aplicación sea el carácter autolimpiante, el ámbito de aplicación se abriría a todos los activos del transporte.

6. TIPOS DE APLICACIONES

La tecnología fotocatalítica, a través de la incorporación de materiales, es aplicable a todo tipo de elementos constructivos convencionales, bien sean manufacturados en planta de producción, o bien sea, mediante un tratamiento superficial *in situ*. Es decir, el uso de esta tecnología en la construcción presenta un valor añadido en todos los elementos constructivos sobre los que se aplica, pues les confiere propiedades colaboradoras en la mejora de la calidad del aire o autolimpiantes, dependiendo del objetivo para el que se formulen.

Por tanto, las aplicaciones de este tipo de tecnologías se pueden dividir en dos grandes grupos:



1. Las aplicaciones *in situ* sobre elementos constructivos convencionales a tratar, en forma de tratamientos superficiales. Estas a su vez, pueden dividirse en tres tipos:

- Las aplicaciones a partir de microemulsiones con base acuosa.
- Las aplicaciones a partir de pinturas o *coatings*.
- Las aplicaciones a partir de lechadas percoladas sobre pavimentos drenantes con base cemento.



2. Las aplicaciones en plantas de producción de elementos prefabricados: Piezas prefabricadas de hormigón (adoquines o losetas), cerámicas y fachadas de hormigón arquitectónico, GRC (hormigón ligero de fibra de vidrio) y UHPC (hormigón de ultra alta resistencia).

El tratamiento superficial que más habitualmente se emplea en estas aplicaciones, por el momento, es el formulado a partir de microemulsiones en base acuosa, por facilidad de aplicación, aprovechando la infraestructura existente.

Por tanto en el apartado siguiente se ha incluido una guía de diseño, aplicación y seguimiento, para mayor nivel de detalle, cuyas recomendaciones podrían hacerse extensibles también a pinturas y *coatings*. [\[13\]](#)



7. RECOMENDACIONES DE DISEÑO, APLICACIÓN Y SEGUIMIENTO DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS, A PARTIR DE MICROEMULSIONES CON BASE ACUOSA

7.1 DEFINICIÓN DEL TRATAMIENTO

Consiste en un tratamiento superficial que se aplica sobre elementos constructivos convencionales limpios y secos, y se formula a partir de una microemulsión con base acuosa, que incorpora un catalizador, el más común es el dióxido de titanio, con estructura nanométrica y una serie de aditivos que permitan que este quede anclado en el soporte, con una dotación mínima preestablecida, en seco, de fotocatalizador residual (g/m^2).

Puede también aplicarse sobre pavimentos, compuesto por ligantes bituminosos (mezclas bituminosas en caliente, semicalientes, templadas o en frío, siendo compatible con cualquier tipo de áridos o aditivos, tales como fibras, NFVU, promotores de adhesividad, polímeros, etc) o ligantes hidráulicos (losetas, adoquines, hormigón, etc), siempre y cuando el producto esté formulado para dichos soportes.

7.2 CRITERIOS BÁSICOS DE DISEÑO Y APLICACIÓN

En la fase de diseño se recomienda realizar los siguientes estudios previos:

a) Que el producto esté en posesión del Certificado de Eficiencia de Producto Fotocatalítico, que otorga la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (AIF), tras una revisión independiente llevada a cabo por cinco centros tecnológicos, públicos y privados, asociados a AIF. [12]

b) Caracterización de las fuentes de emisión contaminantes o necesidad de incorporación de elementos autolimpiantes. Se trata de identificar los contaminantes predominantes en la zona e, idealmente, cuantificar sus concentraciones estacionales, de manera que se pueda evaluar la idoneidad del tratamiento, con mediciones previas.

c) Identificación y análisis de gradientes de condiciones atmosféricas locales (temperatura, humedad relativa, vientos, precipitaciones, insolación, horas de exposición solar, etc.). Es conveniente, entre otros aspectos, buscar localizaciones con alta exposición solar, donde la radiación mínima sea de 8 W/m^2 y, en el mejor de los casos, la humedad relativa esté comprendida entre el 20 y el 90%.

d) Identificar las características geográficas y topográficas. La situación geográfica de una zona y su relieve influyen en la dispersión o acumulación



Figura 3.A: Certificado de Eficiencia Fotocatalítica de Producto.

de contaminantes. La topografía de la zona, por su parte, podría favorecer los procesos de inversión térmica, que podría dificultar, en determinados periodos, la dispersión de contaminantes.

e) Definir el objetivo del tratamiento. Normalmente el fin fundamental es la colaboración en la mejora de la calidad del aire, o el efecto autolimpiante, pero podría tener también un propósito desinfectante (bactericida o viricida), si se aplicara en espacios interiores y se formulara a tal fin.

f) Reconocer, analizar e investigar, en su caso, la naturaleza y el estado del soporte sobre el que se pretende aplicar el tratamiento. Es importante destacar que este tipo de tratamientos no se deben efectuar sobre soportes sucios y/o en mal estado (fisurados, pulidos, deslizantes, mal regularizados, deformados, con presencia de desprendimientos de materiales, coqueras, baches, etc.). Se debe identificar el tipo de elemento constructivo sobre el que se va a aplicar el tratamiento y, en su caso, analizar sus características superficiales (por ejemplo, en el caso de pavimentos es recomendable evaluar su textura, coeficiente de resistencia al deslizamiento, volumen de huecos o pH).

g) Selección del material fotocatalítico. Este es uno de los condicionantes más críticos, pues se recomienda que el producto sea objeto de los siguientes ensayos de caracterización, que indicarán la idoneidad del mismo, antes de su aplicación en obra:

i) Determinación de la dotación óptima en seco y en húmedo. Es importante destacar que este parámetro puede variar, dependiendo del fabricante y del tipo de sustrato sobre el que se vaya a aplicar. A modo de referencia y basado en experiencias recientes, se recomienda que la dotación de fotocatalizador en seco sea como mínimo de 30 g/m² y en húmedo de 100 g/m².

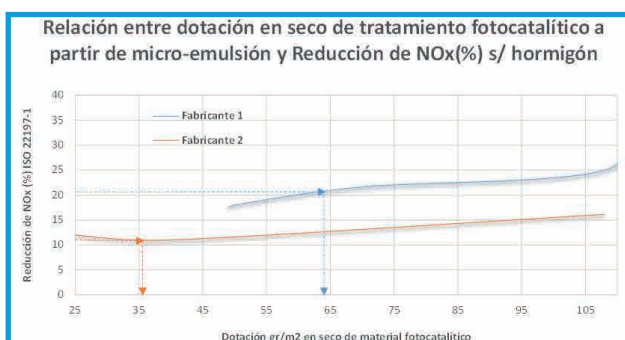


Figura 4.A: Relación entre dotaciones en seco, es decir, de fotocatalizador residual, y eficiencias descontaminantes de varios fabricantes, aplicados sobre un sustrato de hormigón.

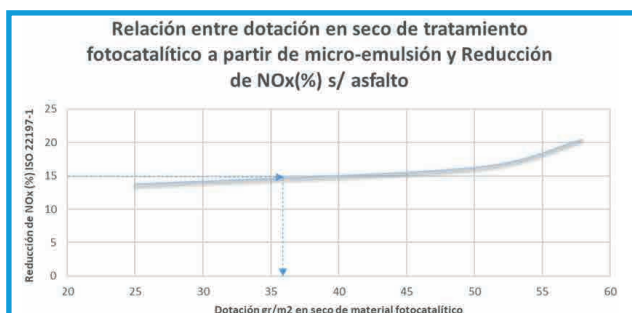


Figura 5.A: Relación entre dotaciones en seco, es decir, de fotocatalizador residual, y eficiencias descontaminantes de varios fabricantes, aplicados sobre un sustrato bituminoso con granulometría discontinua.

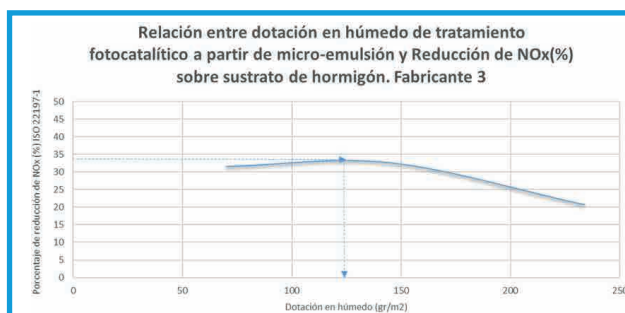


Figura 6.A: Relación entre dotaciones en húmedo, es decir, de micro-emulsión en base acuosa, y eficiencias descontaminantes de un fabricante genérico del mercado, aplicado sobre un sustrato de hormigón.

ii) Ensayos de determinación de la capacidad descontaminante, mediante la Norma ISO 22197-1:2012 y la UNE 127197-1:2013.

iii) Ensayos de saturación acelerada, para evaluar su durabilidad en el tiempo, a partir de la Norma ISO 22197-1:2012.

iv) Ensayos de capacidad de regeneración, tras ensuciamiento o saturación por nitritos y nitratos, a partir de la Norma ISO 22197-1:2012 y la UNE 127197-1:2013.

v) Ensayos de autolimpieza, mediante la Norma ISO 27448:2009, cuando el tratamiento se realice sobre activos del transporte distintos de pavimentos, tales como elementos de contención, señalización, revestimiento de túneles, estructuras, paneles fotovoltaicos, etc.

vi) Ensayos de grado de adherencia al soporte, tomando como referencia la Norma UNE EN 1542:2000.

vii) Ensayos de resistencia al envejecimiento, tras 1.500 horas de exposición a la intemperie, mediante la Norma ISO 22197-1:2012 o la UNE 127197-1:2013, para estimar la evolución de la eficiencia fotocatalítica en el tiempo.

viii) Ensayos de lixiviación *in situ*, para evaluar la movilización de partículas de titanio, nitritos y nitratos, a partir de tomas de muestras de agua procedente de sistemas de recogida de pluviales.

h) Realización de un **tramo de prueba** a escala real, donde se analice la reproducción de las dotaciones de fotocatalizador residual previamente establecidas, así como su comportamiento en relación a la mejora de la calidad del aire, conseguida en los ensayos previos de caracterización en laboratorio. Cuando la aplicación se realice sobre pavimentos, será igualmente recomendable analizar la textura superficial y el CRT de los acabados conseguidos en esta fase, sabiendo que los resultados óptimos de este último parámetro, se conseguirían tras varios meses desde la apertura al tráfico, tal y como ocurre con las rodaduras convencionales.

i) **Cumplimiento y verificación de los procesos de aseguramiento de la calidad del propio fabricante**, desde la adquisición del catalizador en el mercado, hasta la aplicación en obra, pasando por el proceso de producción en planta.

j) **Definir las limitaciones de la aplicación**, en lo que respecta a condiciones ambientales en fase de obra. Estos tratamientos no pueden realizarse en presencia de condiciones atmosféricas adversas, tal y como ocurriría en una obra civil o de edificación convencional, es decir, evitando por completo la aplicación con lluvia, nieve o hielo, fuertes vientos, o con temperaturas por debajo de los 5 °C, o por encima de los 40 °C.

k) **Definir las operaciones de mantenimiento y su frecuencia** en el tiempo, especialmente sobre elementos constructivos horizontales. Cuando el tratamiento fotocatalítico es sometido a altas concentraciones de contaminantes, especialmente de NOx, o se han producido periodos prolongados

sin precipitaciones en la zona, el catalizador puede llegar a desactivarse, debido a fenómenos de nitrificación de la superficie del pavimento, o por ensuciamiento (bloqueando el acceso del catalizador con la luz solar). En ambos casos, mediante un adecuado mantenimiento, es factible recuperar la actividad descontaminante de los materiales fotocatalizadores. Este consistiría simplemente en lavados con agua, pero sin maquinaria barredora (ya que esta es extremadamente abrasiva con el tratamiento aplicado), mediante operaciones de baldeo y/o el empleo de soluciones con desengrasantes habituales para fines similares. Pero, en cualquier caso, es importante **definir un protocolo de lavados periódicos**. Se recomienda que, a falta de otras indicaciones del fabricante, y en ausencia de lluvias, se realicen cada dos semanas, en el caso de aplicación sobre activos horizontales.

I) Definir las operaciones de seguimiento de actividad descontaminante. Los tratamientos fotocatalíticos se prestan a ser objeto de seguimiento en el tiempo, para poder evaluar su capacidad descontaminante o autolimpiante a lo largo de los años. Si bien, para realizar esta actividad es importante que en los proyectos se reserven recursos económicos para llevarlos a cabo. Las operaciones de seguimiento y su frecuencia han de ser diseñadas con anterioridad e incluidas en el proyecto. Estas pueden estar basadas en:

- La medición *in situ* con estaciones de calidad del aire portátiles, previamente calibradas con estaciones de calidad del aire oficiales.
- La instalación de elementos de instrumentación y control *in situ*, mediante muestras testigo, embebidas en el soporte de aplicación, previamente a la ejecución de los tratamientos superficiales, y con dimensiones de 10 x 5 cm en planta.
- El análisis en laboratorio de muestras extraídas de obra, como testigos, que deberán ser tallados posteriormente en laboratorio, hasta obtener probetas prismáticas de las dimensiones anteriormente comentadas.

De las lecciones aprendidas hasta la fecha, en los numerosos proyectos LIFE llevados a cabo, se recomienda evitar la extracción de testigos en obra, debido al efecto adverso que le genera este al tratamiento fotocatalítico, durante la fase de extracción y posterior manipulación, pues de lo contrario se corre el riesgo de obtener resultados de baja representatividad tras el análisis en laboratorio de las probetas talladas. [12]

7.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Los pliegos de prescripciones técnicas particulares conocidos hasta el momento de algunas licitaciones públicas de aplicaciones fotocatalíticas sobre activos del transporte, establecen algunos de los siguientes requerimientos:

1- Producto incoloro.

2- Declaración de cumplimiento de eficiencia fotocatalítica, mediante el ensayo ISO 22197-1:2012 o el UNE 127197-1:2013, mínima del 4% de abatimiento de NOx.

3- Que el producto esté en posesión del Certificado de Eficiencia Fotocatalítica en vigor, que otorga la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis.

Adicionalmente, se recomienda incluir en los PPTP:

1- La **dotación mínima en seco** (de fotocatalizador residual) tras la aplicación de la microemulsión fotocatalítica, y también en húmedo en g/m². **Ver apartado 7.2.g.i del apéndice.**

2- La obligatoriedad de **limpieza del soporte con aire y/o agua a presión**, antes del tratamiento fotocatalítico. Cualquier soporte sucio y/o húmedo impide una buena adherencia del catalizador, disminuyendo drásticamente su durabilidad.

7.4 EJECUCIÓN

Al tratarse de un producto premezclado y listo para su aplicación, se debe tener en consideración:

- La naturaleza y características del soporte.
- La dotación en húmedo y en seco de fotocatalizador residual previamente establecida.

Su aplicación se lleva a cabo mediante una maquinaria autopropulsada específica, dotada de un sistema automático de pulverización, cuyo caudal varía en función de la velocidad de avance de la maquinaria. También se podría aplicar manualmente mediante equipo tipo "Airless" o similar, cuando la superficie de aplicación sea reducida.

La aplicación siempre debe de estar controlada, idealmente a nivel de dotación o caudal y presión.

En el caso de los firmes, la aplicación sobre la rodadura se puede ejecutar mediante dos técnicas **en frío**:

1- Sobre elementos constructivos convencionales nuevos. En el caso de pavimentos bituminosos de nueva ejecución, se debe aplicar tras dejar pasar al menos tres meses desde la apertura al tráfico, o hasta cuando se elimine el betún sobrante, para que el material quede bien anclado al árido.

2- Sobre elementos constructivos existentes, siempre y cuando se realice previamente una exhaustiva limpieza con aire y agua a presión (aunque el elemento constructivo o soporte ha de estar seco antes de la aplicación), y se respeten los tiempos de secado del producto antes de su puesta en servicio. Es recomendable realizar la aplicación por la noche, con objeto de evitar afecciones a los usuarios.

7.5 CONTROL DE CALIDAD

7.5.1 Métodos de evaluación de eficiencia descontaminante

7.5.1.1 Ensayos de laboratorio

Las normas españolas vigentes, referidas a ensayos de laboratorio para la determinación de niveles de abatimiento de óxidos de nitrógeno, son las siguientes:

- Norma española UNE ISO 22197-1:2012: Cerámicas técnicas (cerámicas avanzadas, cerámicas técnicas avanzadas). Método de ensayo relativo al funcionamiento de materiales fotocatalíticos semiconductores para la purificación del aire. Parte 1: eliminación de óxido nítrico.
- Norma española UNE 127197-1:2013. Aplicación del método de ensayo para evaluar el rendimiento en la purificación de aire mediante materiales semiconductores fotocatalíticos embebidos en productos prefabricados de hormigón. Parte 1: Eliminación de óxidos de nitrógeno. Esta norma es una adaptación de la ISO 22197- 1, con la diferencia del establecimiento de una jerarquía de clases, en función de su eficiencia descontaminante, y sólo para productos prefabricados de hormigón. Sin embargo, a falta de un protocolo claro de actuación, la aplicación de esta norma se ha extrapolado para evaluar todo tipo de productos fotocatalíticos, con independencia de los materiales que lo componen. A partir de la Norma UNE 127197-1:2013 se establece la siguiente clasificación de producto según el rendimiento de la purificación de aire NOx en prefabricados de hormigón:

Tabla 1.A
Clasificación de producto según la Norma UNE 127193-1: 2013

Clase	Rendimiento de la purificación del aire NOx
Clase 0 – sin actividad	$\chi_{NOx} < 4,0\%$
Clase 1	$4,0\% \leq \chi_{NOx} \leq 6,0\%$
Clase 2	$6,0\% < \chi_{NOx} \leq 8,0\%$
Clase 3	$\chi_{NOx} > 8,0\%$

- Norma española UNE EN 16980-1:2022: Métodos de ensayo de flujo continuo. Parte 1: Determinación de la degradación del óxido nítrico (NO) en el aire mediante materiales fotocatalíticos. Esta norma especifica un método para evaluar el rendimiento de los materiales inorgánicos fotocatalíticos contenidos en morteros de cemento y/o cales o matrices en base cerámica, pinturas o materiales depositados como películas delgadas o recubrimientos en una variedad de sustratos para la reducción fotocatalítica de óxido nítrico en la fase gaseosa.

No obstante, como las aplicaciones fotocatalíticas son muy diversas, a continuación se resumen en un listado las normas internacionales (fundamentalmente las normas JISR japonesas, que es el país del mundo más avanzado en fotocatálisis) empleadas para evaluar su actividad en exteriores:

Capacidad	Método de ensayo	(Aplicaciones en exteriores)	
		Nº. Nacional	Nº. Internacional
Autolimpieza	Cambio ángulo contacto con el agua	JISR 1703-1:2007	ISO 27448-1:2010
	Azul de metileno	JISR 1703-2:2007	ISO 10678:2010
	Rodamina B	UNI 11259:2008	
Purificación del aire	Eliminación NOx	JISR 1701-1:2010	ISO 22197-1:2016 y CEN/ TS 16980-1
		UNI 11247:2010	
		UNI 11484:2013	
		XP B 44-011:2009	
	Eliminación VOCs	UNI 11238-1:2007	
		UNI 11238-2:2007	
		XP B 44-013	
	Acetaldehído	JISR 1701-2:2008	ISO 22197-2:2011 (actualmente en revisión)
	Tolueno	JISR 1701-3:2007	ISO 22197-3:2011 (actualmente en revisión)
	Formaldehído	JISR 1701-4:2008	ISO 22197-4:2013
	Metil-mercaptano		ISO 22197-5:2013
	Cámara de ensayo		
	Antialga		ISO 19635:2016
	Oxígeno disuelto		ISO 19722:2017
	Carbono orgánico total		CD 22601 (propuesta 2017)
	Película de tinta		ISO 21066:2018

Por último, cabe mencionar que el CEAM (Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo) posee la Cámara Euphore, semiesfera que permite reproducir la contaminación ambiental de cualquier punto de una ciudad o entorno y realizar análisis de eficiencia fotocatalítica a escala 1:1. [12]

7.5.1.2 Sistemas de evaluación *in situ*

Con el objetivo de determinar el efecto descontaminante de los productos fotocatalíticos aplicados sobre activos del transporte, más allá de los ensayos de laboratorio, se han desarrollado varias modalidades de ensayos de medidas *in situ*, que no poseen ningún tipo de certificación (ambiental, calidad, etc.), ni se encuentran amparados por ningún marco legal, pero que permiten conocer el funcionamiento de estos productos, así como su eficacia a lo largo del tiempo, sin necesidad de afectar a la integridad del elemento constructivo (es decir, sin necesidad de extraer testigos).

En este sentido empresas de ingeniería, pioneras en el sector de la fotocatálisis como Eptisa, Servicios de Ingeniería, o centros tecnológicos de referencia, como el Instituto Eduardo Torroja (IETcc- CSIC), han desarrollado equipos de evaluación *in situ* de la capacidad descontaminante de productos de construcción.

Alternativamente a estos métodos de control, existe la posibilidad de controlar la actividad descontaminante o autolimpiante *in situ*, a lo largo del tiempo, mediante el empleo de muestras testigo normalizadas de dimensiones



Figura 7.A: Colocación de muestras testigo sobre New Jersey de Autovía de Los Llanos (Izda.) y arcén de Autopista C-31 (Dcha.). Fuente: Eptisa.

en planta 10 cm x 5 cm y 1 cm de espesor, del mismo material sobre el que se vaya a aplicar el tratamiento fotocatalítico, sobre cualquier tipo de superficie, de manera que las muestras queden embebidas o colocadas sobre la superficie a tratar, antes de la aplicación. Serán estas muestras las que, una vez tratadas con materiales fotocatalíticos, se lleven a ensayar de manera normalizada a laboratorio, a partir de la Norma UNE ISO 22197-1:2012 o la UNE 127197-1:2013, permitiendo estimar el grado de mejora de calidad del aire a lo largo del tiempo. [12]

Sin embargo, hay que tener en consideración que este último método de control *in situ* alternativo, tiene las siguientes limitaciones de cara a la interpretación de resultados:

- La manipulación de las probetas, desde el periodo de fabricación, hasta la finalización del seguimiento. Es posible que durante las operaciones de fabricación de las probetas (fabricación de probeta de ensayos de resistencia a las deformaciones permanentes y tallado de muestras de dimensiones 10x5x1 cm en laboratorio), los envíos del laboratorio a obra (para la fase de obra, antes del tratamiento), los envíos de obra al laboratorio (para la realización de los ensayos de seguimiento), y los envíos de este de nuevo a obra (para futuras

nuevas recogidas y seguimiento a lo largo del tiempo), se pueda producir algún tipo de deterioro o rotura en las dimensiones de la probeta, que haya afectado al resultado de eficiencia final. Teniendo en cuenta las reducidas dimensiones de las probetas, cualquier pérdida de arido o rotura de esquina, durante el proceso, tiene un impacto adverso muy significativo en la dotación de fotocatalizador y, también, en los resultados finales obtenidos.

- Las concentraciones de monóxido de nitrógeno que se producen a escala real son aproximadamente 2 órdenes de magnitud inferiores a las que se introducen en la unidad de dilución del ensayo normalizado de laboratorio, lo cual, sumado a las pequeñas dimensiones de las probetas asociadas a dicho ensayo, hacen que los resultados de laboratorio no puedan ser comparables con los obtenidos a escala real, mediante medidas directas como estaciones de calidad del aire, por citar un ejemplo.

7.5.1.3 Métodos de medición directa

Para la evaluación del impacto de la actividad de materiales fotocatalíticos *in situ*, en la mejora de la calidad del aire, se pueden emplear diversos métodos de medición directa de la concentración de NO_2 u otros contaminantes en aire. Las concentraciones de NO_2 sería el parámetro mínimo que habría que analizar. Hay que decir también, que es el que resulta más sencillo y barato en términos de monitorización. Entre los métodos existentes para la medida de NO_2 en campo se pueden destacar, el método oficial, a partir de las estaciones de medición de calidad del aire de la Administración pública, la instalación de sensores, analizadores o estaciones móviles de calidad del aire, los captadores pasivos y los sensores de bajo coste.

La medida de NO_2 , siguiendo el método oficial, que es el que se emplea en las estaciones públicas de vigilancia de calidad del aire que tienen las ciudades y otras administraciones, requiere de equipos y procedimientos que resultan muy costosos para evaluar la eficiencia de un material fotocatalítico. Las estaciones oficiales no se pueden emplear para evaluar productos fotocatalíticos por la funcionalidad que tienen, pero se podrían utilizar como elemento de calibración, si fuera necesario.

La razón fundamental es que si la cuantía de la superficie del activo tratada fotocatalíticamente no es suficientemente representativa, es altamente complicado que una Estación de Calidad del Aire, situada a varios kilómetros, sea capaz de detectar los efectos de esa aplicación, salvo que la densidad de la superficie de aplicación sea muy elevada, acercándose al concepto de "Isla Fotocatalítica" y, además, la estación de vigilancia se localice en las cercanías del centro de gravedad de la superficie aplicada.

Alternativamente, existen en el mercado unidades de medición compactas de evaluación de calidad del aire, con distinta tecnología, pero con un nivel de fiabilidad muy elevado. Si bien, se recomienda que se calibren previamente con las anteriores (método oficial), para garantizar su representatividad y validez. Esta solución supone un menor coste, proporcionando un nivel de fiabilidad muy elevado. Estas estaciones permiten el seguimiento, además de la concentración de NO_2 , de la concentración

de NO , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} e incluso de O_3 . Se pueden incluir también el registro de los datos meteorológicos en la zona. Estos parámetros se pueden emplear para completar los estudios del impacto del tratamiento fotocatalítico en la calidad del aire. Asimismo, con este método se dispone de una resolución temporal muy alta, típicamente 1.015 minutos, que permite analizar la evolución diaria de las concentraciones de los parámetros de interés.

Por otra parte, el procedimiento pasivo de captación de NO_2 tiene su fundamento

en los fenómenos de difusión y permeación (Comunidad de Madrid, 2016). De esta forma, las moléculas de un gas, que están en constante movimiento, son capaces de penetrar y difundirse espontáneamente a través de la masa de otro gas, hasta repartirse uniformemente en su seno. En el difusor pasivo se produce un gradiente de concentraciones del contaminante a determinar entre la concentración en el ambiente exterior y la concentración nula de este contaminante en el aire interior del agente absorbente. Este gradiente de concentraciones es la fuerza que mueve, por difusión, al contaminante desde el ambiente exterior, a través del captador, hasta llegar al absorbente.

El nivel de precisión de esta técnica no es muy alto y se suele recomendar la instalación de un número elevado de captadores. Por otro lado, no permite tener una resolución temporal detallada, ya que la periodicidad de sus datos es muy baja, normalmente mensual. Su principal ventaja es que se trata de un sistema más barato y más sencillo de analizar.

Los denominados “sensores de bajo coste” suponen una alternativa intermedia entre las formas de medición anteriores. Estos sensores permiten una resolución temporal muy alta pero la fiabilidad y la sensibilidad de la información que proporcionan no alcanza a la del método oficial. Sin embargo, para este tipo de ensayos pueden ser adecuados buscando localizaciones con altos niveles de NO_2 .

Existen varios dispositivos en el mercado que pueden emplearse para la monitorización de la zona de ensayo. El número de dispositivos necesarios dependerá de la superficie y de la metodología elegida para llevar a cabo la evaluación.

A modo de resumen, en relación a la metodología a emplear para realizar la evaluación del impacto, debido a la aplicación de materiales fotocatalíticos en un área determinada, el objetivo principal es identificar cambios en la concentración de NO_2 por parte de estos materiales, en series temporales de datos que están influenciados además por otros factores -como los meteorológicos y el tráfico- que tienen una mayor influencia. Por este motivo, para trabajos en campo se intenta acercar lo máximo posible, los equipos de medida a la superficie fotocatalítica.



Figura 8.A: . Estación de calidad del aire instalada en la Autopista C-31 para seguimiento de eficiencia fotocatalítica. Fuente: Fundación Cartif.

Cuando se plantee la elección y el diseño del método de medición, lo primero que hay que tener en cuenta es que con independencia del sistema que elija, se recomienda tener un lugar que sirva de referencia, a modo de comparación con el tramo o zona tratada fotocatalíticamente. Este tramo se define como un tramo de características similares al de ensayo, pero en el que no se aplica el tratamiento o se instala el producto fotocatalítico. Además, es muy recomendable instalar los sensores, tanto en la zona de referencia como en la zona de tratamiento, un tiempo antes de la aplicación del tratamiento fotocatalítico, de forma que se pueda establecer una equivalencia entre ambos.

En relación al análisis de la información registrada para la discusión de los resultados, básicamente se compararán las concentraciones de contaminante en los distintos tramos. Adicionalmente, el análisis se puede completar incluyendo la influencia de la meteorología durante el estudio (particularmente del viento y de la lluvia), del tráfico, si se dispone de la información necesaria, de la variación diaria entre los distintos tramos de estudio, de la influencia de las horas de luz en las distintas estaciones, etc. Asimismo, si se dispone de la información necesaria, se puede completar el estudio empleando como referencia las concentraciones del resto de los contaminantes principales medidos, PM y O₃.

En definitiva, se recomienda diseñar una adecuada metodología de monitorización e incorporarla en los pliegos de prescripciones técnicas de los proyectos, si lo que se pretende es evaluar la eficiencia descontaminante de este tipo de materiales fotocatalíticos en el tiempo. [13]

7.5.1.4 Modelos de predicción

Además de los métodos disponibles comentados anteriormente que requieren una monitorización específica, se puede emplear modelado para estimar el impacto que tendría la aplicación de productos fotocatalíticos en una zona determinada.

Existen varios estudios en los cuales se han empleado desde software comerciales, hasta modelos avanzados de mecánica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés).

La utilización de estos métodos requiere tanto medios como experiencia para poder tener unos resultados con un cierto grado de fiabilidad. Aunque pueden ser adecuados para estimar el impacto que pueden tener estos materiales en la calidad del aire sin implementaciones en campo, hay que asumir aún considerables grados de incertidumbre asociados a los propios modelos y a la información de entrada. [13]

7.5.1.5 Certificación

En paralelo con la creciente demanda del mercado de este tipo de soluciones, han proliferado fabricantes que comercializan soluciones fotocatalíticas fraudulentas (sin actividad), según los estudios de laboratorio realizados por empresas de ingeniería y organismos públicos de investigación durante la última década. Esta situación ha

generado cierta confusión en el sector, que ha perjudicado la imagen de compañías responsables que han invertido muchos recursos en obtener un producto fotocatalítico de calidad.

Para combatir este fraude y regular el mercado, la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis ha elaborado un Certificado de Eficiencia de Producto Fotocatalítico, en vigor desde 2014, que sólo se otorga a todos aquellos productos fotocatalíticos que demuestren, mediante un ensayo normalizado realizado por un laboratorio independiente a la propia empresa y revisado por el comité científico-técnico de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (formado por seis centros tecnológicos públicos y privados), que el material tiene actividad fotocatalítica.

A día de hoy, ya hay Administraciones públicas españolas que incluyen este requerimiento dentro de los pliegos de licitación. [12]

7.5.2 Recomendaciones finales sobre el control de calidad

A la luz de todo lo comentado en apartados anteriores y a modo de síntesis, antes de incorporar un material fotocatalítico en activos del transporte, en primer lugar, se recomienda la solicitud del Certificado de Eficiencia de Producto.

En segundo lugar, y de cara a diseñar el contenido óptimo de catalizador, es recomendable realizar un estudio de sensibilidad, que permita establecer su dotación óptima en seco (de fotocatalizador residual), en función de los objetivos de descontaminación perseguidos, para posteriormente realizar los ensayos de caracterización recomendados en el [subapartado 7.2.g](#).

El control de calidad de este tratamiento debe estar presente durante todo el proceso, siendo los parámetros claves, la eficiencia fotocatalítica, la adherencia con el soporte, la resistencia al envejecimiento y la resistencia a la abrasión de las cargas de tráfico, en el caso de aplicación sobre pavimentos.

Pero no se pueden dejar de lado otros aspectos importantes, tales como la selección de la calidad del catalizador, la calidad de los procesos de fabricación, la calidad de la ejecución, la naturaleza y el estado del soporte (y su compatibilidad con el catalizador), y las labores de conservación, que juegan un papel definitivo a la hora de cuantificar sus capacidades en la fase de servicio.

La realización de, al menos, un tramo de prueba para verificar la reproducibilidad a escala real de los resultados de los ensayos de caracterización, y para validar los criterios de recepción antes del inicio de las obras debería ser de obligado cumplimiento.

7.6 CRITERIOS DE RECEPCIÓN

El objetivo del tratamiento fotocatalítico es el aporte de su función descontaminante y/o autolimpiante, dependiendo del activo, sin afectar las características superficiales del soporte de aplicación.

En el caso de los pavimentos, peatonales o de tráfico rodado, los parámetros superficiales por excelencia son la textura superficial y el coeficiente de rozamiento transversal, los cuales se recomienda que se analicen al cabo de al menos tres meses desde la aplicación del tratamiento.

Por lo tanto, los criterios de recepción para tratamientos superficiales fotocatalíticos en pavimentos nuevos, deberían ser los establecidos en la normativa actual para capas de rodadura, en términos de macrotextura y CRT, más el de actividad descontaminante, medido con la norma UNE ISO 22197-1:2012 o UNE 127197-1:2013, más el ensayo de resistencia al envejecimiento. Para los pavimentos existentes, los requerimientos superficiales recomendados deberían quedar definidos en el proyecto y aproximarse a los valores obtenidos antes del tratamiento fotocatalítico (Ver recomendaciones del [subapartado 7.2.h](#)).

Si bien, para la aplicación sobre otros activos del transporte, distintos a los pavimentos o donde la finalidad sea la autolimpieza, los criterios de recepción estarán asociados a los resultados de los ensayos de eficiencia descontaminante, autolimpieza y a la resistencia al envejecimiento. [\[13\]](#)

El objetivo del tratamiento fotocatalítico es el aporte de su función descontaminante y/o autolimpiante, sin afectar las características superficiales del soporte de aplicación

8. RECOMENDACIONES DE DISEÑO, APLICACIÓN Y SEGUIMIENTO DE MATERIALES FOTOCATALÍTICOS, A PARTIR DE LECHADAS PERCOLADAS EN BASE CEMENTO (SÓLO PARA PAVIMENTOS)

8.1 DEFINICIÓN DEL TRATAMIENTO

Se trata de una capa de rodadura, que se puede llevar a cabo como sustitución de otra existente, mediante fresado previo de la actual y posterior reposición, o como una rodadura de un firme de nueva ejecución.

En cualquiera de los dos casos, la ejecución de esta rodadura consta de dos fases: la primera, sería la puesta en obra de una mezcla soporte abierta, tipo drenante, en 4-5 cm de espesor, de acuerdo al Artículo 543 del PG-3 (pero sin tener en consideración los criterios de recepción establecidos, y empleando betunes convencionales de tipo B35/50 o B50/70) y, la segunda, la aplicación por percolación, a través de los huecos existentes en la misma, de una lechada fotocatalítica con base cemento y, normalmente, carga mineral. [14]

Merece la pena destacar que este tipo de pavimentos, aunque se nutre de la ejecución de una mezcla drenante y una lechada percolada posterior, el resultado esperado es un pavimento con un comportamiento semirrígido, resistente a la formación de roderas, impermeable, resistente al derrame de hidrocarburos y colaborador en la mejora de la calidad del aire.



Figura 9.A: Arriba izda. Lechada fotocatalítica base cemento.

Fuente: Trabit (Eurovia). Arriba dcha. Percolación con rastra. Dcha centro. Acabados de pavimento. Fuente: Grupo Heidelberg Materials Hispania. Abajo dcha. Helipuerto Nuovo S.Gerardo - Monza (Italia). Fuente: Grupo Heidelberg Materials Hispania. Abajo izda. C/ Martín de los Heros. Madrid. Fuente: Trabit (Eurovia).

8.2 CRITERIOS BÁSICOS DE DISEÑO Y APLICACIÓN

En la fase de diseño se recomienda realizar los estudios previos definidos en el **apartado 7.2** de este documento, a excepción de los **subapartados 7.2.f y 7.2.g.iv**.

8.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Los materiales constituyentes de la mezcla bituminosa drenante y la propia mezcla drenante deberían ajustarse a los requerimientos establecidos en el artículo 543 del PG-3, con las salvedades anteriormente comentadas, en relación con los criterios de recepción y el tipo de betunes a emplear. También las características de los áridos que la componen podrían relajarse con respecto al citado artículo, de acuerdo con las recomendaciones de la ficha técnica del fabricante.

La lechada fotocatalítica en base cemento, podría suministrarse en formato pretratado deshidratada, o podría fabricarse en una planta móvil *in situ*. En este segundo caso, debería tener las siguientes características:

a) Carga mineral empleada en la mezcla

Los áridos que constituyen la lechada fotocatalítica de cemento podrían estar formados por arenas cuarcíticas con un equivalente arena superior a 50 y polvo mineral de microsilíce. Este último, se recomienda que tenga un cernido mínimo de un 75% por el tamiz de 63 micras y un contenido inferior al 4% en masa sobre la mezcla. En cualquier caso, se actuará conforme a lo indicado en la ficha técnica del fabricante.

b) Cemento

El cemento empleado tendría un fotocatalizador incorporado, con una resistencia mínima a compresión de 32,5 MPa y su velocidad de fraguado dependerá de la climatología en el momento de la aplicación. En cualquier caso, se aplicarán las recomendaciones técnicas del fabricante.

c) Agua

El agua empleada deberá estar exenta de aceites, sal, ácidos alcalinos, materia orgánica y cualquier otra sustancia perjudicial, y es la que permitiría la hidratación del cemento y la colaboración en el ajuste de la viscosidad de la lechada a percolar en los huecos de la mezcla drenante.

d) Otros componentes

Para minimizar la retracción del cemento se podrían emplear aditivos, que además colaborarían en la densificación del producto final.

Eventualmente, y en función de la meteorología, se pueden emplear aditivos que favorezcan los tiempos de trabajabilidad de la lechada.

Por otra parte, la dotación de la lechada fotocatalítica (kg/m^2) será la recomendada por el fabricante de la misma.

e) Lechada de cemento

Se recomienda que la lechada de cemento se encuentre dentro de estos rangos, aunque, en cualquier caso, se deberá cumplir lo que indique la ficha técnica del fabricante:

- Fluidéz. Método del cono UNE-EN 445 (diámetro del orificio 10 mm):

La fluidez de la lechada para su vertido debe estar comprendida entre: 13-15 seg.

- Resistencia a compresión (UNE-EN 1015-11):

i. A las 24 horas > 15 MPa.

ii. A los 4 días > 35 MPa.

iii. A los 28 días > 50 MPa.

- Actividad fotocatalítica (degradación de óxido nítrico) UNE 83321 EX-17 o ISO 22197-1.

Valor declarado por el fabricante.

f) Producto final

Las características mecánicas recomendadas para el producto final son las siguientes, aunque en cualquier caso, se aplicarán las recomendaciones técnicas del fabricante.

PROPIEDAD MECÁNICA	MÉTODO DE ENSAYO	ESPECIFICACIONES (MPa)	
		VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
Resistencia a compresión (28 días)	UNE-EN 13286-41	8	12
Resistencia a tracción indirecta (28 días)	UNE-EN 13286-42	1,2	-
Módulo dinámico (28 días) a 20°C	UNE-EN 12697-26	8.000	12.000

Figura 10.A: Características mecánicas recomendadas de los pavimentos percolados con lechadas fotocatalíticas en base cemento.

8.4 FABRICACIÓN Y EJECUCIÓN

Como se ha comentado anteriormente, la aplicación de este pavimento en obra tiene lugar en dos fases: la puesta en obra de una mezcla drenante y la aplicación de la lechada.

Por esta razón, su fabricación se realiza igualmente en dos etapas: Por un lado, la mezcla bituminosa, que se fabricaría en central, bajo las condiciones establecidas en el artículo 543 del PG-3, con las salvedades comentadas y, por otro, la lechada cementada deshidratada (el proceso de hidratación se realiza en obra), que se fabrica en una planta específica, y transporta y suministra en sacos de 25 kg a obra o similar.

En caso de que la fabricación de la lechada se realice en obra, se debe emplear una central móvil compuesta por un silo de alimentación, donde se vierte la lechada deshidratada suministrada, un depósito de almacenamiento de agua y un mezclador con una capacidad de producción de unas 6,5 t/h, que genera un rendimiento aproximado de unos 300 m²/h de extendido, dependiendo del espesor final de la capa y el volumen de huecos obtenido. En cualquier caso, se ajustará la actuación a las pautas establecidas por el fabricante.

Las condiciones de ejecución de la mezcla bituminosa drenante se llevarán a cabo conforme a lo dispuesto en el artículo 543 del PG-3.

En el momento que la temperatura de la mezcla drenante ya compactada baje de 35 °C, y se compruebe que los ensayos de recepción previos (ver protocolo de inspección) son correctos, se procederá a la incorporación de la lechada de percolación, por medios manuales o mecánicos, dependiendo de la cuantía de la aplicación, para lo cual se seguirá el siguiente protocolo de inspección, previamente a su aplicación:

- Previamente al extendido de la lechada se realizará una campaña de control de la permeabilidad de la mezcla bituminosa drenante, mediante aparato permeámetro LCS, según la NLT-327/00, confirmando que en todos los ensayos que se supera el 20% de huecos sobre mezcla.
- Comprobación de que las superficies donde se va a aplicar la lechada poseen pendientes transversales y longitudinales inferiores al 4%, pues de lo contrario se dificultaría la percolación de la lechada.
- Comprobación de que la mezcla bituminosa drenante esté limpia, reemplazando o limpiando cualquier zona contaminada con agua o aire comprimido. Si se utilizara agua en la limpieza, o si el soporte se hubiera mojado, es preciso esperar hasta que esté completamente seco antes de extender la lechada.
- Comprobación de la temperatura ambiente, pues la lechada sólo será aplicable entre el umbral de temperaturas comprendido entre los 5 y los 40 °C.

- Comprobación de la predicción meteorológica, pues la lechada no se podrá aplicar en caso de que la mezcla drenante esté saturada de agua, en tiempo lluvioso, o bajo amenaza de lluvias o nevadas o fuertes vientos.

La aplicación de la lechada se realiza manualmente o mecánicamente, dependiendo de las cuantías a aplicar, mediante una rastra y un equipo de operarios, o mediante una máquina autopropulsada con rastra y un equipo de apoyo, respectivamente. Durante la fase de aplicación de la lechada se deben adoptar las siguientes precauciones:

- Evitar la coincidencia entre las juntas de construcción de la mezcla bituminosa drenante y de la lechada.
- No aplicar lechada fresca sobre una zona ya extendida en la que hubiera comenzado el fraguado, con objeto de evitar la formación de peladuras.
- Prestar especial atención a la percolación en las juntas de construcción, pues se trata de una zona crítica que puede generar problemas de percolación.
- En los casos donde se interrumpa el extendido de la lechada, por cualquier circunstancia (final del día, descansos para el almuerzo, etc), se terminará de ejecutar completamente la zona en curso, dejando una junta transversal, perpendicular al sentido de avance de la circulación. La junta transversal resultante se delimitará con papel adhesivo resistente a la tracción, al alargamiento y a la rotura. Cuando se reanuden los trabajos se retirará el papel, tratando esta zona como una junta de construcción.
- Se protegerán los bordillos, las alcantarillas, etc., que, en su caso, pudieran estar en contacto o ser ensuciados por la lechada durante su aplicación.

Una vez finalizada la operación de extendido de la lechada, se llevará a cabo un curado, mediante el empleo de productos filmógenos durante 24 horas. La apertura al tráfico rodado se realizará a las 24 - 48 horas posteriores a su aplicación, siempre y cuando se disponga de las características mecánicas mínimas establecidas en la presente nota técnica, a partir de la información recopilada en fases previas o recabada directamente del tramo de prueba.

8.5 CONTROL DE CALIDAD

Dentro del apartado de control de calidad, se estará a lo dispuesto en el artículo 543 del PG-3, para la mezcla bituminosa drenante, con las salvedades anteriormente comentadas, y mostrando especial atención al contenido de huecos final sobre mezcla, que es el parámetro más crítico en este tipo de pavimentos.

En cuanto al control de la lechada fotocatalítica con base cemento, se realizará una comprobación de la viscosidad de la lechada antes de su aplicación en obra. Para ello,

se empleará un embudo estandarizado por el suministrador del producto, donde se compruebe en cada amasada que el tiempo que tarda en pasar por dicho embudo estaba comprendido entre 12 y 15 segundos. Esta comprobación es de vital importancia, ya que la lechada producida debe de ser homogénea y muy fluida, eliminando cualquier amasada que presente algún “grumo” y sustituyéndola por otra.

Para realizar el control de la dotación de lechada, durante el proceso de ejecución, se contabilizarán las amasadas y se realizarán las siguientes determinaciones:

$$\text{Control de dotación } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ Amasadas} \times \text{Peso de una amasada (Kg)}}{\text{Superficie cubierta (m}^2\text{)}}$$

Adicionalmente se comprobará la resistencia a compresión de la lechada.

Respecto al producto final, se estará a lo dispuesto por la ficha técnica del fabricante, y en su defecto, a los ensayos y rangos de resultados incluidos en el apartado de especificaciones técnicas del presente documento.

8.5.1 Métodos de evaluación de eficiencia descontaminante

Se estará a lo dispuesto en el **apartado 7.5.1** del documento.

8.6 CRITERIOS DE RECEPCIÓN

Una vez terminadas las obras de pavimentación, se recomienda la extracción de testigos, elegidos al azar, de rodadura (con una frecuencia de 1 cada 350 m² de superficie pavimentada o la que establezca el director de obra), con objeto de comprobar el grado de adherencia entre la nueva rodadura y el soporte de la misma, las resistencias mecánicas y el grado de percolación de la lechada sobre la capa drenante, mediante la determinación de los huecos sobre mezcla finales (menor o igual del 5%).

También es recomendable insertar muestras en el pavimento extraíbles, previamente fabricadas y talladas (empleando los mismos materiales) en laboratorio, que permitan evaluar su capacidad descontaminante en condiciones normalizadas, de acuerdo con la Norma ISO 22197-1 y realizar un seguimiento de su eficiencia a largo plazo.

En relación a las características superficiales, textura y CRT, estas deberán quedar definidas en proyecto, de acuerdo a la velocidad específica de la vía donde se aplique, o en su defecto, a lo establecido por el director de obra. En este respecto, se propone la validación previa, mediante la ejecución de un tramo de prueba a escala real.

9. REFERENCIAS

- [1] Comunicado de prensa de OMS del 22 de septiembre de 2021: <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>
- [2] <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2021-09-22/la-oms-fija-como-peligrosos-niveles-de-contaminacion-del-aire-considerados-seguros-hasta-ahora.html>
- [3] Artículo del Diario ABC del 14 de septiembre de 2016: <https://www.abc.es/sociedad/abci-fotocatalisis-tecnologia-para-descontaminar-ciudades-plena-gran-201609141945-noticia.html>
- [4] <https://www.who.int/es/news-room/spotlight/how-air-pollution-is-destroying-our-health>
- [5] [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [6] <http://www.conama2014.conama.org/conama2014/download/files/conama2014/CT%202014/1896711536.pdf>
- [7] https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/PerfilContratante/PC_Areas/PC_MAmbienteMov/2013/DG%20VIAS%20Y%20ESPACIOS%20PUBLICOS/ficheros/01%20Memoria%20FEDER%20Villaverde.pdf
- [8] <https://cordis.europa.eu/article/id/150417-pollutionbusting-concrete/es>
- [9] <https://www.cartif.es/life-equinox/>
- [10] <https://www.ineco.com/ineco/proyectos/proyecto-life-minox-street>
- [11] <https://www.life-photoscaling.eu/>
- [12] <https://www.fotocatalisis.org/sello-de-certificacion/>
- [13] Libro Blanco de la Fotocatálisis: Tecnología, Aplicaciones, Medición y FAQ (2020). ISBN 978-84-09-22299-5. Coordinador y Autor Principal: Almazán Cruzado, D. Co-autores: Crespo, R., Remaut, F., Pagés, G., Viñas, R., Fresno, F., Rovito, G., Feroso, J., Castellote, M., Jiménez E., Sánchez B., Suárez, S., Martínez, C., Ramos, S., Díaz, A., Ibáñez, J.A., Jensen H. Pedersen, P. (2020). <https://www.fotocatalisis.org/libro-blanco/>
- [14] Artículo 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de carreteras y puentes. PG-3. ORDEN FOM/2523/2014 + Corrección de errores + ORDEN FOM/510/2018 (O.C. 1/2023)

NOTAS

A blank page for notes with a blue border and five binder rings on the left side. The page contains 15 horizontal blue lines for writing.

LIBRO BLANCO DE LA FOTOCATÁLISIS · 2ª EDICIÓN



2ª Edición

LIBRO BLANCO DE LA FOTOCATÁLISIS

La Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (<https://www.fotocatalisis.org>) y la Plataforma Tecnológica de Fotocatálisis (<https://www.ptfotocatalisis.es>) se complacen en presentar esta segunda edición del Libro Blanco de la Fotocatálisis.

Desde que la primera edición viera la luz en 2020 ha habido avances decisivos en la implantación de soluciones fotocatalíticas, fundamentalmente por la demanda ciudadana de mejores estándares de calidad del aire en espacios interiores y exteriores desde la pandemia Covid-19, por los O.D.S 2030 de Naciones Unidas, por las actuales políticas de contaminación cero de la U.E, y por la adecuación a los umbrales de salubridad ambiental recomendados por la O.M.S.

Este Libro Blanco combina el carácter divulgativo de interés general con textos redactados por expertos, en los que se proponen criterios de diseño y aplicación de materiales fotocatalíticos, descontaminantes y autolimpiantes, adaptados a diferentes contextos y objetivos. También se explican los sistemas para medir adecuadamente la eficacia de materiales fotocatalíticos.

Se repasan los resultados de numerosos proyectos llevados a cabo en los últimos años, sintetizándolos grandes avances conseguidos y se da respuesta a las preguntas más frecuentes (FAQ) sobre Fotocatálisis. Tras la pandemia, la Fotocatálisis se postula como una herramienta determinante para el abatimiento de virus, bacterias y microorganismos en espacios interiores.

Siguiendo la estela de la primera edición, este volumen se sitúa como herramienta indispensable para la normalización y extensión de la Fotocatálisis en sus múltiples aplicaciones: urbanismo, edificación, obra civil, industria, energía, sanidad, hogar...

En definitiva, se trata de un libro eminentemente práctico, útil para técnicos y gestores de administraciones públicas, ingenierías, estudios de arquitectura, empresas constructoras, concesionarias, urbanistas, profesionales de la sanidad y el medio ambiente, y para todas aquellas personas interesadas en la mejora de la habitabilidad.



Ayuda PTR2022-001336, financiada por:



Con el patrocinio de:



Email:

contacto@fotocatalisis.org



X:

[@AIFotocatalisis](https://twitter.com/AIFotocatalisis)



LinkedIn:

Grupo Fotocatálisis y Ciudades Sostenibles



Web:

www.fotocatalisis.org