



# INFORME LAYMAN

## PROYECTO LIFE **MINOx-STREET**





LIFE12 ENV/ES/00280

## INFORME LAYMAN PROYECTO LIFE **MINOx-STREET**

MEDIDA Y MODELIZACIÓN DE LA EFICIENCIA DESCONTAMINANTE DE  
ÓXIDOS DE NITRÓGENO DE LOS MATERIALES FOTOCATALÍTICOS Y SU  
EMPLEO COMO ESTRATEGIA PARA LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

[www.lifeminoxstreet.com](http://www.lifeminoxstreet.com)

Proyecto cofinanciado por el instrumento financiero  
para el medio ambiente de la Unión Europea



GOBIERNO  
DE ESPAÑA  
MINISTERIO  
DE ECONOMÍA  
Y COMPETITIVIDAD

**Ciemat**  
Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE FOMENTO

MINISTERIO  
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN  
Y MEDIO AMBIENTE

**CEDEX**  
CENTRO DE ESTUDIOS  
Y EXPERIMENTACIÓN  
DE OBRAS PÚBLICAS



# ÍNDICE

¿CÓMO SURGE EL PROYECTO LIFE MINO <sub>x</sub> -STREET? <b>ANTECEDENTES</b> .....	1
¿QUÉ SON LOS MATERIALES FOTOCATALÍTICOS?.....	3
¿QUÉ APORTA EL PROYECTO LIFE MINO <sub>x</sub> -STREET? <b>OBJETIVOS</b> .....	3
DESARROLLO DEL PROYECTO <b>ACCIONES PRINCIPALES</b> .....	4
DESARROLLO DEL PROYECTO <b>ACCIONES PREPARATORIAS</b> .....	5
DESARROLLO DEL PROYECTO <b>ACCIONES DE IMPLEMENTACIÓN</b> .....	13
¿Y DE AHORA EN ADELANTE? <b>IMPACTO DEL PROYECTO</b> .....	26



# ¿CÓMO SURGE EL PROYECTO LIFE MINOX-STREET?

## ANTECEDENTES

La contaminación atmosférica urbana relacionada con el tráfico rodado es uno de los principales problemas de algunas ciudades de Europa.

Sus consecuencias adversas sobre la salud están demostradas: la OMS (Organización Mundial de la Salud) estima que el 11,6% de las muertes mundiales están relacionadas con la contaminación del aire y la Agencia Europea de Medio Ambiente señala que en torno al 90% de la población urbana de la Unión Europea está expuesta a concentraciones elevadas de contaminantes atmosféricos.

Por esta razón, es urgente y prioritario establecer medidas de mejora de la calidad del aire urbano. En este sentido, las políticas de la Unión Europea tienen por objeto reducir la exposición a la contaminación atmosférica reduciendo las emisiones y fijando límites y valores objetivo de calidad del aire que los países miembros deben cumplir.



<i>Periodo medio</i>	<i>Valor límite</i>
1 hora	200 µg/m <sup>3</sup> , que no podrá superarse más de 18 veces por año civil
Año civil	40 µg/m <sup>3</sup>

Valores límite de NO<sub>2</sub> para la protección de la salud humana  
Directiva 2008/50/CE (anexo XI)

En este contexto, el proyecto LIFE MINOX-STREET pretende ser un **apoyo para la evaluación de posibles estrategias de reducción de la contaminación atmosférica por óxidos de nitrógeno en**

**las ciudades**, principalmente debida al tráfico rodado, **estudiando la viabilidad del uso de materiales fotocatalíticos en calzadas, aceras y/o fachadas.**



## ¿QUÉ SON LOS MATERIALES FOTOCATALÍTICOS?

Son materiales que incorporan compuestos fotocatalíticos como el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) que, activados por la luz solar, pueden eliminar del aire compuestos como los óxidos de nitrógeno (en adelante  $\text{NO}_x$ ), principales contaminantes asociados al tráfico rodado.

Sin embargo, a pesar de las numerosas líneas de investigación abiertas para el desarrollo y estudio de las características y potencial descontaminante de estos materiales, existen importantes incógnitas sobre su comportamiento en condiciones reales.

## ¿QUÉ APORTA EL PROYECTO LIFE MINOX-STREET? OBJETIVOS

El objetivo fundamental del proyecto es realizar un análisis riguroso de la aplicabilidad y efectividad de los materiales fotocatalíticos para la reducción de  $\text{NO}_x$  en entornos urbanos concretos.

Este planteamiento integral sólo se puede abordar partiendo de un conocimiento fiable de los materiales comerciales disponibles, mediante análisis en condiciones controladas y a través de la sinergia entre la experimentación en aire ambiente y la modelización matemática.

En consecuencia, el proyecto LIFE MINOX-STREET:

- » Proporciona evidencias rigurosas sobre las capacidades reales que tienen los materiales fotocatalíticos comerciales para reducir las concentraciones de  $\text{NO}_x$  urbanas.
- » Desarrolla un modelo numérico que permite predecir las capacidades que tienen

estos materiales para reducir la concentración de  $\text{NO}_x$  en diferentes entornos urbanos, antes de su implementación, facilitando el desarrollo y mejora de las estrategias de gestión de calidad del aire.

Los resultados del estudio se plasman en una **Guía para el uso de materiales fotocatalíticos con objeto de reducir la contaminación urbana por óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )** que está a disposición de las administraciones competentes en materia de gestión de calidad del aire, aparte de accesible al público general (en la web del proyecto: <http://www.lifeminoxstreet.com>).

## DESARROLLO DEL PROYECTO

# ACCIONES PRINCIPALES

Para alcanzar los objetivos descritos en el apartado anterior, el proyecto LIFE MINOX-STREET ha llevado a cabo las siguientes actuaciones principales:

- » Estudio de mercado y elección de materiales fotocatalíticos comerciales para su ensayo.
- » Caracterización de las propiedades mecánicas y capacidad descontaminante de  $\text{NO}_x$  de diferentes materiales fotocatalíticos comerciales de acuerdo a la Norma ISO 22197-1.
- » Estudio de la influencia de los procesos de envejecimiento, desgaste y regeneración en sus propiedades físico-químicas y fotocatalíticas.
- » Parametrización del efecto sumidero de  $\text{NO}_x$  (velocidad de depósito) en presencia de materiales fotocatalíticos en condiciones ambientales.

- » Caracterización del efecto descontaminante de los materiales fotocatalíticos seleccionados en escenarios urbanos.

- » Implementación de un módulo de química atmosférica en un modelo CFD (Computational Fluid Dynamics) adaptado a escala urbana. Simulación del proceso de eliminación fotocatalítica de  $\text{NO}_x$  a través de la introducción del parámetro velocidad de depósito de NO sobre superficies fotoactivas, así como de la química reactiva atmosférica. Valoración del efecto descontaminante de los materiales fotocatalíticos en escenarios urbanos (a escala de calle y distrito) y análisis de sus efectos ambientales.

- » Elaboración de una guía de referencia para el uso de materiales fotocatalíticos en el marco de las políticas de control de calidad del aire urbano.



# DESARROLLO DEL PROYECTO

## ACCIONES PREPARATORIAS

### Caracterización de los materiales fotocatalíticos

Los materiales fotocatalíticos analizados en el proyecto fueron seleccionados inicialmente partiendo de un estudio de los materiales disponibles en el mercado para su aplicación en calzada, aceras y fachada. Los criterios de selección fueron, principalmente:

- » Óptimo comportamiento en relación con la reducción de  $\text{NO}_x$  (conforme a la información aportada por el proveedor)
- » Facilidad de aplicación y puesta en obra
- » Viabilidad técnica y económica

Las acciones desarrolladas a continuación en esta fase consistieron, fundamentalmente, en pruebas normalizadas, desarrolladas en laboratorio y pista de ensayos, para conocer las características físico-mecánicas y la actividad fotocatalítica de dichos materiales comerciales, así como su durabilidad y comportamiento ante el envejecimiento.

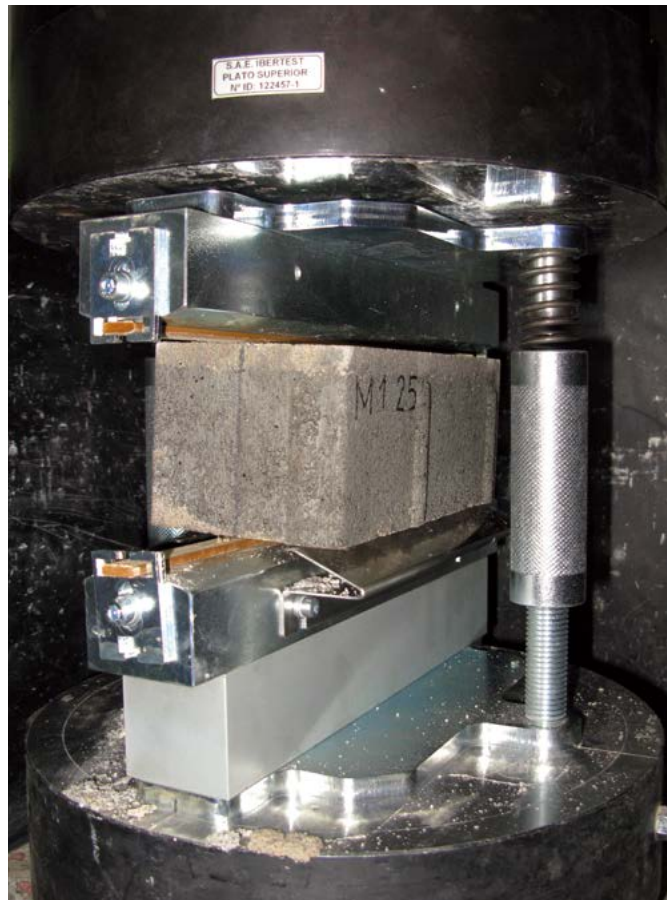
### Ensayos mecánicos y de durabilidad de mezclas bituminosas y hormigones

En el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales y en la Pista de Ensayos del Centro de Estudios del Transporte del CEDEX se ensayaron las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de distintos productos de hormigón tratados con productos fotocatalíticos para pavimentación de aceras, así como de distintos pavimentos bituminosos para calzada tratados con productos fotocatalíticos.

El objetivo era analizar los efectos de la aplicación de los productos fotocatalíticos sobre las características físico-mecánicas (forma y dimensiones, resistencia y carga de rotura, resistencia al desgaste, resistencia al deslizamiento y resistencia climática) que los materiales deben cumplir conforme a las Normas UNE-EN correspondientes.



Medidas de las dimensiones de las muestras



Ensayo de carga de rotura



Ensayo de resistencia al desgaste (abrasión)



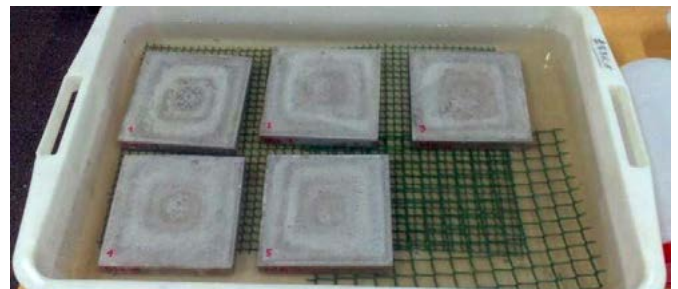
Ensayo de carga de rotura y resistencia a la flexión



Ensayo de deslizamiento



Ensayo de hielo-deshielo



Ensayo de absorción capilar



Aplicación de los productos fotocatalíticos en pista de ensayos



Medida de regularidad transversal en la pista de ensayos

## ■ Ensayos de actividad fotocatalítica y envejecimiento sobre mezclas bituminosas, hormigones y pinturas

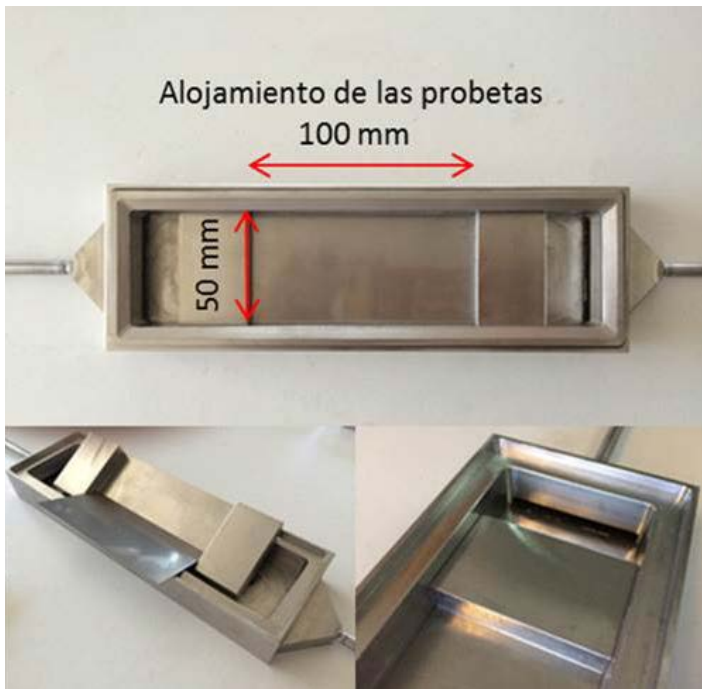
La Unidad FOTOAIR del Dpto. de Energía del CIEMAT llevó a cabo más de 400 ensayos de actividad fotocatalítica en laboratorio (conforme a la Norma ISO 22197-1).

Además, evaluó la durabilidad de las propiedades fotocatalíticas de los materiales seleccionados mediante estudios de

envejecimiento (en condiciones de intemperie y en cámara de envejecimiento acelerado) así como, en el caso de pavimentos bituminosos, los efectos del desgaste por rodadura (para lo que se implementaron diferentes productos sobre varios tipos de mezcla bituminosa en la pista de ensayos del CEDEX, evaluándose su eficiencia tras distintos ciclos de rodadura).



Ensayo de actividad fotocatalítica



Productos fotocatalíticos representativos que se pueden encontrar en el mercado



Probetas sometidas a envejecimiento en intemperie (ensayos de durabilidad)



Probetas dispuestas para su ensayo (en dimensiones ISO)



Probetas de acero (dimensiones ISO 22197-1)

Los resultados obtenidos en estos ensayos permitieron seleccionar los materiales óptimos para ser utilizados en los diferentes escenarios urbanos (calzada, acera y fachada) de las acciones sucesivas, así como obtener las siguientes **conclusiones**:

- Hay una enorme variabilidad en la eficiencia de reducción de  $\text{NO}_x$  de los distintos materiales fotocatalíticos comercializados (un 8% de ellos no presentan actividad fotocatalítica o ésta es muy escasa). Los seleccionados para el proyecto presentan unos valores de conversión de  $\text{NO}_x$ , en laboratorio, entre el 25 y el 55% dependiendo del producto y del sustrato
- Las características superficiales de los materiales para acera y calzada pueden verse negativamente afectadas por la aplicación de los productos fotocatalíticos, especialmente la

textura y la resistencia al deslizamiento (ésta se ve más afectada cuanto más antiguo es el pavimento)

- La estabilidad del recubrimiento frente al envejecimiento en condiciones de intemperie es un parámetro relevante: algunos materiales fotocatalíticos mantienen su eficiencia tras largos periodos de exposición, mientras que otros sufren una disminución progresiva de su capacidad de eliminación de  $\text{NO}_x$
- Todos los productos bituminosos presentan baja durabilidad en el ensayo de desgaste acelerado por vehículos simuladores de tráfico, si bien las mezclas cerradas presentan mejor comportamiento que las abiertas
- Las características del sustrato y la forma de aplicación del producto fotocatalítico influye significativamente sobre los resultados obtenidos en la reducción de  $\text{NO}_x$

## Desarrollo de un sistema experimental para medir la velocidad de depósito de NO<sub>x</sub> sobre superficies fotocatalíticas en ambiente exterior

Como parte de las acciones preparatorias del proyecto, se diseñó y puso a punto un dispositivo experimental (y el correspondiente software para la toma y tratamiento de datos) que permitió detectar el establecimiento de un gradiente de concentración de NO<sub>x</sub> entre el nivel más cercano a la superficie fotoactiva y los niveles más alejados.

El objetivo fue estimar la velocidad con que los contaminantes son eliminados por la superficie fotocatalítica para caracterizar el efecto sumidero inducido por la superficie fotoactiva y alimentar al modelo numérico utilizado para simular la potencial capacidad descontaminante de NO<sub>x</sub> cuando estos materiales pretenden ser implementados en escenarios urbanos.



Plataforma experimental (izqda.) y mástil con sensores meteorológicos y tomas de muestras (dcha.)

Este dispositivo permitió estimar las velocidades de depósito de NO<sub>x</sub> para el material implementado en la plataforma experimental y comparar dichas estimaciones con las realizadas utilizando datos de laboratorio (ensayos ISO 22197-1: 2007), concluyéndose un buen acuerdo entre ellas.

El rango de velocidades de depósito estimadas para los distintos materiales ensayados fue de entre 0,5 y  $10 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ .

## DESARROLLO DEL PROYECTO

# ACCIONES DE IMPLEMENTACIÓN

Ensayos para conocer la influencia de las variables determinantes de la actividad fotocatalítica en condiciones controladas, y ensayos de regeneración

### Ensayo acelerado de firmes a escala real

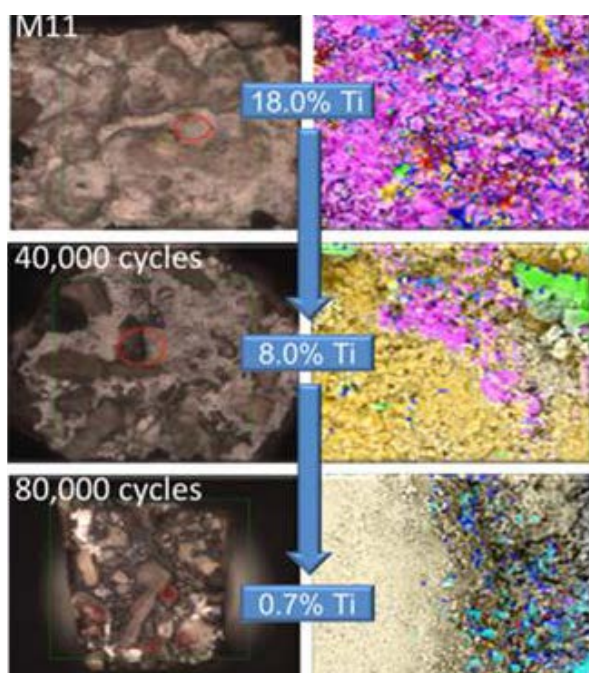
En la pista de ensayos del Centro de Estudios del Transporte del CEDEX se llevó a cabo el estudio de la influencia de las cargas de tráfico sobre los productos fotocatalíticos aplicados en las mezclas bituminosas, analizando tanto la sección rodada por el vehículo como la no rodada con el fin de discriminar el efecto de las variables climáticas de la influencia del tráfico.

También se realizó un estudio de la estabilidad de los diferentes aditivos frente al desgaste por rodadura y riego (limpieza de la calzada), mediante análisis de fotografías.



Extracción de muestras en secciones de la pista de ensayos del CEDEX





Análisis mediante SEM-EDX de una de las muestras tras envejecimiento por rodadura

## ■ Ensayo de actividad fotocatalítica y de regeneración de la misma tras el lavado

La Unidad FOTOAIR del Dpto. de Energía del CIEMAT llevó a cabo el estudio paramétrico de correlación multivariable, analizando el efecto del caudal, concentración de NO, irradiancia y humedad relativa en la actividad fotocatalítica de los materiales seleccionados.

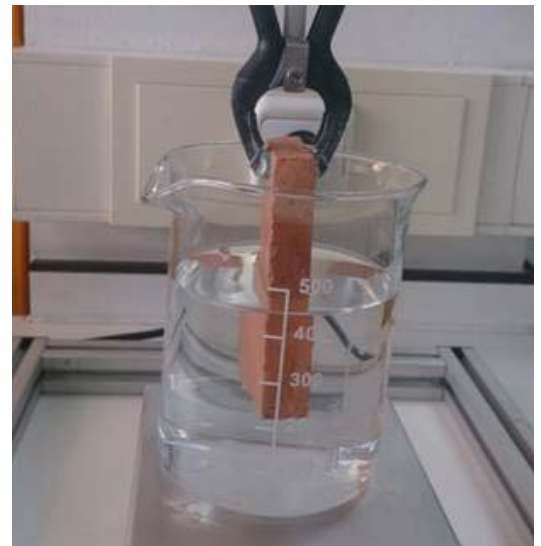
En el caso de pavimentos bituminosos, se estudió el efecto de la porosidad de la muestra (abierta o cerrada) y envejecimiento del asfalto en las propiedades finales del material, analizando el desgaste por rodadura provocado por el paso de un vehículo eléctrico de alto tonelaje en la pista del CEDEX.

Así mismo, se realizaron ensayos de regeneración del fotocatalizador tras su exposición a la intemperie en ambiente real, con el objetivo de recuperar la actividad fotocatalítica que se ve afectada por la presencia de nitratos adsorbidos (como consecuencia del propio proceso de fotocatalísis) y de materia orgánica (partículas, aceites, etc.) que se depositan sobre el material.

Dichos ensayos contemplaron procesos de lavado con agua y con disoluciones diluidas de tensioactivos comerciales o de agua oxigenada. Se analizó el efecto de la velocidad de agitación, tiempo de lavado, pH y temperatura en la actividad fotocatalítica.



Probetas de mezcla bituminosa extraídas del P° de la Chopera tras diferentes tiempos de exposición al tráfico



Estudio de regeneración: lavado de los materiales con disoluciones acuosas

Los ensayos realizados en esta fase **permitieron concluir lo siguiente:**

- El tipo de mezcla asfáltica (porosidad abierta o cerrada) así como el envejecimiento de la misma, ejerce una influencia importante en el comportamiento de las muestras. Los materiales sufren una pérdida de actividad fotocatalítica importante con el número de cargas, siendo más significativa cuando se trata de asfaltos de mezcla abierta y sobre sustratos no envejecidos
- La implementación de los materiales en escenarios urbanos reales implica un cambio en la actividad fotocatalítica medida en laboratorio: la superficie a recubrir debe estar lo más limpia posible antes de aplicar el producto fotocatalítico
- Los estudios de correlación multivariable indican un comportamiento similar para todos los materiales estudiados: existen unas

condiciones óptimas de caudal, irradiancia y humedad relativa para las cuales se obtiene un mayor rendimiento del fotocatalizador

- Los materiales fotocatalíticos implementados muestran valores de conversión de  $\text{NO}_x$ , en laboratorio, en torno al 10% incluso después de largos periodos de exposición en condiciones reales de uso
- Los nitratos adsorbidos en la superficie de los materiales fotocatalíticos, que restan eficiencia al material, pueden eliminarse con un simple proceso de lavado que se asemeja al lavado con agua de lluvia
- La eliminación de otros elementos que restan eficacia fotocatalítica (como materia orgánica acumulada sobre el material) puede lograrse mediante lavado con disoluciones diluidas de agentes oxidantes o con los desengrasantes comerciales habitualmente utilizados por los ayuntamientos en la limpieza de las calles.

## Caracterización del efecto descontaminante de los materiales fotocatalíticos en ambiente real

Las Unidades de Caracterización de la Contaminación Atmosférica y COPs y la de Emisiones Contaminantes, pertenecientes a la División de Contaminación Atmosférica del Departamento de Medio Ambiente del CIEMAT, en colaboración con la Unidad FOTOAIR y el

Ayuntamiento de Alcobendas, llevaron a cabo la caracterización del efecto descontaminante de los materiales fotocatalíticos seleccionados en el curso de las acciones preparatorias para ser aplicados en tres escenarios urbanos de Alcobendas: calzada, acera y fachada.

## ■ Caracterización en calzada

El escenario elegido fue el Pº de la Chopera, en Alcobendas, vía rectilínea de doble sentido con tráfico moderado. El material fotocatalítico se implementó en un área de calzada de aproximadamente 1.000 m<sup>2</sup>, ocupando 60 m lineales.

Antes de la aplicación del material fotocatalítico se estudiaron las características ambientales y atmosféricas del escenario elegido, así como su comportamiento como fuente lineal de contaminantes atmosféricos.

Tras la aplicación del material fotocatalítico, se analizó su capacidad descontaminante de NO<sub>x</sub> realizando medidas en continuo, durante dos meses, de las concentraciones de contaminantes, así como de las variables meteorológicas en superficie y en altura. Se midió la concentración de NO<sub>x</sub> en seis puntos distintos situados a lo largo del eje de la calle, a 40 cm de altura sobre la superficie de la mediana, con el objetivo de comprobar si dicha concentración disminuía en la zona tratada con el material fotocatalítico.



Aplicación del producto fotocatalítico en la calzada del Pº de la Chopera de Alcobendas



Escenario de calzada con el producto fotocatalítico aplicado

Se realizaron, además, campañas intensivas de medidas de:

- » Material particulado en aire y depositado sobre la calzada, para estudiar la posible generación de subproductos potencialmente dañinos para la salud (por resuspensión de TiO<sub>2</sub> como consecuencia del desgaste por rodadura)
- » Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs)
- » Tráfico rodado

- » Radiación UV-A y temperaturas de paramentos horizontales y verticales de la calle
- » Extracción de testigos de la calzada para evaluar el decaimiento de la actividad fotocatalítica y la pérdida de titanio en superficie por desgaste debido al tráfico rodado
- » Realización de baldeos controlados para caracterizar la posible presencia de nitratos y titanio en los lixiviados recogidos



Baldeo para la recogida y análisis de lixiviados

El resultado del estudio es que **no ha sido posible detectar ningún efecto de mejora en las concentraciones de NO<sub>x</sub> directamente atribuible a la presencia del material fotocatalítico** a pesar de que se empleó el material que presentaba mejores prestaciones de actividad fotocatalítica y durabilidad, de que las medidas de concentración de NO<sub>x</sub> se realizaron a escasa altura respecto a la superficie tratada y de que se utilizaron los datos asociados a las

condiciones meteorológicas óptimas. Las bajas velocidades de depósito y las perturbaciones inducidas por el tráfico rodado han impedido observar el efecto sumidero.

Por otra parte, **señalar que no se detectó impacto negativo alguno relativo a la generación de subproductos derivados de la aplicación del material fotocatalítico.**

## ■ Caracterización en acera

El escenario elegido fue un doble "street canyon", modelo a escala formado por dos calles lineales paralelas y contiguas de 20 m de longitud y 4 m de ancho, delimitadas por muros de 5 m de altura y pavimentadas

con las baldosas para acera previamente seleccionadas en las acciones preparatorias, construido en una zona urbana de Alcobendas próxima a la vía pública, con niveles moderados de contaminación, pero sin tráfico directo.



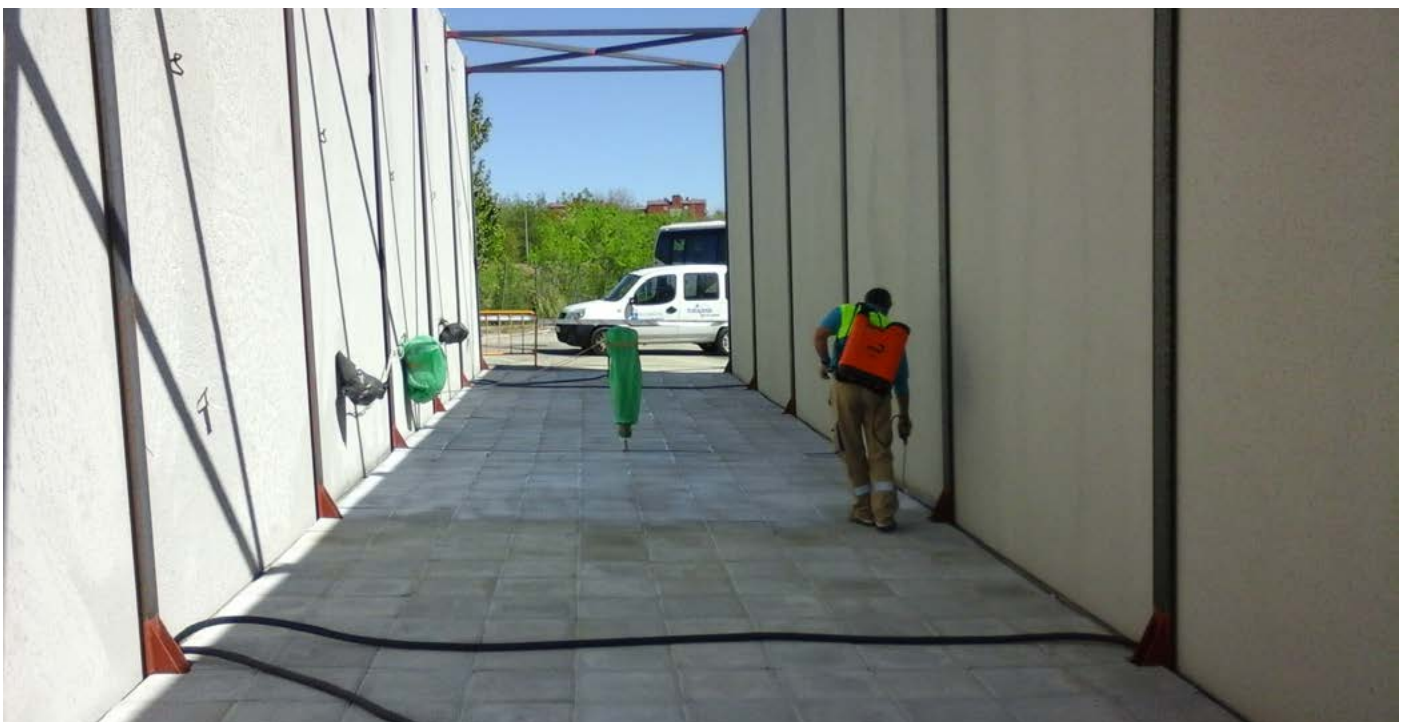
Proceso de construcción del doble "street canyon" para los escenarios de acera y fachada



Disposición del doble "street canyon" en el municipio de Alcobendas

Antes de la aplicación del producto fotocatalítico en acera, se caracterizó el comportamiento dinámico y químico de las masas de aire en el doble "street canyon" y se tomaron medidas de las concentraciones ambientales de contaminantes y de diversos parámetros meteorológicos fuera del mismo.

Se aplicó el material fotocatalítico en una de las calles del "street canyon", calle fotoactiva, utilizando la otra como calle de referencia (sin tratar). Una vez aplicado el producto, se tomaron medidas en continuo de la concentración de  $\text{NO}_x$  en ambas calles, durante dos meses, concluyendo lo mismo que en el caso de la calzada: **no se pudo detectar reducción en la concentración de  $\text{NO}_x$  atribuible al efecto descontaminante del material fotocatalítico.**



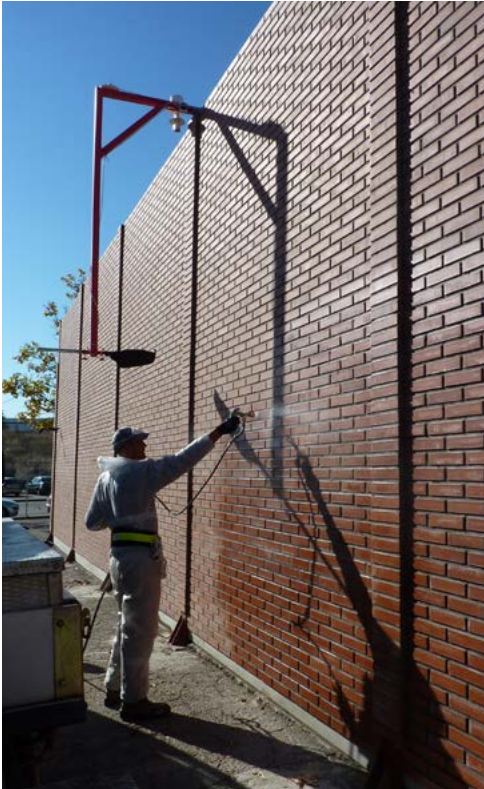
Aplicación de producto fotocatalítico sobre acera, en una de las calles del "street canyon"

## Escenario de fachada

Se utilizó la pared exterior del "street canyon" orientada al este, por ser la que recibe mayor insolación, recubriéndola con ladrillos sobre los que se aplicó el material fotocatalítico.

Como en el caso anterior, se caracterizó previamente la dinámica de la masa de aire

cercana a la superficie y, tras la aplicación del producto fotocatalítico, se tomaron medidas en continuo de la concentración de  $\text{NO}_x$  así como de los parámetros meteorológicos, durante mes y medio, para caracterizar los posibles gradientes de concentración de  $\text{NO}_x$  en la dimensión paralela o perpendicular a la fachada.



Aplicación de producto fotocatalítico sobre fachada de ladrillo en el "street canyon"



Muro de ladrillos del "street canyon" instrumentado para la medida de NOx y parámetros meteorológicos en continuo

Los resultados obtenidos muestran que, durante un corto periodo de tiempo y bajo condiciones ambientales y meteorológicas específicas, **se produjo un corto episodio de reducción significativa de la concentración de NO<sub>x</sub> atribuido inequívocamente a la presencia del recubrimiento fotocatalítico.**

Las **conclusiones** obtenidas tras las campañas realizadas en los tres escenarios urbanos descritos son:

- El efecto de eliminación de NO<sub>x</sub> de los materiales fotocatalíticos no se ha observado en los escenarios de calzada y acera
- En el escenario de fachada se ha observado un impacto positivo (efecto sumidero

de NO<sub>x</sub> del orden del 15 al 20%), detectado muy cerca de la superficie fotocatalítica y en condiciones ambientales muy específicas, con baja incidencia global en el aire ambiente

- Existe una gran dificultad para establecer la posible relación causa-efecto entre cualquier reducción observada de NO<sub>x</sub> y la presencia de superficies fotocatalíticas en los escenarios urbanos
- Las bajas velocidades de depósito y el alto índice de volumen de aire frente a la superficie fotoactiva hacen que el efecto macroscópico fotocatalítico inducido sea muy débil
- No hay evidencia de efectos locales en el aire ambiente o en los lixiviados debido al uso de los materiales fotocatalíticos



## Modelización de la evolución de los niveles de concentración y gradientes de NO<sub>x</sub> en presencia de materiales fotocatalíticos implementados en escenarios urbanos y a escala de distrito

La Unidad de Modelización de la Contaminación Atmosférica y Ecotoxicidad del Departamento de Medio Ambiente del CIEMAT desarrolló un prototipo para simular los niveles de concentración y gradientes de NO<sub>x</sub> en distintos escenarios del municipio de Alcobendas.

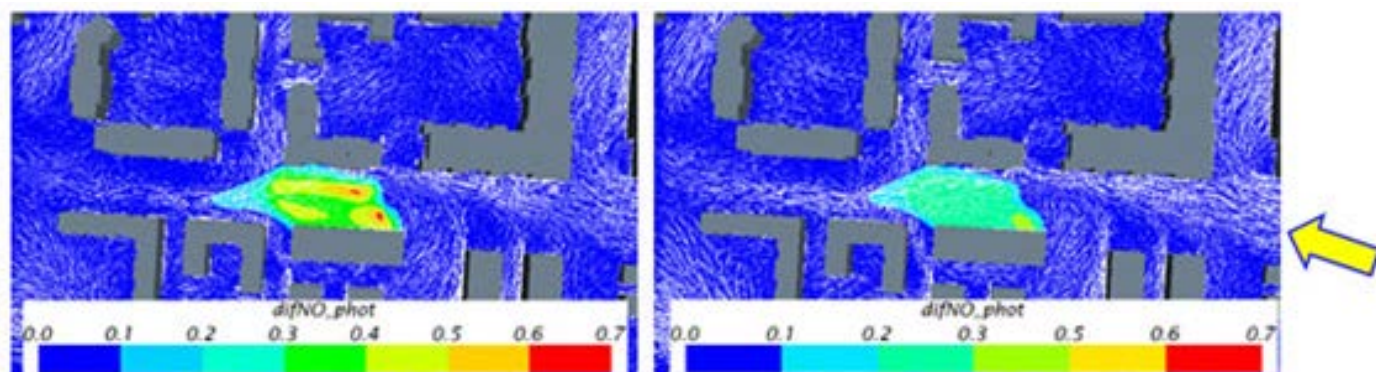
Las tareas acometidas fueron:

- » Desarrollo, validación y ajuste de un modelo de mecánica de fluidos computacional CFD (Computational Fluid Dynamics) adaptado para simular la dispersión de contaminantes atmosféricos reactivos (NO y NO<sub>2</sub>).
- » Modelización del efecto fotocatalítico, modelizando la dispersión y el efecto del depósito del NO<sub>x</sub> sobre la superficie fotocatalítica a partir de la velocidad de depósito de NO obtenida en acciones anteriores.
- » Comparación de los resultados del modelo con las medidas en condiciones ambientales.
- » Simulación de flujos y contaminantes reactivos en el escenario urbano de Alcobendas para seleccionar las localizaciones idóneas de las campañas experimentales (calzada).

A continuación, y a partir de los datos obtenidos en las campañas experimentales in situ, se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- » Modelización del efecto de depósito de NO<sub>x</sub> debido al material fotocatalítico implementado en calzada (P<sup>o</sup> de la Chopera), con una velocidad de deposición de NO de 0,005 ms<sup>-1</sup>.
- » Modelización del efecto de depósito de NO<sub>x</sub> debido al material fotocatalítico implementado en acera y fachada ("street canyon"), con velocidades de deposición de NO de 0,01 ms<sup>-1</sup> y 0,004 ms<sup>-1</sup> respectivamente.

Para ello fue necesario incluir en el modelo, además de la velocidad de deposición de NO, la geometría de las calles y edificios del municipio, los valores de concentración de entrada de NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> y los cálculos de emisiones de contaminantes (a partir de aforos de tráfico).



Diferencias de concentración de NO con y sin asfalto fotocatalítico a 1 m de altura (izquierda) y a 3 m de altura (derecha) y con la dirección del viento indicada por la flecha amarilla

Una vez desarrollado y validado el modelo, se ha desarrollado una metodología para poder utilizarlo con el fin de evaluar a priori (sin necesidad de implementarlos) el posible impacto de diferentes escenarios de aplicación de los materiales fotocatalíticos. Para cuantificar el impacto de estos materiales sobre el  $\text{NO}_x$  en aire se realizan dos simulaciones en las mismas condiciones meteorológicas, con la diferencia de que en una de ellas se tiene en cuenta el depósito de  $\text{NO}$  sobre la superficie fotoactiva, mientras que en la otra no se incluye dicho efecto. De esta manera, se evalúa el impacto mediante la diferencia de concentración de  $\text{NO}_x$  resultante en ambas simulaciones ( $\delta\text{NO}_{x\text{dep}}$ ).

Se ha aplicado a un barrio de Alcobendas en que, de forma hipotética, todas las superficies en un área de  $1 \text{ km}^2$  son fotocatalíticas y reciben iluminación de forma simultánea, con el objetivo de calcular la máxima reducción de  $\text{NO}_x$  que podría obtenerse en el área de estudio considerada (si bien no es real puesto que no es posible que toda el área permanezca iluminada por igual).

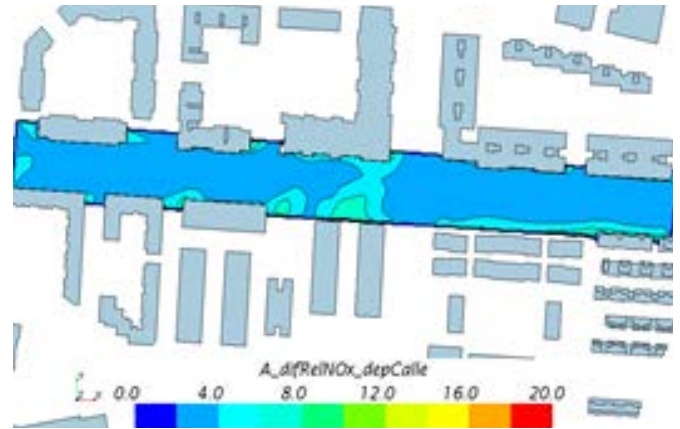
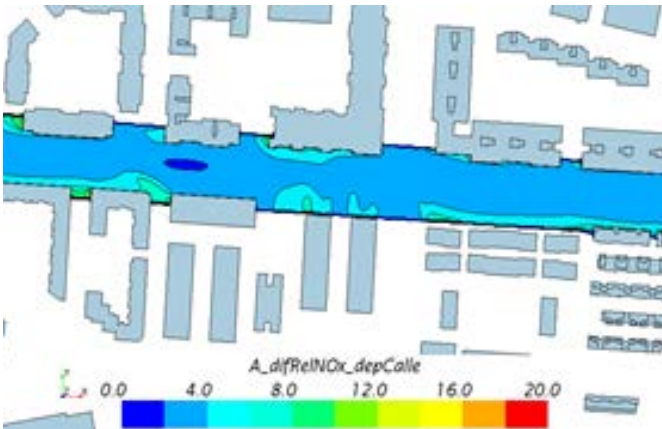
Dicha área de estudio comprende la zona marcada en el recuadro negro ya que es donde mayor concentración de contaminantes se dan (al presentar más tráfico) y donde hay más peatones expuestos.



En naranja la superficie tratada con material fotocatalítico clasificado en función de cada superficie: fachada, acera y calzada. En el recuadro negro, la zona de estudio

La simulación se realizó bajo las condiciones atmosféricas predominantes en la zona, basadas en los datos obtenidos durante las campañas in situ, y se analizaron los siguientes casos:

» Estudio de la influencia de la dirección del viento sobre la efectividad del material fotocatalítico: se estudiaron las direcciones predominantes, SE y SO, sin observar diferencias apreciables entre ellas.



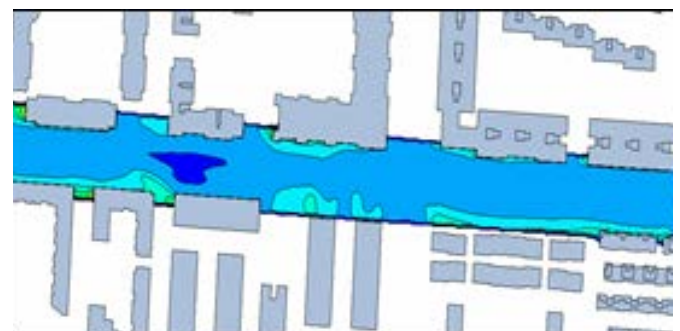
Reducción promedio de NOx para las direcciones de viento en la calle estudiada (SE a la izquierda, SO a la derecha)

» Estudio del impacto de las emisiones del tráfico en la efectividad del material fotocatalítico, con una velocidad del viento

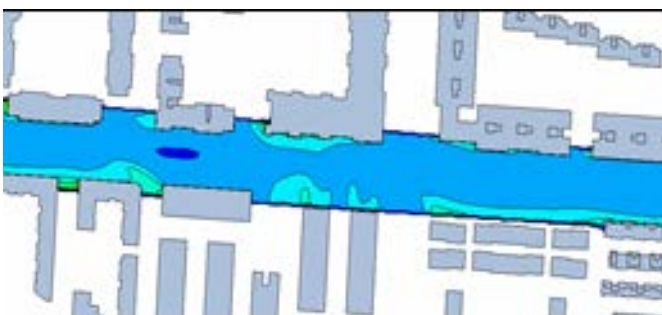
predominante de la zona de  $2 \text{ ms}^{-1}$  (desde 900 hasta 10.800 veh/h, aproximadamente)



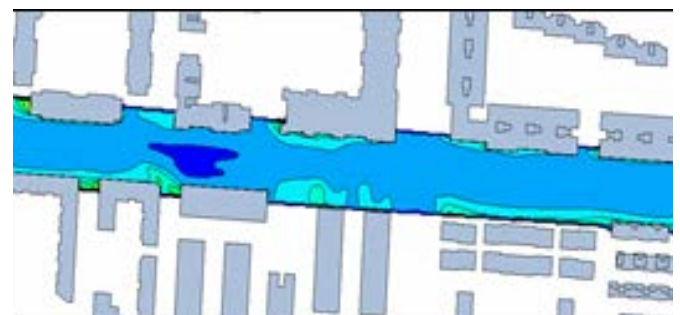
(a)



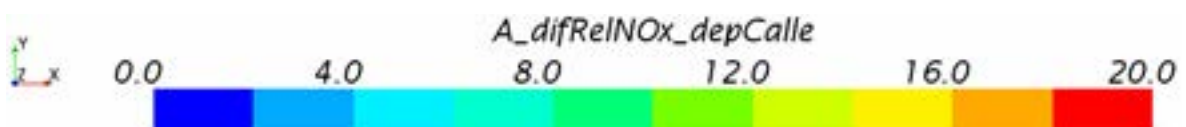
(c)



(b)



(d)



Planos a la altura del peatón de  $\delta\text{NO}_{x\text{dep}}$  para cada escenario de emisión de tráfico: (a) base (900 veh/h); (b) Em1 (3600 veh/h); (c) Em2 (7200 veh/h) y (d) Em3 (10800 veh/h)

Las **conclusiones** alcanzadas fueron:

- Las características de la atmósfera (flujo irregular y turbulencias) impiden obtener una clara evidencia del impacto en el  $\text{NO}_x$  en aire a la altura del peatón debido al efecto fotocatalítico de los materiales
- La posible reducción de  $\text{NO}_x$  depende de varios factores como la concentración en aire, las emisiones del tráfico, la velocidad y dirección del viento, el área tratada, la distancia a la superficie fotoactiva o la iluminación de la misma
- La irregularidad de la disposición de los edificios en una ciudad, así como la heterogeneidad de las emisiones de tráfico, da lugar a una compleja distribución del flujo que produce que el efecto de la deposición de  $\text{NO}_x$  no sea homogéneo ni equivalente a lo largo de toda una calle
- En todos los casos simulados, la reducción de  $\text{NO}_x$  resultó significativa a escasa distancia

de las superficies tratadas, disminuyendo a medida que esta distancia aumenta

- En la modelización global, considerando un área tratada de  $1 \text{ km}^2$  y en el caso irreal de que toda esta superficie estuviera iluminada al mismo tiempo, se obtuvo una reducción máxima promedio en la calle del 3% de  $\text{NO}_x$  a la altura del peatón, en las condiciones atmosféricas predominantes de la zona
- La velocidad del viento influye de manera decisiva en la eficiencia del material. Cuanto menor es la primera, mayor es la segunda puesto que aumenta el tiempo de contacto entre los contaminantes y la superficie fotocatalítica
- En las mismas condiciones meteorológicas y de concentración de los contaminantes de fondo, el efecto del material fotocatalítico es prácticamente el mismo independientemente de la densidad de tráfico existente (y, por tanto, de las emisiones directas de  $\text{NO}_x$ )

## Elaboración de una guía para el uso de materiales fotocatalíticos

Como resultado del proyecto se ha elaborado una guía para el uso de materiales fotocatalíticos, orientada a las Administraciones competentes en la gestión de la calidad del aire urbano, como vía para reducir la contaminación atmosférica por  $\text{NO}_x$  en las ciudades.

En esta guía se aporta información útil para que los gestores de la calidad del aire puedan decidir implementar, o no, este tipo de materiales en determinadas zonas de las ciudades a partir de los resultados obtenidos en el proyecto LIFE MINOX-STREET. Así, entre

otra, se aporta información sobre:

- » Principales resultados del proyecto
- » Análisis coste-beneficio de la implementación de materiales fotocatalíticos en escenarios urbanos reales
- » Criterios para la selección de los materiales fotocatalíticos a aplicar
- » Condiciones de uso y mantenimiento de estos materiales: aplicación, limpieza, etc.

La guía está disponible en la página web del proyecto: <http://www.lifeminoxstreet.com>

## ¿Y DE AHORA EN ADELANTE?

# IMPACTO DEL PROYECTO

Los planes de calidad del aire actuales, tanto los locales como el nacional (Plan Aire II 2017-2019) no contemplan - en su mayoría - el uso de este tipo de materiales, más allá del compromiso de algunas administraciones con proyectos de investigación en la materia.

Por otra parte, el Plan de Innovación para el Transporte y las Infraestructuras 2017-2020 contempla la aplicación de tecnologías fotocatalíticas en infraestructuras de transporte. El hecho de que este Plan haya incorporado una línea estratégica de acción, a desarrollar en 2020 con un presupuesto aproximado de 600.000 euros, deja abierta la puerta a la investigación de las posibles aplicaciones de estos materiales para determinados usos como estaciones, terminales aeroportuarias, intercambiadores, edificios del Grupo Fomento, etc.

En el marco del proyecto LIFE MINOX-STREET, **sólo se ha podido documentar un efecto sumidero de NO<sub>x</sub> inducido por la presencia de materiales fotocatalíticos en condiciones ambientales muy específicas y muy cerca de las superficies fotoactivas**. Por consiguiente, **se considera necesario seguir mejorando las propiedades de estos materiales**, tanto en lo relativo a su rendimiento fotocatalítico como en cuanto a su durabilidad y posible regeneración.

Además, se recomienda encarecidamente la **investigación de nuevos diseños de ingeniería y aplicaciones** que puedan aprovechar

las capacidades descontaminantes de estos materiales para lograr un impacto macroscópico positivo y significativos sobre la calidad del aire de los entornos en los que se instalen estos sistemas, **teniendo en cuenta los siguientes dos parámetros: ratio superficie fotoactiva/volumen de aire a descontaminar y tiempo de residencia** (tiempo que permanece el aire en contacto con la superficie fotoactiva).

Por otra parte, dada la heterogeneidad de los resultados obtenidos en laboratorio de los distintos materiales ensayados, resulta necesario regular el mercado de estos productos de manera que la información que faciliten los fabricantes/distribuidores sea fidedigna y comparable entre sí.

El gran número de variables que intervienen en la eficiencia fotocatalítica de los materiales, hace así mismo necesario seguir investigando sobre ellas; no sólo en cuanto a condiciones meteorológicas sino también en cuanto a posibles reacciones con el sustrato sobre el que se fijan (por ejemplo, interacción del material fotocatalítico con los componentes de las pinturas - como citan algunas fuentes - o, en el caso de aplicación sobre ladrillos, con los componentes del mortero - como se ha identificado en el proyecto LIFE MINOX-STREET).

Finalmente, convendría seguir investigando el posible efecto adverso de estos materiales en caso de aplicaciones a gran escala, analizando la generación de posibles subproductos.

## Datos del proyecto

### LIFE MINOX-STREET

Monitoring and modelling NOx removal efficiency of photocatalytic materials: A STRategy for urban air quality managEmEnT

*LIFE+ Environment Policy and Governance. Theme: Air and Noise: Air quality monitoring*

**Duración del proyecto:** julio 2013 - junio 2018

**Presupuesto total:** 1.982.619 euros

**Presupuesto elegible:** 1.833.829 euros

**Contribución de la UE:** 916.913 euros (50% del presupuesto elegible)

## Beneficiarios

### Coordinador:

INECO Ingeniería y consultoría del transporte

### Socios:

CIEMAT Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas

CEDEX Centro de estudios y experimentación de obras públicas

Ayuntamiento de Alcobendas

## Datos de contacto

### Coordinador del proyecto:

**Gemma Caballero Íñigo**

[gemma.caballero@ineco.com](mailto:gemma.caballero@ineco.com)

[lifeminoxstreet@ineco.com](mailto:lifeminoxstreet@ineco.com)