

Proyectos de **I+D+i**  
2011-2013



**Preparación de materiales de construcción de última generación para la mejora de la sostenibilidad ambiental en entornos urbanos: disminución de gases contaminantes (NO<sub>x</sub>) emitidos por los sistemas de transporte**

Universidad de Córdoba | Empresa colaboradora Grupo PUMA



Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
**CONSEJERÍA DE FOMENTO Y VIVIENDA**



Unión Europea

Fondo Europeo  
de Desarrollo Regional





**Preparación de materiales de construcción de última generación para la mejora de la sostenibilidad ambiental en entornos urbanos: disminución de gases contaminantes (NO<sub>x</sub>) emitidos por los sistemas de transporte**

© Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. Consejería Fomento y  
Vivienda. Junta de Andalucía. 2012

Universidad de Córdoba, Empresa Grupo PUMA

Córdoba a 31-07-2012.

## 1. Introducción y antecedentes

Respirar aire limpio y sin riesgos para la salud es un derecho inalienable de todo ser humano. La calidad del aire, o mejor dicho su degradación o contaminación, es el resultado de fenómenos complejos derivados de una pluralidad de causas y efectos asociados, en general, a la actividad humana y a la emisión de contaminantes a la atmósfera. Teniendo en cuenta sus importantes efectos en la salud y el medioambiente, disponer de un aire limpio se ha convertido en un objetivo prioritario de la política ambiental y de las estrategias de desarrollo sostenible, ya que es un factor determinante de la calidad de vida y que se percibe como una demanda social creciente.

A partir de la revolución industrial, las actividades humanas ha originado un exceso de quema de combustibles fósiles y de emisiones industriales, que junto con la evolución de los sistemas de transporte y del crecimiento desordenado de las ciudades, han iniciado cambios muy profundos en la composición de la atmósfera y una contaminación de la misma que afecta directamente a la salud de las personas y a los ecosistemas. En este sentido, uno de los grandes desafíos al que se enfrenta la sostenibilidad urbana es el de los cambios e impactos cuantitativos y cualitativos no deseados que surgen dentro de las ciudades derivados o asociados a los modos de vida urbanos. Esto exige la puesta en práctica de políticas integradas innovadoras, pues han de incidir no sólo en la forma de vivir de los ciudadanos sino también en los patrones de planificación urbanística, en los elementos estructurales de las ciudades y modelos de transporte de la población.

El problema de la contaminación del aire continúa siendo motivo de seria preocupación en España y en el resto de Europa por sus efectos nocivos sobre la salud humana y el medio ambiente. En las dos últimas décadas se han realizado mejoras en el control y limitación de ciertos contaminantes. No obstante, aún persisten concentraciones elevadas de otros contaminantes, como son el dióxido de nitrógeno y las partículas en suspensión, así como episodios de contaminación por ozono troposférico que se agudizada en el período estival por la mayor presencia de óxidos de nitrógeno.

En los entornos urbanos, el transporte es uno de los focos principales de emisión de contaminantes y gases. Según recoge el Plan de Infraestructuras para la Sostenibilidad del Transporte en Andalucía 2007-2013 (PISTA 2007-2013) un vehículo medio emite por su tubo de escape una combinación de sustancias contaminantes entre las que destacan por su nocividad:

- El CO<sub>2</sub>, gas que acentúa el efecto invernadero y el cambio climático en nuestro planeta
- Los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), gases que irritan el sistema respiratorio y aumentan la susceptibilidad a las infecciones respiratorias, contribuyen a la formación de lluvia ácida y también acentúan el efecto invernadero y el cambio climático del planeta.
- Los hidrocarburos y compuestos orgánicos procedentes de la combustión incompleta de los combustibles, los policíclicos (HAPs) y aromáticos son cancerígenos, produciendo otros la irritación de la vista y vías respiratorias superiores.
- La reacción de los compuestos orgánicos con los óxidos de nitrógeno produce ozono en las capas bajas de la atmósfera, especialmente en una región que, como la andaluza, alcanza temperaturas muy elevadas en el período estival. Este cóctel fotoquímico produce dolor de cabeza e irritación del sistema respiratorio además de contribuir a la degradación de las masas forestales.

En los estudios realizados por la UE, el coste que provoca el ruido y la contaminación emitidos por el sistema de transporte se estima en un 0,6% del PIB. Más del 90% de este valor está asociado al transporte por carretera. En el caso andaluz, según el plan PISTA, la cifra de las pérdidas se elevaría hasta los 700 Millones de euros anuales.

Según el Inventario de Emisiones Atmosféricas de Andalucía, y más específicamente en lo relativo a las emisiones de las fuentes de área móviles, los gases NO<sub>x</sub> constituyen la segunda emisión contaminante, en volumen, tras los gases CO y CO<sub>2</sub>. En la Tabla 1 se recoge la cantidad de NO<sub>x</sub> emitida en el año 2005 en Andalucía por diversos medios de transporte.

*Tabla 1: Reacciones Emisiones de NO<sub>x</sub> debidas a los sistemas de transporte en Andalucía en el año 2005.*

<b>Fuente móvil</b>	<b>Tráfico rodado</b>	<b>Tráfico aéreo</b>	<b>Tráfico marítimo</b>	<b>Tráfico ferroviario</b>	<b>Maquinaria agrícola</b>	<b>Otros transportes y maquinaria móvil</b>
<b>NO<sub>x</sub> / t</b>	79289	364	364	537	15812	9014

### 1.1 Efectos nocivos de los óxidos de nitrógeno.

Los óxidos de nitrógeno tienen una toxicidad muy elevada, incluso superior a la del monóxido de carbono. Se ha comprobado que el dióxido es unas cuatro veces más tóxico que el monóxido; presentan toxicidad cruzada con el ozono y de ahí su importancia toxicológica al formar nitratos de peracilo (compuestos orgánicos tóxicos, de formulación compleja, que se forman por reacciones fotoquímicas en presencia de la luz solar).

Las consecuencias que sobre la salud origina la exposición a los gases NO<sub>x</sub> se agravan con el aumento de su concentración en la atmósfera:

- Concentraciones de 10 mg/m<sup>3</sup> durante 10 min originan intensos trastornos respiratorios, aunque es reversible. Los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), gases que irritan el sistema respiratorio y aumentan la susceptibilidad a las infecciones respiratorias, contribuyen a la formación de lluvia ácida y también acentúan el efecto invernadero y el cambio climático del planeta.
- Exposiciones a 150 mg/m<sup>3</sup> producen edema pulmonar y pueden dar lugar a una disminución definitiva de la función respiratoria.
- Concentraciones de 600-900 mg/m<sup>3</sup> causan la muerte al cabo de pocos días por asfixia.

En general, la exposición crónica a bajas concentraciones de este contaminante se ha correlacionado con un incremento en la frecuencia de enfermedades respiratorias infecciosas en los niños, con el desarrollo de enfermedades respiratorias crónicas, con el envejecimiento acelerado del pulmón y con la disminución de la capacidad pulmonar. La legislación establece valores límites, para los diferentes contaminantes, cada vez más rigurosos en el tiempo, tanto para los valores umbrales como para el número de superaciones. Por ejemplo, desde el 1 de Enero de 2010 no se puede superar la media anual de 40 µg/m<sup>3</sup> para el NO<sub>2</sub>. No obstante, como se observa en la Figura 2, este límite es normalmente superado en nuestras ciudades.

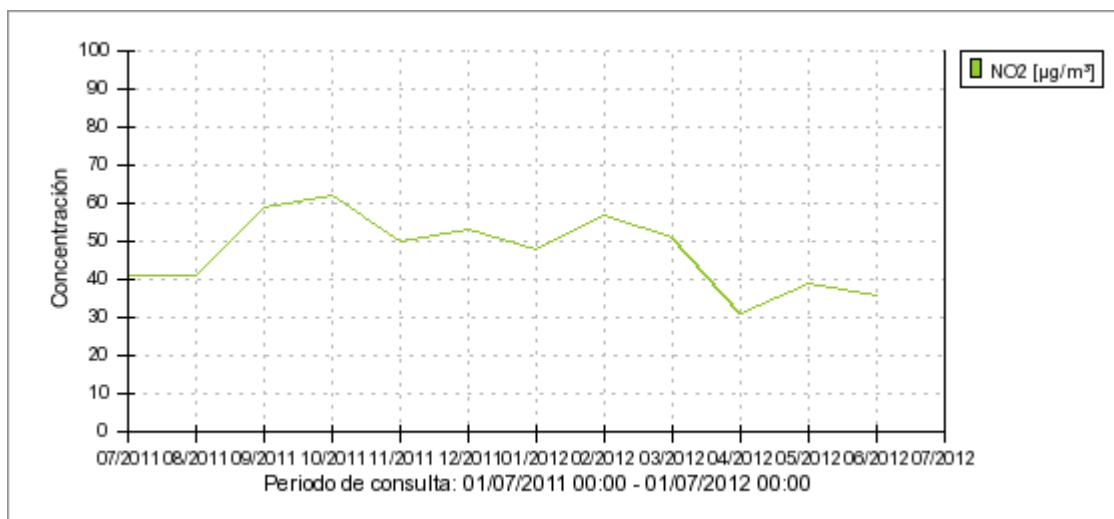


Figura 1: Datos mensuales de mediciones de NO<sub>2</sub> realizadas en la estación de Plaza España de la ciudad de Madrid. Información obtenida de la siguiente página web del ayuntamiento de Madrid: <http://www.mambiente.munimadrid.es/svca/index.php>

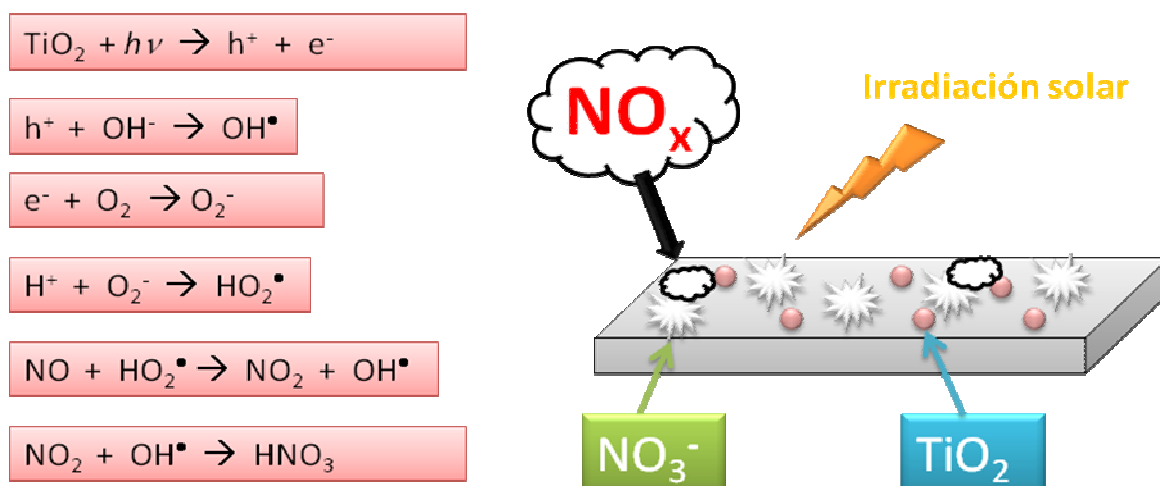
Otra problemática derivada de la presencia de gases NO<sub>x</sub> en la atmósfera, más específicamente el N<sub>2</sub>O, es la relacionada con su capacidad para producir un calentamiento de la misma (efecto invernadero) de una forma 207 veces más efectiva que el CO<sub>2</sub>. Por ello, aunque su emisión por los medios de transporte sea bastante inferior a la de CO<sub>2</sub>, no se puede menospreciar su contribución al cambio climático del planeta.

## 1.2 Materiales de construcción para la descontaminación atmosférica.

Independientemente de que se mejoren la eficiencia energética y medioambiental de los medios de transporte, nuestra sociedad está aún lejos de eliminar las emisiones de NO<sub>x</sub> debidas al uso de los mismos. En este sentido, resulta imprescindible estudiar las acciones que favorezcan su eliminación de la atmósfera en los centros urbanos, lo que justifica el desarrollo de este proyecto. Una manera de disminuir la concentración de gases NO<sub>x</sub> en la atmósfera de una ciudad es mediante la creación de grandes superficies descontaminantes que permitan la “limpieza” de los mismos en su entorno. Así, desde los muy recientes trabajos realizados por L. Cassar y colaboradores, se conoce que los materiales de construcción, principalmente el cemento, pueden actuar como descontaminantes de gases NO<sub>x</sub> y la fracción de BTEX (Benceno, Tolueno, Etanol y Xileno) de los compuestos orgánicos volátiles. Esto es posible gracias al mecanismo de reacción fotoquímica que presentan aditivos como el TiO<sub>2</sub>, que se activa por la exposición a la luz solar ultravioleta y origina descomposición química de los contaminantes anteriormente mencionados, y por tanto su eliminación del aire. En el caso específico de los gases NO<sub>x</sub>, la degradación transcurriría según la secuencia de reacciones de la Figura 2. Mediante este mecanismo, los gases se oxidan y se retienen como especies nitrato en el material de construcción o, más probablemente, se eliminan de la superficie del mortero como ácido nítrico débil.

Este desarrollo tecnológico no se ha implementado en gran medida sobre los morteros secos, material de construcción muy empleado en nuestro país para el recubrimiento final de las superficies edificables. Además, la porosidad de este material es muy superior a la que presenta el cemento, por lo que el contacto con el aire atmosférico estaría más favorecido, obteniéndose de este modo un mejor rendimiento de la acción descontaminante. Por tanto, es de esperar que el uso de morteros secos de última generación, con propiedades descontaminantes, convierta a los nuevos elementos edificables (terminales de transporte ferroviario y aéreo, caminos, edificios, infraestructuras viarias, etc.) en núcleos

descontaminantes de la atmósfera urbana de las grandes vías, las plazas y las calles de nuestras ciudades.



*Fig. 2: Reacciones fotoquímicas de degradación de los gases NO<sub>x</sub> sobre la superficie de materiales de construcción que contienen aditivos fotocatalizadores (vg. TiO<sub>2</sub>).*

La elección de TiO<sub>2</sub> como aditivo fotocatalizador es consecuencia de sus propiedades inherentes tales como elevada estabilidad, baja toxicidad, compatibilidad con los materiales de construcción tradicionales y su elevada actividad fotocatalítica en comparación con otros óxidos metálicos, que lo convierten en el fotocatalizador más adecuado para incluirlo en los materiales de construcción fotocatalíticos. Sin embargo, el coste de este producto es lo suficientemente elevado como para excluir su uso de forma extensa, lo que hace que la implantación de estos nuevos materiales de construcción con prometedoras aplicaciones descontaminantes sea muy limitada en nuestras ciudades.

Una alternativa interesante al TiO<sub>2</sub> es el óxido de hierro. Este es un óxido metálico con buenas propiedades fotocatalíticas y de bajo coste. La hematita (α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) es el óxido de hierro con propiedades semiconductoras tipo *n* más estable en condiciones ambientales, que le permiten activarse como fotocatalizador con la irradiación solar. A pesar de que su actividad fotocatalítica es inferior a la de la fase anatasa del TiO<sub>2</sub>, este óxido puede absorber la luz visible. Por el contrario la actividad fotocatalítica del anatasa-TiO<sub>2</sub> sólo ocurre con la luz ultravioleta, lo que únicamente permite aprovechar el 4.5 % del total de energía de la luz del sol, compuesta en su mayoría por luz visible. De este modo, gracias a la capacidad de absorción óptica de α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en una región del visible, el uso combinado del tándem TiO<sub>2</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> podría dar lugar a mayores rendimientos de los procesos fotocatalíticos en el que ambos estén involucrados. Aumentar el contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con relación a TiO<sub>2</sub> abarataría la producción de materiales de construcción con capacidad descontaminante.

Por otro lado, y siguiendo el Plan PISTA, se ha de trabajar en la mejora de la sostenibilidad en la construcción de las infraestructuras y buscar acciones que incidan en el reciclado de materiales y en el aprovechamiento de residuos para eliminar vertidos. De hecho en este Plan propone varias líneas de actuación para garantizar tanto el abastecimiento de los materiales necesarios para ejecutar los proyectos previstos, como para asegurar la sostenibilidad de su ejecución. En este sentido, resulta interesante saber que los óxidos de hierro pueden ser obtenidos como subproductos de diversos procesos industriales: acerías, operaciones de limpieza en la industria naval, cenizas, lodos, etc, Figura 3. Por tanto la



valorización de estos sub-productos industriales permitirá la preparación de adiciones fotocatalíticas de bajo coste para la preparación de materiales de construcción descontaminantes.



*Fig. 3: Actividades industriales que generan residuos con alto contenido en hierro: (izquierda) corte de granito, (derecha) arenado de superficie la externa de embarcaciones.*

El trabajo a realizar en este proyecto consistirá en estudiar la valorización de residuos industriales que contengan o sean susceptibles de ser transformados en materiales con propiedades fotocatalizadoras, para su inclusión como aditivos de bajo coste en la preparación de materiales de construcción auto-descontaminantes. Esta idea es totalmente innovadora pues hasta ahora la valorización de residuos en materiales de construcción se ha utilizado para mejorar o mantener las propiedades mecánicas del mortero y reducir en los casos posibles la proporción de cemento utilizado, sin embargo, no se ha estudiado que estos productos sirvan para desarrollar nuevas funcionalidades (la fotocatalisis, en nuestro estudio). Por otra parte, en lo que respecta a los materiales de construcción con propiedad descontaminante sólo se ha estudiado el empleo de un aditivo químico de elevado coste ( $\text{TiO}_2$ ) y no existe nada desarrollado sobre la utilización de residuos para estas funcionalidades.

### 1.3 Fuentes de Información

1. Principios de ecotoxicología. Diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente. Miguel Capó Martí. McGRAW-HILL (2002).
2. Calidad del aire en las ciudades. Clave de sostenibilidad urbana. Observatorio de la Sostenibilidad en España
3. Química atmosférica. Origen y efectos de la contaminación. Xavier Domenech. Mirabueno ediciones (1995).
4. Ministerio de Medio ambiente y medio rural. [http://www.marm.es/index\\_es.htm](http://www.marm.es/index_es.htm)
5. Red de vigilancia y control de la calidad del aire en Andalucía. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/InicioPortalWeb>
6. Red valenciana de vigilancia y control de la contaminación atmosférica. <http://www.cma.gva.es/web/indice.aspx?nodo=27&idioma=C>
7. Red de vigilancia de la calidad del aire del ayuntamiento de Madrid. [http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/opencms/calair/contAtmosferica/Nueva\\_Red.html](http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/opencms/calair/contAtmosferica/Nueva_Red.html)
8. Plan de Infraestructuras para la Sostenibilidad del Transporte en Andalucía 2007-2013 (PISTA 2007-2013), Consejería de Fomento y Vivienda, Junta de Andalucía.
9. Inventario de emisiones a la atmósfera en la Comunidad Autónoma Andaluza. Año: 2005. Capítulo 4: Emisiones de las Fuentes de Área Móviles. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
10. Patentes europea EP-1-600-430-A1 y de Estados Unidos US 7,300,514-B2

11. J. Chen, C.S. Poon, "Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications, *Building & Environment* 44 (2009) 1899-1906.
12. C.S. Poon, E. Cheung, "NO removal efficiency of photocatalytic paving blocks prepared with recycled materials", *Construction and Building Materials* 21 (2007) 1746.
13. K. Sivula, F. Le Formal, M. Grätzel, *ChemSusChem* 4 (2011) 432-449.
14. F. Yang, Y. Takahashi, N. Sakai, T. Tatsuma, *Journal of Materials Chemistry* 21 (2011) 2288.
15. L. Wan, Y. Gao, X-H. Xia, Q-R. Deng, G. Shao, Phase selection and visible light photo-catalytic activity of Fe-doped TiO<sub>2</sub> prepared by the hydrothermal method, *Materials Research Bulletin* 46 (2011) 442.

## 2. Objetivos perseguidos y resultados previsibles

El trabajo que se pretende desarrollar se presenta como un proyecto destinado a promover la investigación de excelencia y la actividad investigadora para incrementar la innovación y la transferencia de conocimientos desde la comunidad científica a la sociedad. Más específicamente, aborda iniciativas que incrementen el conocimiento científico y permitan introducir innovaciones tecnológicas para reducir el impacto ambiental originado por las infraestructuras y los medios de transporte, mediante la eliminación de los gases de efecto invernadero emitidos y su contribución a la mitigación de los efectos del cambio climático.

El principal objetivo de este proyecto es el desarrollo de materiales de construcción tradicionales con nuevas propiedades, concretamente, el desarrollo de morteros secos con capacidad descontaminante, mediante la valorización de residuos industriales. Se pretende preparar materiales que, variando los componentes de su dosificación y con materias primas de bajo coste, sean capaces de actuar de forma efectiva sobre los agentes nocivos del aire generados por la actividad del transporte urbano, específicamente en los óxidos de nitrógeno, minimizándolos y dejando un aire más limpio y menos contaminado en los centros urbanos.

Los resultados previsibles son:

1. La preparación de un material de construcción (mortero seco), de dosificación adecuada, que empleando residuos industriales actúe como descontaminante fotoquímico de la atmósfera del entorno.
2. La preparación de un mortero de bajo coste, mediante la optimización de los aditivos fotoquímicos a utilizar, que permita su uso extendido en la construcción civil, más específicamente en la infraestructuras del transporte (terminales de transporte ferroviario y aéreo, caminos, edificios, infraestructuras viarias, etc.)

Ambos resultados se pretenden obtener a corto plazo. No obstante, el uso práctico de este tipo de producto se conseguiría a más largo plazo, pues para rebajar el coste final del producto se tendrán que optimizar varios parámetros: disponibilidad de residuo y transporte, operaciones de adecuación y transformación.

Para la consecución de estos objetivos es necesaria la implicación en el Proyecto de una empresa especializada del sector, en este caso, la empresa Grupo Puma S.L.

### **3. Aspectos innovadores y justificación del proyecto**

#### **3.1 Grado de innovación**

El proyecto aquí planteado pretende desarrollar una nueva generación de materiales que además de cumplir su función estructural, para la cual se diseñaron en sus inicios, aporten un plus de valor añadido que los hagan sostenibles y beneficiosos para el medio ambiente.

El principal grado de innovación resulta de la preparación de morteros de bajo coste con capacidad descontaminante, más específicamente, con capacidad para actuar sobre los gases NO<sub>x</sub>. El uso combinado de residuos procedentes de otros sectores industriales, presentes en Andalucía, con materiales fotocatalíticos clásicos, como el TiO<sub>2</sub>, les permitirán ser más competitivos económicamente con los materiales desarrollados en la actualidad.

El éxito de este proyecto permitirá a la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía situarse en la vanguardia del conocimiento y desarrollo de materiales de construcción de última generación.

Acciones similares a la mostrada en la presente memoria se encuentran tanto a nivel nacional como europeo (Photocatalytic Innovative Covering Applications for Depollution Assessment (PICADA 2006) o Visible Light Active PhotoCATalytic Concretes for Air Pollution Treatment (Light2Cat 2011)) con la salvedad de que en todos los casos únicamente utilizan los óxidos de titanio como material fotocatalítico, modificándolo o no, pero en ningún caso se trata el uso alternativo o combinado de otros materiales fotocatalíticos más económicos, que es el objetivo principal de este proyecto.

#### **3.2 Justificación.**

Las ideas expuestas en esta memoria para el desarrollo del proyecto quedan recogidas en el plan PISTA, concretamente, en el apartado IV/14/4 referente a “La sostenibilidad en la construcción de las infraestructuras de transporte”, y en el apartado IV/15 referente a “Principios para la sostenibilidad del transporte en las aglomeraciones urbanas”.

Los objetivos que se pretenden alcanzar en este proyecto también están perfectamente recogidos dentro de la filosofía del plan PISTA, de acuerdo con una nota de prensa publicada por la Consejería de Fomento y vivienda, donde resumía en 5 puntos los objetivos del PISTA y entre ellos podemos destacar dos:

1. Favorecer el uso racional y sostenible de los recursos naturales y reducir las tendencias de crecimiento de la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la lucha contra el cambio climático.
2. Mejorar la calidad de vida de la población de Andalucía, adaptándose a las necesidades específicas de las ciudades y pueblos de las áreas rurales, las ciudades medias y los ámbitos metropolitanos.

Más específicamente, el interés intrínseco y ventajas que puede suponer la realización de este proyecto para la Consejería de Fomento y Vivienda u otras administraciones, se justifica por las siguientes razones:

- Contribuir a la sostenibilidad de la construcción de las infraestructuras del transporte

- Desarrollar un material capaz de disminuir la concentración de gases NOx en la atmósfera que según el Inventario de Emisiones Atmosféricas de Andalucía constituyen una de las principales fuentes de emisión contaminante, en volumen, tras los gases CO y CO<sub>2</sub>.
- Disminuir los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en la atmósfera y por tanto disminuir la posibilidad de irritación del sistema respiratorio y la susceptibilidad a las infecciones respiratorias debido a este gas, además de contribuir a combatir contra la formación de lluvia ácida y minimizar el efecto invernadero (calentamiento global). Todo ello ayudará a desarrollar entorno urbano, natural y global más saludable.
- El reciclado de materiales y el aprovechamiento de residuos para eliminar vertidos.
- El empleo de residuos como material fotocatalítico o junto a materiales fotocatalíticos clásicos, como el TiO<sub>2</sub>, y producir materiales descontaminantes competitivos económicamente con los materiales desarrollados en la actualidad y que puedan emplearse en un mayor porcentaje de obras públicas y privadas.



