



**Proyecto Ecobide. Evaluación de la
descontaminación de los NOX en Montebideo
etorbidea**

Autor: Aitor Larrucea Abad

Institución: Ayuntamiento de Durango

Resumen

Actuación orientada a la mejora de la calidad del aire urbana en una zona sensible del municipio y la cual ha sido promovida por el Ayuntamiento de Durango, con el apoyo de la Agenda Local 21.

Aprovechando las obras de reurbanización planificadas en la avenida Montevideo, el Proyecto ECOBIDE parte de la necesidad de actuar en esta zona identificada como sensible debido a las altas intensidades de tráfico que soporta y unos niveles de NO₂ que superaban los 40 g/m³. Llegados a este punto, el Ayuntamiento de Durango promovió la idea de poner en práctica una actuación pionera en la mejora de la calidad del aire urbana y la prevención de la salud de las personas, la aplicación de un asfalto capaz de descontaminar los óxidos de nitrógeno, realizando la evaluación del impacto ambiental y en la salud de las personas antes y después de la actuación, evaluación que hasta el momento en ninguna ciudad se había llevado a cabo.

Dicha evaluación se ha llevado a cabo mediante el análisis de concentración de contaminantes NO_x y O₃ en laboratorio del Centro de Investigación Azterlan, con comparativas de aforos, durante un año y medio. Por lo que las siguientes conclusiones se puede determinar son concluyentes y totalmente demostradas científicamente:

Se cuantifica en un 50% la reducción media en las concentraciones de NO_x debido al efecto purificador del asfalto NOXer, de forma que los resultados obtenidos justifican en un año la actuación de mejora.

Minimización de situaciones críticas provocadas por el NO, contaminante primario de los tubos de escape.

Los niveles de descontaminación aumentan con la radiación, mayor potencial por tanto en verano. Asimismo, por efecto de reducción de los NO_x se ha obtenido una reducción significativa del O₃ en verano.

Desde el punto de vista normativo, el nivel medio de NO₂ durante el control previo superaba ligeramente el valor límite anual, situación que no se ha repetido una vez aplicado el NOXer. ° Al tratarse de una reurbanización asfaltado integral, la inversión del tratamiento NOXer apenas supone un 4% del capítulo de asfaltado, mientras que supone un 1% respecto al proyecto de reurbanización, por lo que ha supuesto una inversión totalmente rentable económica, social y medioambientalmente.

Palabras claves: Contaminación atmosférica; aire; movilidad; calidad ambiental; salud

1. CONCEPTOS PREVIOS

La actual sensibilidad social hacia el medio ambiente hace que la calidad del aire sea un aspecto fundamental a la hora de valorar la calidad de vida y la salud de las personas. Es responsabilidad de las administraciones mantener una atmósfera con niveles de contaminación admisibles, para lo cual existe una legislación que determina las formas de controlarla y actuar en caso de identificarse situaciones sensibles. No obstante, la legislación actual no especifica las medidas y actuaciones pertinentes en cada caso, por lo que a partir de una serie de propuestas y guías, las mejoras deben desarrollarse e impulsarse a diferentes niveles (políticas, normativas, planes, etc.).

Las principales actuaciones dirigidas hacia la disminución de las emisiones de tráfico se orientan en dos direcciones. Por un lado la disminución de emisiones mediante desarrollos tecnológicos exigidos a los productores de vehículos mediante las normas Euro y en segundo lugar, las modificaciones en la movilidad urbana. No obstante, la aparición de materiales con un potencial de descontaminación como el Noxer abre un nuevo campo de actuación, la cual resulta de especial interés para aquellas zonas en las que las medidas tradicionales no pueden ser aplicadas, tal y como sucede en el caso que nos ocupa.

A pesar de tratarse de una actuación desarrollada en otras ciudades Europeas, nunca antes se había medido la eficacia de la misma con tanto rigor como en el caso planteado en Durango. Por ello, el proyecto se considera una experiencia piloto, de forma que los resultados aportados por el estudio permitirán realizar un aprendizaje que determinará la viabilidad que pueda tener en otras zonas de interés.

El tráfico supone la principal fuente de contaminación en los núcleos urbanos, pudiendo provocar situaciones sensibles en aquellos lugares donde se concentra la ciudadanía. Estudios recientes desvelan como la contaminación en cierto lugar es proporcional a la densidad de tráfico, de forma que las grandes urbes son las principales afectadas, si bien bajo situaciones particulares pueden producirse episodios de contaminación en núcleos de menor población.

Además de la mayor densidad de tráfico, un factor importante para entender el aumento de la contaminación es la dieselización del parque vehicular. El cambio tecnológico en los motores ha supuesto un ahorro económico a cambio de incrementar las emisiones contaminantes, especialmente de óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado ultrafino (PM_{10}).



Figura 1. Retención de tráfico habitual en Landako.

El intensivo y sistemático programa de medidas adoptadas en el proyecto se orienta, de forma preferencial, hacia los óxidos de nitrógeno (NO_x), prestándose atención a las siguientes dos claves:

- Contaminación emitida por el tráfico.
- Transformación de óxidos de nitrógeno gaseosos en nitratos bajo condiciones meteorológicas variables.

Óxidos de nitrógeno

Se aplica el término óxidos de nitrógeno (N_xO_y) a varios compuestos químicos binarios gaseosos formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno. De los ocho óxidos que puede formar el nitrógeno, sólo tres aparecen en la atmósfera, ya que el resto son inestables: monóxido de dinitrógeno (N_2O), monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2), los tres en estado gaseoso.



Figura 2. Central térmica de ciclo combinado de Boroa.

El N_2O es incoloro, no tóxico ni inflamable y procede fundamentalmente de fuentes naturales y actividades agrícolas; la principal es la desnitrificación microbiana del nitrógeno de origen proteico.

Por su parte, monóxido de nitrógeno y el dióxido de nitrógeno (NO_x) constituyen dos de los óxidos atmosféricos más importantes toxicológicamente, por lo que se emplean como indicadores de la calidad del aire. El monóxido de nitrógeno es un gas a temperatura ambiente de olor dulce penetrante, fácilmente oxidable a dióxido de nitrógeno, mientras que el dióxido de nitrógeno tiene un fuerte olor desagradable. El dióxido de nitrógeno es un líquido a temperatura ambiente, pero se transforma en un gas pardo-rojizo a temperaturas superiores a los 21 °C.

La principal fuente de NO_x en zona urbana es el tráfico, es decir, la suma de los escapes de vehículos motorizados (sobre todo diesel y de mezcla pobre), aunque también son liberados por la combustión del carbón, petróleo o gas natural y durante procesos tales como la soldadura por arco, galvanoplastia, grabado de metales y detonación de dinamita.

Una vez liberados al aire, los NO_x pueden transformarse a contaminantes secundarios como resultado de una serie de reacciones fotoquímicas. Se trata de reacciones complejas producidas en la atmósfera donde intervienen radicales OH^- , O_3 , NO_x y otros, provocando el smog fotoquímico o boina de contaminación típica de zonas con gran concentración de vehículos a motor.

Nitratos

Los nitratos son sales del ácido nítrico (HNO_3) en los que está presente el anión NO_3^- y son una parte esencial de los abonos utilizados en la agricultura y la jardinería. La sal de nitrato natural más abundante es el nitrato de calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, el cual, junto con el nitrato de sodio, NaNO_3 , subproducto en la síntesis del ácido nítrico, son la base para la producción industrial de otros nitratos como el nitrato de potasio (KNO_3), utilizado en la pólvora negra, además de como fertilizante. Existen 2 vías naturales en la formación de nitratos:

- Mediante la descomposición bacteriana de compuestos nitrogenados como proteínas, urea, etc. se forma amoníaco (NH_3) o amonio (NH_4^+), los cuales en presencia de oxígeno son transformados en ácido nítrico (HNO_3) por microorganismos de tipo nitrobacter. Finalmente, los ácidos son atacados por cualquier base del medio (generalmente carbonatos), formando el nitrato correspondiente (generalmente nitrato de calcio: $\text{CaCO}_3 + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$).
- La segunda vía se produce en la atmósfera a través de la acidificación de los óxidos de nitrógeno en contacto con el agua de lluvia. Este HNO_3 precipita con la lluvia y ataca los carbonatos u otros minerales básicos de los suelos, formando las sales correspondientes: $\text{NO}_x + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HNO}_3$

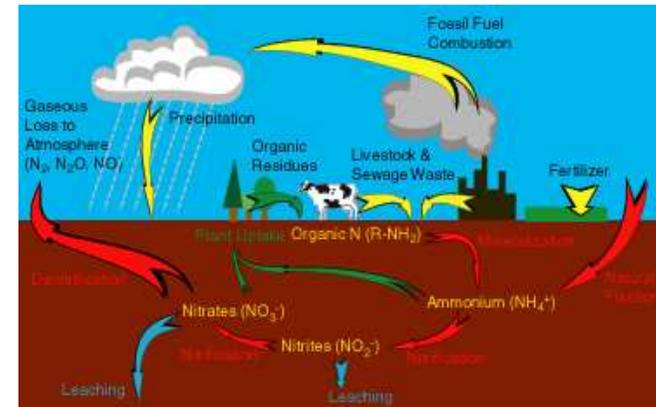


Figura 3. Ciclo del nitrógeno.

En presencia del asfalto Noxer, la formación de nitratos resulta una vía alternativa donde el TiO_2 actúa como fotocatalizador de los óxidos de nitrógeno, de forma que los nitratos quedan adheridos a la superficie hasta su eliminación. La acidificación no se produce en la atmósfera, sino que los nitratos se acidifican al ponerse en contacto con el agua, bien de lluvia o la utilizada en la limpieza de la calle mediante el baldeo de agua, por lo que el destino final será el alcantarillado y finalmente el río.

Ha sido necesario combinar el trabajo de campo con el de gabinete, de forma que la respuesta a las demandas planteadas por el Ayuntamiento resulta plenamente satisfactoria. La interpretación de los resultados de los diferentes controles permite plantear conclusiones de ámbito general y local. En efecto, el informe presenta resultados y conclusiones que permiten visualizar la mejora en los niveles de calidad del aire a consecuencia de la actuación de mejora llevada a cabo. Al estudio propiamente dicho, deben añadirse los planes de comunicación diseñados de forma específica. En efecto, se atienden las necesidades planteadas desde el Ayuntamiento.

Por último, indicar que a la validez, nivel de detalle y rigor de las aportaciones propias del diagnóstico, deben añadirse las oportunidades que se derivan de un estudio de esta naturaleza, ya que además de poder utilizarse como referencia local, permiten diseñar planes específicos de acción que tengan en todo momento en cuenta sus afecciones sobre la calidad de vida de las personas.

2. ANTECEDENTES

La sensible situación registrada en la calidad del aire de Durango durante los años 2005 y 2006, unido a la sensibilidad ciudadana existente, llevó al Ayuntamiento a planificar y desarrollar un plan de acción municipal con el objetivo de mejorar la situación a través de actuaciones sobre las principales fuentes de contaminación. A lo largo de los últimos años, el Plan de Acción de Durango ha sido ejecutado con éxito, si bien aún quedan aspectos por desarrollar y en los que mejorar.

Para entender la decisión de realizar el proyecto Ecobide como actuación de mejora en el núcleo urbano de Durango, debe atenderse a las conclusiones alcanzadas en los últimos estudios sobre la calidad del aire del municipio. Tanto en los estudios desarrollados por el Gobierno Vasco, como en el estudio avanzado realizado por Azterlan, el tráfico se identifica como una de las principales fuentes contaminantes del municipio junto con el sector industrial.

Asimismo, los registros históricos de la estación de San Roque presentan una tendencia de los indicadores de tráfico en aumento. La figura 1 presenta los niveles medios anuales de dióxido de nitrógeno (NO_2) en Durango, Amorebieta-Etxano y Bilbao, contaminante gaseoso emitido por el tráfico y con límites legales establecidos (RD 102/2011). El aumento observado hasta el año 2007 se relaciona con el crecimiento del parque vehicular y la dieselización de motores. En cambio, la disminución de los últimos años se justifica por la coyuntura económica generalizada y la menor actividad en la zona, si bien los niveles máximos alcanzados podrían superarse una vez normalizada la situación.

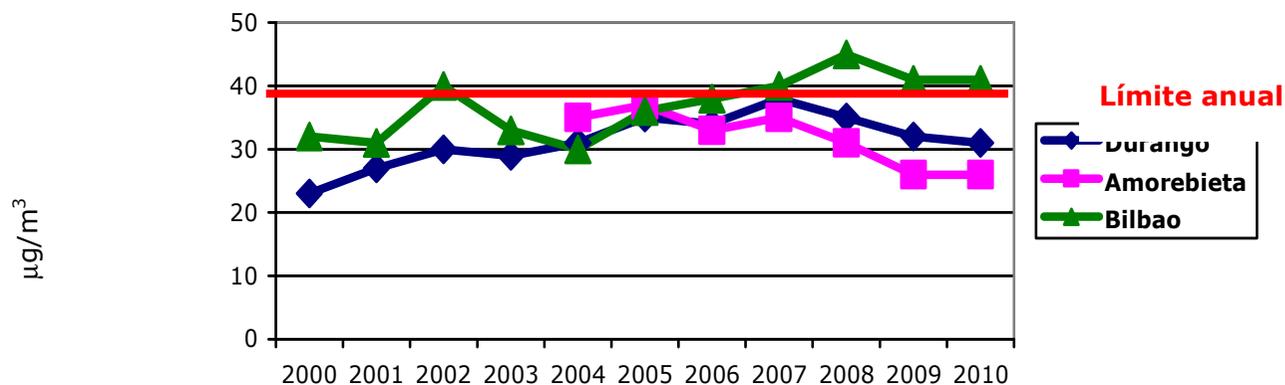


Figura 4. Niveles medios anuales de NO_2 .

Considerando la aplicación de medidas exitosas para disminuir la incidencia provocada por el sector industrial en la atmósfera local, a través del presente proyecto, el Ayuntamiento fija el campo de actuación sobre la principal fuente contaminante actual en el núcleo urbano de Durango, el tráfico. Con el mismo objetivo de mejora, pero al margen de este proyecto, también se actúa sobre aspectos relacionados con la movilidad, para lo cual, se ha desarrollado un plan de movilidad sostenible orientado a disminuir su impacto ambiental y aumentar la calidad de vida de las personas.

Durante el estudio sobre las intensidades de tráfico realizado en 2009, Montebideo etorbidea presentó una Intensidad Media Diaria (IMD) de 5.882 vehículos, resultado que puso de manifiesto la situación desfavorable de la zona debido a las emisiones contaminantes y el ruido, lo cual provocó que desde la Oficina Técnica Municipal, Montebideo etorbidea se identificara como zona de calidad del aire sensible.

La alta intensidad de tráfico en una zona urbana de mucha actividad ciudadana, unido a la imposibilidad de aplicar medidas dirigidas hacia la movilidad, fueron los motivos por los que el Ayuntamiento de Durango decidió impulsar una actuación tecnológica de mejora de la calidad del aire. En este punto y con el asesoramiento de Azterlan, la aplicación de un asfalto ecológico, con capacidad para descontaminar la atmósfera de los óxidos de nitrógeno, se identificó como la mejor opción debido a las condiciones que presentaba el viejo pavimento.

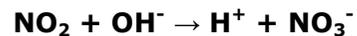
Asfalto Noxer

El Noxer es un producto bituminoso con óxido de titanio (TiO_2), agente fotocatalítico que favorece la transformación de los óxidos gaseosos de nitrógeno en nitratos, de forma que minimiza la permanencia de estos contaminantes en la atmósfera. Estudios previos de viabilidad determinan su mayor eficacia en función de la proximidad a la fuente emisora, por lo que suele aplicarse en el asfalto de carreteras con el objetivo de estabilizar las emisiones de los tubos de escape. Los nitratos depositados en la carretera son lavados bien por la lluvia o pueden ser eliminados mediante el baldeo de agua.

Fotólisis del agua: $\text{H}_2\text{O} + \text{luz} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$

En la atmósfera la presencia de agua y luz hacen que: $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}^+ + \text{O}_2^- + \text{OH}^-$

Y el TiO_2 facilita las siguientes reacciones, obteniéndose como producto final los nitratos:



En las experiencias previas al de Durango donde se ha desarrollado esta actuación (Londres, Paris y Madrid, entre otros), los controles realizados a pie de calle se han limitado a mediciones una vez aplicado el asfalto ecológico, lo cual no ha permitido realizar ningún tipo de análisis comparativo para determinar la validez de la actuación. Aunque los resultados obtenidos en laboratorio garantizan una descontaminación de los óxidos de nitrógeno de hasta el 90%, los factores ambientales como la meteorología o la situación

urbanística en cada caso condicionan su eficacia, por lo que resulta indispensable realizar controles de la calidad del aire para determinar su efecto de mejora real.



Figura 5. Aplicación del Noxer en Madrid, Paris y Dinan.

3. OBJETIVOS

Si bien el contenido técnico y alcance de la propuesta se circunscriben al municipio de Durango, lo cierto es que se trata de una iniciativa modelo, pendiente de una evaluación en profundidad y cuyos resultados pueden extrapolarse a cualquier localidad. Partiendo de que se trata de un proyecto técnico, se ha considerado necesario no dejar de lado los aspectos sociales y por ello, se impulsará la divulgación del estudio entre la ciudadanía.

El principal objetivo del proyecto es mejorar la calidad del aire urbano actuando sobre contaminantes emitidos por el tráfico, fuente de primer orden en el municipio y con amplio margen de mejora. A través del proyecto se quiere apoyar a la administración local en el desarrollo de actuaciones en materia de contaminación atmosférica y abrir así una nueva línea de actuación, la limpieza de contaminantes atmosféricos en origen.

Se trata de una iniciativa pionera y los controles realizados permiten profundizar en el conocimiento de una actuación novedosa, de forma que se evalúan la eficacia del asfalto Noxer y la mejora en los niveles de calidad del aire a través de los siguientes objetivos particulares:

- Definir el estado de partida en lo que a concentración de NO_x se refiere.
- Estudiar la reducción de las concentraciones de los NO_x .
- Evaluar la eficacia del Noxer en función de los niveles ambientales de NO_x .
- Controlar la reducción de los niveles de NO_x a diferentes alturas.
- Determinar la influencia de los aspectos meteorológicos.
- Correlacionar la efectividad del Noxer con el grado de radiación solar.
- Analizar los fenómenos de resuspensión de partículas.



Figura 6. Montebideo etorbidea.

4. METODOLOGÍA

En todo momento la operativa aplicada en las medidas en campo ha tenido en cuenta las particularidades del entorno. El alcance de las obras hace que el asfaltado de la calle se haya realizado por fases, de forma que la concreción en número de puntos de control e intensidad de campañas se definen en base a las características de las mismas.

4.1. Montebideo etorbidea

Con una longitud de 460m, Montebideo etorbidea soporta una importante actividad ciudadana y es una de las principales arterias del centro urbano del Durango. Entre otros, a lo largo de su trayecto se encuentran el conservatorio, una escuela y abundantes comercios, de forma que la calle se encuentra dividida por una carretera unidireccional con circulación en dirección hacia el Oeste.

Tal y como se observa en la Figura 7, la orientación que presenta la calle, de Oeste a Este, no es la mejor desde el punto de vista de entrada de radiación solar, situación que desfavorece el potencial de acción del Noxer, si bien se trata de una variable a considerar en el estudio junto con la variación en los niveles de contaminación.



Figura 7. Detalle de Montebideo etorbidea.

4.2. Campañas de control

En base a consideraciones puramente técnicas, en la puesta en marcha del estudio se ha considerado imprescindible tener en cuenta las condiciones en la configuración urbanística y la situación de la obra, ya que su ejecución se ha llevado a cabo por fases y la circulación del tráfico ha variado.

Se identifican 2 tipos de controles con metodologías diferenciadas para el alcance de los objetivos. Por un lado se han realizado mediciones en un mismo punto antes y después de la aplicación del Noxer. Con el objetivo de minimizar errores debido a factores ambientales como las precipitaciones y la dispersión vertical, el segundo tipo de controles ha consistido en muestrear NO_2 simultáneamente en 2 puntos de la calle, de forma que solamente una de las zonas tenía aplicado el producto.

Equipamiento

Se han puesto a disposición del estudio los equipamientos y las metodologías analíticas consideradas estado del arte, orientando las mediciones hacia los óxidos de nitrógeno, pero sin dejar de lado el principal contaminante de la zona, el material particulado. Los niveles de NO_x se controlan mediante 2 tipos de analizadores:

- **Captadores pasivos:** se trata de tubos llenos de un medio que hace la función de filtro quimioadsorbente. En este caso, se trata de un medio de trietanolamina (TEA), de manera que los NO_2 son estabilizados en forma de nitritos. Las muestras se analizan en el laboratorio realizando una extracción del nitrito en medio acuoso mediante agitación, para después ser analizadas por cromatografía iónica. La concentración obtenida corresponde a la media del tiempo de muestreo.
- **Airpointer:** equipo de medida en tiempo real que permite conocer las variaciones en los niveles de concentración de NO y NO_2 . A su vez, se obtienen los registros de monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2) y compuestos orgánicos volátiles (COV), indicadores de tráfico útiles en la interpretación de resultados.



Figura 8. Interior del Airpointer y captadores pasivos.

Con el objetivo de relacionar los niveles de polución y el tráfico, se ha utilizado un aforador de vehículos instalado junto al medidor de gases. Del mismo modo, la medición en continuo de los niveles de material particulado refuerza el estudio y permite valorar la influencia de esta fuente.

- **Metrocount:** conteo del tráfico en tiempo real de forma que es posible conocer la velocidad y el tipo de vehículo (coche, camión, motocicleta, etc.).
- **Grimm₃₆₅:** registro de los niveles de material particulado PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁ en tiempo real.

El conjunto de los equipos ha constituido la **unidad principal de control**, el cual se ha dispuesto en el interior de una jaula por temas de seguridad, mientras que el resto de puntos de control utilizados han sido equipados únicamente con captadores pasivos. Esta unidad principal de control se ha instalado al inicio de la zona de control, lugar estratégico para la cuantificación del tráfico.



Figura 9. Unidad principal de control.

Comparativa entre niveles de NO_x obtenidos antes y después del asfaltado

En la Figura 10 se presentan los puntos de control seleccionados, de forma que la unidad de control principal se ha instalado en el punto 1 y los datos aportados por el punto 2 han sido empleados para verificar resultados. Por su parte, los resultados aportados por el punto 3, instalado en la calle Pablo Pedro Astarloa, han sido utilizados para minimizar errores interpretativos a consecuencia de variables externas (lluvia, IMD, etc.).



Figura 10. Situación durante la campaña 1, previa a la actuación.

La comparativa de resultados obtenidos antes y después de la actuación permite alcanzar los objetivos de partida, si bien la situación durante los controles posteriores al asfaltado no han sido los esperados, ya que cambios de calendario en la ejecución de la obra no han permitido la misma configuración para la circulación del tráfico.

Cabe mencionar que este tipo de estudios resulta una nueva vía de trabajo a desarrollar. La falta de referencias sobre estudios orientados hacia la determinación de la eficacia del Noxer en ambiente, otorga al estudio un carácter innovador.

Comparativa de muestreos simultáneos

Control alternativo surgido a consecuencia de una parada prolongada en la ejecución de la obra. Durante este período la avenida ha presentado ambos extremos con asfalto Noxer, si bien la zona intermedia no se ha modificada. Esta situación ha permitido desarrollar una comparativa simultánea entre la zona intermedia y la parte baja, garantizándose la misma intensidad de tráfico al no existir posibilidades de entradas y salidas de vehículos. Del mismo modo, la simultaneidad de las medidas garantiza las mismas condiciones meteorológicas, por lo que disminuye la posibilidad de obtener resultados no válidos a consecuencia de variables externas.



Figura 11. Situación de los puntos de control.

El corto trazado de la zona limita el número de puntos de control a dos. El punto 1 se ha instalado en la zona sin Noxer y cuenta con la unidad de control principal, mientras que el punto 2 ha sido equipado con captadores pasivos en la zona tratada. Los principales inconvenientes identificados para la metodología planteada son la cercanía entre puntos y el menor confinamiento de la zona sin Noxer, si bien se trata de variables que no han sido contemplados en otros estudios y a los que se intentará dar una respuesta.

Tal y como se muestra en la figura 8, los puntos de control disponen de 2 captadores pasivos, a 40cm y a 2m del suelo. La dispersión vertical existente produce la variación en las concentraciones de contaminantes respecto a la altura, de forma que los resultados aportados por los captadores colocados a menor altura facilitarán la determinación de la eficacia del Noxer, mientras que las segundas servirán para cuantificar la mejora en los niveles de calidad del aire, para lo cual se disponen a la altura a la que respiramos.

Planificación

Como planteamiento inicial se determinaron 4 campañas de control para la comparativa de resultados obtenidos antes y después de la actuación. Considerando un período mínimo de muestreo de 2 semanas para los captadores pasivos, la campaña previa al asfaltado se ha realizado durante las semanas 47 y 48 de 2010, mientras que las campañas posteriores se han llevado a cabo en el período comprendido entre las semanas del 12 al 19, las semanas del 24 al 25 y las semanas 50, 51, 52 de 2011 y semana 1 de 2012. Al igual que en la campaña previa, durante las campañas posteriores a la actuación también se han obtenido muestras mediante captadores pasivos, de forma que los períodos de muestreo han sido quincenales (3 puntos x 2muestras = 6 muestras).

La campaña alternativa de control simultáneo se ha realizado durante 1 mes, obteniéndose 4 muestras de NO₂ por punto de control (2 puntos x 2 muestras =4 muestras) en el período comprendido entre las semanas 8 y 11 de 2011.



Figura 12. Desmontaje de la unidad principal.

5. DIAGRAMA DE GANTT REAL

Tras los ajustes temporales que se han realizado a lo largo del estudio, se detallan las tareas y se presentan los tiempos reales empleados en cada una de ellas.

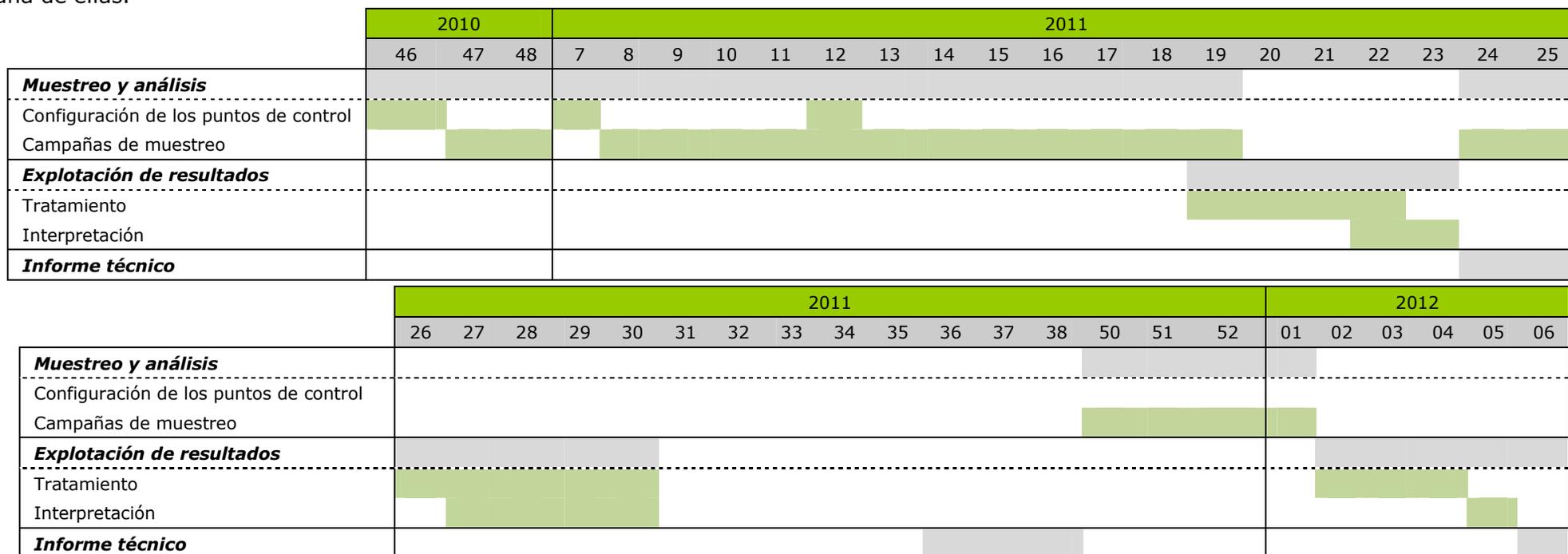


Tabla I. Alcance de las tareas realizadas.

La Tabla II recoge el conjunto global de muestreos y medidas realizadas y validadas. Los resultados detallados se presentan en los Anexos y en el siguiente punto se presenta una discusión de los mismos.

TAREAS ESPECÍFICAS	ALCANCE
Logística y preparación de los puntos de control	5 puntos de control
Medida en tiempo real de intensidades de tráfico	19 semanas de control por estación
Medida en tiempo real de PM ₁₀ , PM _{2,5} y PM ₁	19 semanas de control por estación
Medida en tiempo real de NO y NO ₂	19 semanas de control por estación
Muestreo de NO ₂ mediante captadores pasivos	36 muestras

Tabla II. Tareas realizadas durante las campañas de control.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados aportados por los controles realizados permiten presentar la siguiente discusión sobre el análisis comparativo de los mismos. Es necesario destacar la cantidad y variedad de datos tratados, por ello la totalidad de los mismos se presenta en los Anexos adjuntos al informe. Siguiendo la estructura descrita en el apartado METODOLOGÍA, la discusión de resultados se presenta en dos partes:

6.1. Comparativa entre niveles de antes y después del asfaltado

A partir de los registros obtenidos por la unidad principal de control instalada en el punto 1 de Montebideo etorbidea, se realiza la interpretación de los resultados más relevantes y la comparativa con los registros de los otros puntos de control.

Medidas en tiempo real

La variación de factores externos como precipitación, nivel de radiación y densidad de tráfico dificultan la interpretación y cuantificación del potencial de descontaminación real del Noxer. Con el fin de alcanzar los objetivos de partida, se ha decidido simplificar la variabilidad de los resultados, de forma que para la discusión se han utilizado resultados obtenidos bajo condiciones sin precipitaciones, si bien se han tomado en consideración aquellos días con registros inferiores a 5 l/m² debido a la escasez de días sin lluvia durante la campaña 1.

La tabla III recoge los registros diarios de los principales factores influyentes en los niveles de contaminación y los indicadores gaseosos de tráfico motivo de estudio para el mismo período de control. No se presentan resultados del material particulado, ya que tal y como se muestra en el anexo V, las variaciones registradas dependen de factores externos a los mencionados, posiblemente otras fuentes de emisión relacionadas con la industria o las múltiples obras que hay en la zona.

Los cambios en la planificación para la ejecución de la obra no han permitido realizar un mayor período de control previo a la actuación, si bien la variedad de registros permite alcanzar los objetivos de partida. Los resultados de la tabla III corresponden a medias diarias, a excepción de la lluvia que se presenta como acumulada, la intensidad media diaria del tráfico (IMD) no detalla el tipo de vehículo y los días festivos se presentan en rojo.

	Fecha	Lluvia l/m ²	Radiación W/m ²	IMD	NO µg/m ³	NO ₂ µg/m ³
Antes de la actuación	23/11/2010	3,4	37	4819	78	37
	24/11/2010	1,3	58	4846	70	36
	26/11/2010	3,2	58	5035	72	38
	27/11/2010	2,5	49	4589	33	38
	28/11/2010	1,0	88	2883	31	34
	29/11/2010	0,0	87	5439	66	51
	30/11/2010	0,0	42	4991	53	45
	02/12/2010	1,3	50	5255	67	56
	Promedio	1,6	59	4732	59	42
	Después de la actuación (Campaña 2)	25/03/2011	0,0	193	5676	24
26/03/2011		0,0	161	5274	25	40
01/04/2011		0,0	312	5749	43	44
02/04/2011		0,0	182	4955	17	33
03/04/2011		4,8	42	3179	11	26
04/04/2011		0,0	128	n.d.	23	31
25/04/2011		4,3	58	2743	7	17
26/04/2011		0,0	80	4882	16	35
28/04/2011		0,0	215	4851	17	37
02/05/2011		2,4	278	5577	33	36
03/05/2011		4,3	63	5556	31	52
04/05/2011		0,0	257	5614	23	32
05/05/2011		0,5	253	5535	26	44
06/05/2011		0,1	149	5939	7	20
07/05/2011		1,4	128	5238	8	17
08/05/2011		0,0	294	3496	10	17
09/05/2011		0,0	310	5781	20	30
10/05/2011		0,0	311	5535	24	32
11/05/2011		0,1	259	5483	25	35
12/05/2011		0,0	91	5386	22	39
13/05/2011	0,6	280	6069	21	34	
14/05/2011	2,7	76	5234	17	28	
15/05/2011	0,5	138	3236	12	21	
Promedio	0,9	185	5045	20	32	

Tabla III-a. Detalle de resultados utilizados en la discusión.

A continuación se presenta la interpretación realizada sobre los datos de la tabla III para el alcance de los objetivos de partida. En primer lugar se ha tomado como referencia la reducción media registrada durante los días sin lluvia y por campaña, para continuar con el estudio de situaciones particulares. En este último caso se han considerado los días específicos que cumplen con las condiciones idóneas tanto de meteorología como de tráfico, de forma que las reducciones de contaminación para dichas condiciones se puedan extrapolar a situaciones de carácter general.

	Fecha	Lluvia l/m ²	Radiación W/m ²	IMD	NO μg/m ³	NO ₂ μg/m ³
Después de la actuación (Campaña 3)	14/06/2011	0,0	340	5445	22	25
	15/06/2011	0,0	179	5385	20	26
	16/06/2011	1,0	113	5930	23	33
	17/06/2011	0,0	245	5878	22	26
	18/06/2011	0,1	238	4611	11	15
	19/06/2011	0,0	357	3462	7	13
	20/06/2011	0,0	348	5408	23	29
	21/06/2011	0,2	285	5278	89	20
	22/06/2011	0,5	60	5492	20	29
	23/06/2011	0,0	152	5346	20	24
	24/06/2011	0,0	345	5533	17	17
	25/06/2011	0,0	356	4161	8	16
	26/06/2011	0,0	334	3389	9	25
	27/06/2011	1,3	277	5187	11	32
	Promedio	0,2	259	5036	16	24

Tabla III-b. Detalle de resultados utilizados en la discusión.

	Fecha	Lluvia l/m ²	Radiación W/m ²	IMD	NO μg/m ³	NO ₂ μg/m ³
Después de la actuación (Campaña 4)	13/12/2011	0,0	44	5648	23	15
	14/12/2011	1,2	42	5723	24	12
	15/12/2011	0,3	71	5797	21	13
	19/12/2011	2,1	35	8871	30	7
	20/12/2011	1,2	22	9511	28	9
	21/12/2011	0,8	18	7703	26	12
	22/12/2011	0,0	25	6490	33	11
	23/12/2011	0,1	68	8188	25	9
	24/12/2011	0,4	51	6459	23	8
	25/12/2011	0,0	93	3274	11	4
	26/12/2011	0,0	93	5629	18	4
	27/12/2011	0,0	94	5481	23	6
	28/12/2011	2,3	55	5994	30	6
	30/12/2011	0,2	31	4784	26	8
	31/12/2011	0,0	35	3458	21	10
	01/01/2012	0,0	76	2128	10	11
	02/01/2012	6,9	58	3198	26	10
	03/01/2012	0,0	96	3475	22	8
	04/01/2012	1,2	28	3346	29	10
	05/01/2012	1,4	71	3281	21	9
	06/01/2012	0,4	24	1559	15	11
	07/01/2012	0,0	47	1957	21	11
	08/01/2012	0,0	38	1220	17	11
	09/01/2012	0,0	29	2142	18	9
Promedio	0,9	52	4805	22	9	

Para el cálculo del porcentaje de descontaminación de los NO_x se toman como referencia los resultados obtenidos en la campaña previa a la actuación y se aplica la siguiente fórmula 1:

$$\frac{[Pre]-[Post]}{[Pre]} \times 100$$

Fórmula I. Porcentaje descontaminado.

Reducciones en los niveles de contaminación para la campaña 2 (Semanas 12-19 de 2011)

Los valores medios para este periodo de control presentan una descontaminación del 66% para el NO y del 23% para el NO₂. La intensidad de tráfico presenta una ligera diferencia entre los registros "antes" (4732) y "después" (5045) de la actuación, y la radiación media diaria para el segundo período es de 185 W/m².

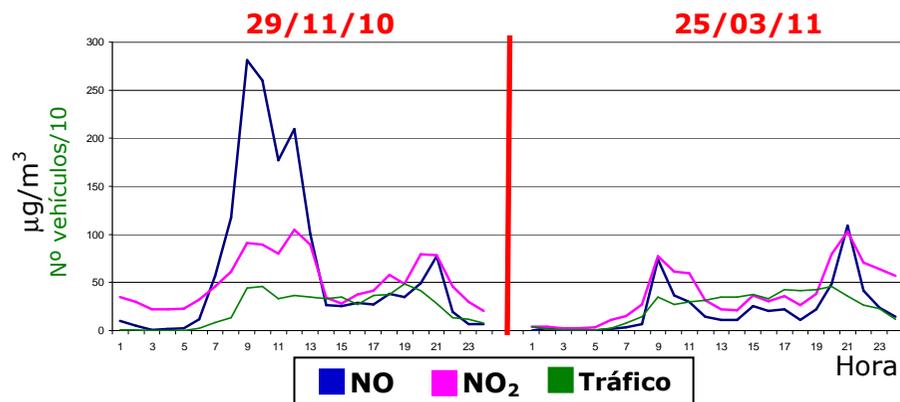


Figura 13. Variación de los niveles de NO_x antes y después de la actuación.

Asimismo, se han estudiado las variaciones observadas bajo diferentes condiciones de radiación y tráfico siguiendo la metodología comparativa descrita. La tabla IV presenta los porcentajes de descontaminación de casos particulares seleccionados entre los días de la tabla III-a y la totalidad de los casos estudiados se recoge en el anexo III.

Tal y como era de esperar, la tasa de descontaminación de los óxidos de nitrógeno aumenta con la mayor radiación, de forma que se observa un incremento en la descontaminación del NO₂ a medida que aumentan los índices de radiación.

Por otro lado, se tienen en cuenta los días festivos, períodos con descensos significativos en las intensidades de tráfico. En estos casos, el aumento en la descontaminación no se puede atribuir al efecto del Noxer, sino a una mayor dispersión. La metodología de trabajo no permite cuantificar el efecto de la dispersión, si bien es conocido su incremento debido a un aumento de la temperatura o velocidad del viento. La causa por la que se observa una mayor descontaminación durante los fines de semana es la mayor dispersión de los contaminantes debido a una menor concentración de gases en la atmósfera.

A modo de ejemplo, la figura 13 presenta las variaciones en las intensidades del tráfico y en los niveles de NO_x de un día anterior y otro posterior a la actuación, de forma que los días seleccionados se consideran comparables por las similares condiciones ambientales y de tráfico.

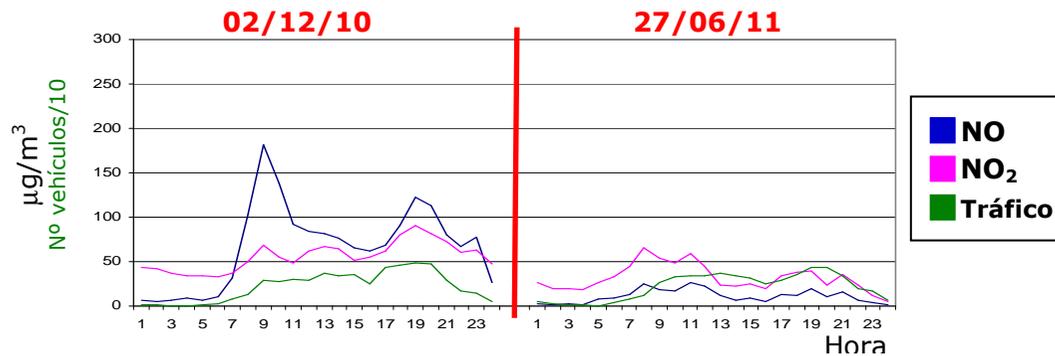
Entre las diferencias observadas una vez aplicado el Noxer, destaca la disminución en los niveles de NO bajo situaciones críticas. El porcentaje de descontaminación para este caso concreto es del 64% para el NO y del 28% para el NO₂, resultado que se asemeja a la reducción media.

	Promedio 185 W/m ²	Nublado <100 W/m ²	Nubes y claros 100-250 W/m ²	Despejado >250 W/m ²	Festivo IMD=2800
Antes	-	30/11/10	29/11/10	29/11/10	28/11/10
Después	-	26/04/11	11/05/11	10/05/11	25/04/11
NO	66%	70%	62%	64%	77%
NO₂	23%	22%	32%	37%	50%
NO_x	44%	46%	47%	51%	64%

Tabla IV. Porcentajes de descontaminación

Reducciones en los niveles de contaminación para la campaña 3 (Semanas 24 y 25 de 2011)

Los valores medios para este periodo de control presentan una descontaminación del 72% para el NO y del 44% para el NO₂. La intensidad de tráfico presenta una ligera diferencia entre los registros "antes" (4732) y "después" (5036) de la actuación, y la radiación media diaria para el segundo período es de 259 W/m². Al igual que en la campaña anterior y a modo de ejemplo, el caso particular presentado en la figura 14 permite observar el cambio de comportamiento de los NO_x una vez aplicado el Noxer.



El porcentaje de descontaminación para este caso concreto es del 83% para el NO y del 43% para el NO₂. En general, los niveles de descontaminación son mayores que en la campaña 2, resultado esperado al tratarse del periodo de control con los mayores índices de radiación, lo cual demuestra la influencia positiva de este factor sobre la purificación del aire urbano.

Figura 14. Variación de los niveles de NO_x antes y después de la actuación.

En la tabla V se presentan ejemplos de los porcentajes de descontaminación observados bajo diferentes condiciones de radiación siguiendo la metodología comparativa descrita con anterioridad. Tal y como era de esperar, la radiación resulta un factor determinante para la eficacia del Noxer, si bien las variaciones encontradas respecto a la campaña 2, bajo la misma situación de radiación, ponen de manifiesto la influencia de otros factores ambientales.

	Promedio 259 W/m ²	Nublado <100 W/m ²	Nubes y claros 100-250 W/m ²	Despejado >250 W/m ²
Antes	-	-	29/11/10	29/11/10
Después	-	-	15/06/11	14/06/11
NO	72%	-	70%	67%
NO₂	44%	-	50%	51%
NO_x	58%	-	60%	59%

Tabla V. Porcentajes de descontaminación.

La metodología aplicada no permite estudiar factores como la dispersión, el nivel de iones en la atmósfera, el transporte de NO₂ desde otras zonas cercanas, etc., cuya influencia se minimiza durante la última campaña de control al realizarse bajo las mismas condiciones meteorológicas que en la campaña previa a la aplicación del Noxer.

Reducciones en los niveles de contaminación para la campaña 4 (Semanas 50, 51, 52 de 2011 y 1 de 2012)

Los valores medios para este periodo de control presentan una descontaminación del 50% para el NO y del 46% para el NO₂. La intensidad de tráfico es similar "antes" (4732) y "después" (4804) de la actuación, y la radiación media diaria para el segundo período es de 52 W/m². Una vez más, los casos particulares presentados en la figura 15 permiten observar el cambio de comportamiento de los NO_x una vez aplicado el Noxer.

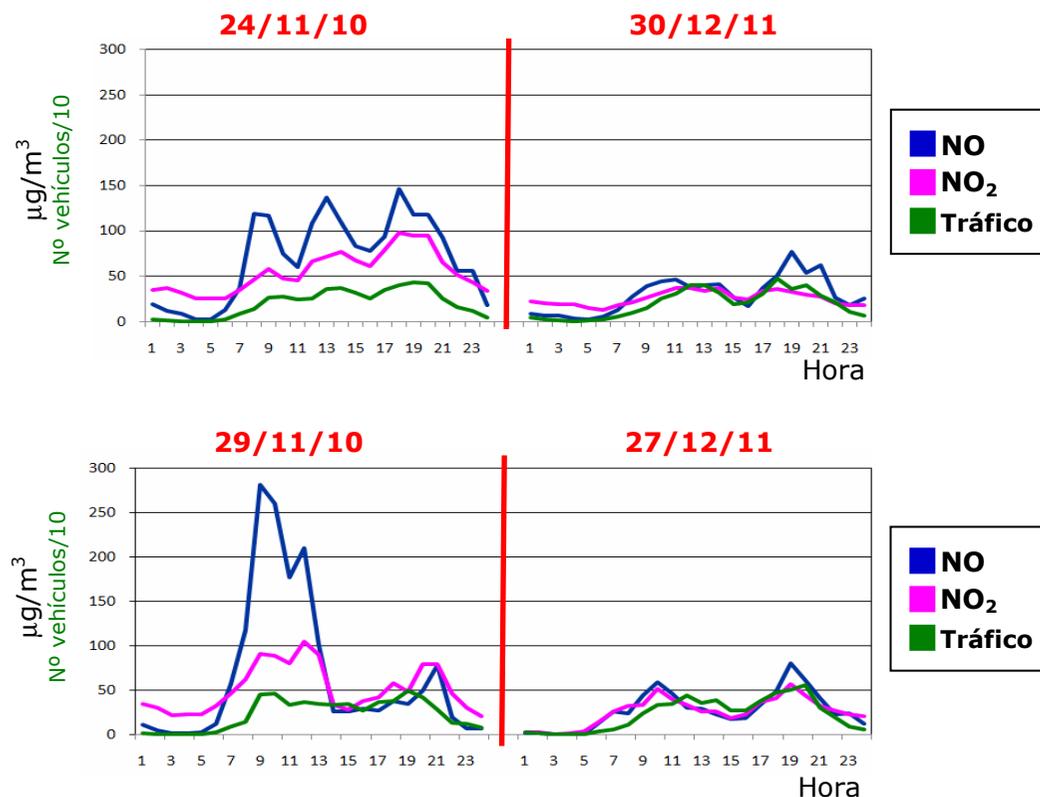


Figura 15. Variación de los niveles de NO_x antes y después de la actuación.

En relación a los niveles de descontaminación del NO₂, se han interpretado los registros obtenidos en la estación de San Roque, la cual está integrada en la Red de Control de la Calidad del Aire de Euskadi y es referencia para la comarca de Durangaldea. Al contrario de lo que sucede con el NO, debido a su alta capacidad inestabilidad, el NO₂ puede ser transportado por las masas de aire e influir en zonas alejadas del punto de emisión. Considerando los mismos periodos de control, la estación de San Roque presenta una disminución del 50 % en los niveles de NO₂, por tanto, es posible que parte de las reducciones obtenidas en Montebideo se deban a una disminución generalizada de la actividad y movilidad vehicular en la Comarca.

En el primer caso presentado a modo de ejemplo, los porcentajes de descontaminación son del 57% para el NO y del 28% para el NO₂. Valores alineados con los resultados obtenidos en campañas anteriores, teniendo en cuenta que se trata con el periodo del año con menores índices de radiación. No obstante, varios de los casos estudiados presentan unos niveles de descontaminación mayores a los esperados para el NO₂ y aunque no haya pruebas concluyentes, parece tener su origen en algún factor ambiental externo.

Los porcentajes de descontaminación para el segundo caso presentado son del 42% para el NO y del 54% para el NO₂. Con una IMD de 4780 vehículos ambos días y una radiación de 31 W/m², el 27 de diciembre de 2011, parece que los niveles de NO₂ durante este periodo son significativamente inferiores y no atribuibles al efecto del Noxer.

Durante esta campaña de invierno, se obtienen inferiores niveles de descontaminación debido a los menores índices de radiación y, por otro lado, se espera que las desviaciones en los resultados sean mínimos, ya que los niveles de referencia, previos a la aplicación del asfalto, se obtienen bajo estas mismas condiciones o, al menos, muy similares. Dada la metodología de estudio, los resultados obtenidos durante esta campaña adquieren un valor añadido y permiten realizar una valoración positiva de la actuación de mejora llevada a cabo.

Muestreo del NO₂

El detalle de los resultados brutos y las diferencias de concentración en altura se presentan en el anexo IV. Asimismo, se recogen las reducciones de contaminación obtenidas, si bien los resultados no son comparables por los cambios producidos en la disposición de la calle para el tráfico. Este hecho ha alterado los resultados en el punto 3, el cual debía ser la referencia para minimizar los errores de cálculo causados por diferencias en las condiciones ambientales, por lo que será necesario esperar a los resultados aportados por los controles que se realizarán bajo las condiciones de partida.

Con los datos válidos obtenidos hasta la fecha, únicamente cabe citar la diferencia encontrada en la concentración de NO₂ a 40cm y a 2m de altura, resultando ser de un 11% mayor en la zona baja, factor que se mantiene invariable a lo largo del año. Este hecho pone de manifiesto la existencia de una dispersión vertical, el cual variará en función de la temperatura, siendo mayor en durante los meses de verano y mínima durante el invierno.

Esta dispersión hace que las reducciones calculadas en el punto anterior sean la suma de al menos 2 factores: por un lado el efecto del Noxer y la dispersión vertical, lo cual explica, en parte, las mayores reducciones obtenidas durante la campaña 3. A este respecto, la cuantificación de la dispersión vertical queda fuera de los límites del estudio.

Estudio de las variaciones en los niveles de NO_x

Con el objetivo de ampliar conocimientos y entender el comportamiento presentado por los óxidos de nitrógeno durante las campañas de control, se han estudiado las reacciones asociadas a su formación y transformación. Las reacciones producidas en la atmósfera se determinan por múltiples factores ambientales difíciles de contemplar en su totalidad, por lo que la siguiente interpretación se centra en la radiación (hv) y el ozono (O₃), principales agentes asociados a los NO_x junto con el nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂), agua (H₂O), iones derivados y la temperatura.

La figura 1 presenta las principales reacciones en las que participan los óxidos de nitrógeno de la atmósfera:

Reacciones favorecidas por el Noxer:	Reacciones fotolíticas:	Reacciones endotérmicas (calor →):	Reacción favorecida por el O₃:
$\text{NO} + \text{O}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2 + \text{h}\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}^{2-}$	$\text{N}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2 \text{NO}$	$\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$
$\text{NO}_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}^+$	$\text{NO}_2 + \text{O}_2 + \text{h}\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}_3$	$2 \text{NO} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2 \text{NO}_2$	
	$\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + \text{h}\nu \rightarrow \text{H}^+ + \text{O}_2^- + \text{OH}^-$		

Figura 16. Reacciones asociadas a los NO_x.

A continuación se describen las reacciones más importantes para entender las variaciones registradas antes y después de la aplicación del Noxer, así como en presencia o ausencia de radiación y ozono.

Comportamiento de los NO_x en presencia de radiación solar

En ausencia del Noxer la radiación solar favorece la dispersión vertical y las reacciones fotolíticas, situación bajo la cual disminuye la concentración de NO₂ pero aumentan las de NO y O₃ mediante la siguiente reacción; $\text{NO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}_3$. Por otro lado, cabe mencionar el equilibrio al que se llega en los niveles de NO y NO₂ durante períodos de relativa calma en cuanto a emisiones. Bajo esta situación de equilibrio, los niveles de NO₂ resultan ligeramente favorecidos por el dominio de la reacción $2 \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}_2$ frente a la reacción fotolítica.

Una vez aplicado el Noxer, además de los efectos anteriores, las dos reacciones catalizadas por el dióxido de titanio producen una disminución general de los NO_x y se identifica un cambio significativo en el comportamiento del NO. La transformación directa del NO en nitrato ($\text{NO} + \text{O}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$), contaminante primario de las emisiones de tráfico, evita que se produzcan picos durante las situaciones con alta intensidad de tráfico y de esta forma, se alcanza antes el equilibrio $\text{NO} \leftrightarrow \text{NO}_2$.

Comportamiento de los NO_x en ausencia de radiación solar

Bajo esta situación y durante los momentos de alta intensidad de tráfico, los niveles de NO_x pueden presentar 2 comportamientos condicionados por un tercer contaminante, el ozono (O₃):

- **En ausencia de ozono** se producen picos de NO, superando los niveles de NO₂ al tratarse del contaminante primario emitido por los vehículos. Posteriormente, el descenso del tráfico junto con la radiación provocan el que ambos compuestos alcancen el equilibrio en sus concentraciones.
- **En presencia de ozono** se produce la reacción $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$, de forma que los niveles de NO₂ presentan incrementos directamente proporcionales a la disminución de ozono. Esta transformación finaliza con el alcance del equilibrio mencionado.

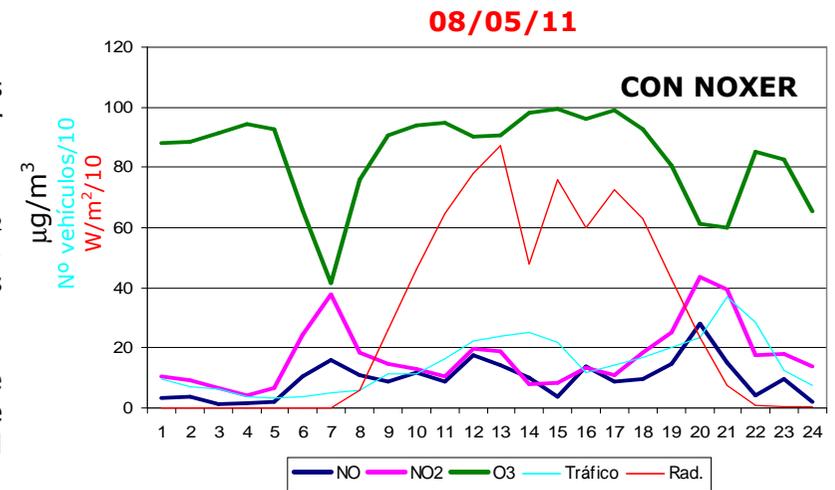


Figura 17. Ejemplo de las variaciones estudiadas.

6.2. Comparativa de muestreos simultáneos

A pesar de ser la metodología más apropiada para este tipo de estudios, los resultados brutos y niveles de descontaminación obtenidos en los 2 puntos de control no han sido los esperados, por lo que la totalidad de resultados obtenidos se recoge en el anexo IV. La interpretación realizada no aporta conclusiones significativas respecto al potencial de descontaminación del Noxer, ya que las condiciones en el confinamiento de la calle varían y no permiten que los registros sean comparables. Mientras que la zona con Noxer cuenta con edificios a ambos lados de la calle, la zona sin Noxer presenta un solar en la parte norte, lo cual permite la entrada de corrientes de aire que favorecen la dispersión de los contaminantes.

7. CONCLUSIONES

Directamente relacionadas con los resultados y objetivos del estudio, las conclusiones alcanzadas parten de un período de control de 19 semanas. La metodología de trabajo utilizada no trata de ser asimilable a lo que se denomina normativamente "fondo urbano" ni pretenden determinar la exposición media de la población, sino conocer los efectos del Noxer sobre la calidad del aire de Montebideo etorbidea.

- Las concentraciones de NO_x obtenidas después de aplicar el asfalto Noxer en la avenida Montebideo presentan una descontaminación media del 50%, de forma que los resultados obtenidos a lo largo de un año justifican la actuación de mejora llevada a cabo.
- Desde el punto de vista normativo (RD 102/2011), el nivel medio del NO₂ durante el período de control previo a la actuación ha superado ligeramente el valor límite anual (40 µg/m³), situación que no se ha repetida una vez aplicado el Noxer. Asimismo, no se han registrado superaciones horarias a lo largo del estudio, si bien, las máximas horarias registradas después de aplicar el asfalto presentan valores significativamente inferiores, especialmente de NO.
- A lo largo del estudio y bajo las mismas condiciones ambientales, no se ha observado ningún caso donde las concentraciones de los NO_x hayan sido superiores durante el periodo previo a la actuación. No obstante, se observan diferentes comportamientos para el NO y el NO₂ en el potencial de descontaminación del Noxer, las cuales dependen de las características fisicoquímicas propias de cada contaminante, así como de las condiciones ambientales (radiación, temperatura, etc.). Uno de los principales beneficios del asfalto Noxer es la minimización de las situaciones críticas provocadas por el NO, contaminante primario emitido directamente desde los tubos de escape y principal causa de los actuales episodios de contaminación en zona urbana.
- Los niveles de descontaminación aumentan con la radiación, de manera que el Noxer presenta un mayor potencial de acción en verano, mientras que en invierno es mínimo. No obstante, los resultados obtenidos durante la campaña invernal demuestran un efecto igualmente positivo para la calidad del aire de la zona.
- La reducción de los óxidos de nitrógeno conlleva la reducción de la formación de ozono troposférico. El hecho de disminuir uno de los principales precursores de ozono, dificulta la existencia de episodios críticos de contaminación durante el verano.
- La diferencia encontrada en las concentraciones registradas a distintas alturas pone de manifiesto la existencia de una dispersión vertical de los contaminantes, lo cual explica, en parte, la mayor descontaminación durante los meses de verano.

8. DATOS DE CONTACTO

DURANGOKO UDALA

AITOR LARRUCEA – Técnico de AL21

Tfno: +34 94 603 00 11 Fax: +34 94 603 00 24

alarrucea@durango-udala.net

IK4 – AZTERLAN Research Alliance

Tfno.: +34 94 621 54 70 Fax +34 94 621 54 71

Julián Izaga – Director Técnico

jizaga@azterlan.es