



Centro Mario Molina • Chile

Análisis y Evaluación del Impacto de Transantiago en la Calidad del Aire de Santiago, Año 2009.

Resumen Ejecutivo

Centro Mario Molina Chile

04/05/2010

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	PRESENTACIÓN GENERAL.....	3
2	RESULTADOS GENERALES.....	6
2.1	MATERIAL PARTICULADO.....	6
2.2	ÓXIDOS DE NITRÓGENO	11
2.3	TERMINAL DE BUSES TRANSANTIAGO	13
3	CUADRO RESUMEN	16
4	CONCLUSIONES	19
5	RECOMENDACIONES.....	22
5.1	RED DE MONITOREO DE PARA EL SEGUIMIENTO AMBIENTAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO	24
5.2	INVENTARIO DE EMISIONES DE TRANSANTIAGO	27

1 Presentación general

El estudio se basa en campañas de monitoreo de contaminantes efectuadas entre Julio y Septiembre de 2009, con el objetivo principal de caracterizar el impacto en la calidad del aire de la ciudad de Santiago, asociados a la implementación de Transantiago. Para esto se dispone, además, de la información recabada de un estudio que caracteriza la línea base (invierno 2006), y otro ejecutado durante la primera etapa de implementación (invierno del 2007).

Como elemento adicional, el presente estudio contempló por primera vez la evaluación del impacto de terminales de buses de Transantiago, avanzando así hacia una visión integral de la relación entre el sistema de transporte público y la calidad del aire de la ciudad de Santiago.

Durante el 2009 se empleó la estructura metodológica validada en la versión anterior del estudio, y se incorporó una nueva metodología específica para el caso de los terminales. Es necesario recordar que la red oficial de monitoreo de calidad del aire (Red MACAM) no cuenta con estaciones ni instrumentos apropiados para caracterizar los impactos del transporte. Para comprender este punto es importante tener en consideración en que el material particulado proviene de muchas fuentes distintas, y que gran parte de él se forma a partir de procesos fisicoquímicos en la atmósfera. Por lo tanto, para identificar el impacto de una intervención urbana como lo ha sido Transantiago es necesario medir muy cerca de las fuentes móviles, donde se encuentran las emisiones “frescas”, previo al inicio de los procesos de transformación. En este sentido, reviste especial interés la caracterización del número y el tamaño de las partículas.

La metodología empleada se desarrolló por profesionales del Centro Mario Molina Chile, en conjunto con expertos internacionales de Dinamarca y Suecia, miembros del equipo de trabajo del estudio. Esta considera en primer lugar la descripción de la operación y tecnología del transporte a partir de conteos de flujos vehiculares¹. El impacto del transporte en la calidad del aire es caracterizado mediante monitoreo continuo², discontinuo³ y pasivo⁴ a nivel de calle y en altura. Se seleccionaron dos sitios para monitoreo a nivel de calle, uno que representa la operación de un servicio troncal con una renovación tecnológica importante respecto del escenario 2006 (Alameda), y otro que presente una condición mixta, combinando servicios alimentadores y troncales (Gran Avenida), con buses de mayor antigüedad. Esta información se complementa con una

¹ Se realiza un registro audiovisual del flujo vehicular en diferentes arterias de Santiago (puntos control), para posteriormente aplicar un conteo y categorización del transporte observado.

² Determinación de concentraciones hora por hora.

³ Muestreo en filtros de Material particulado, de concentración de 24 hrs.

⁴ Muestreo en base a la utilización de tubos pasivos.

modelación de contaminantes a escala metropolitana y de impactos del transporte en la calidad del aire a nivel de calle. Para el caso de terminales también se empleó monitoreo específico continuo y pasivo en sitios ubicados en su entorno, complementándose con el desarrollo de una base de datos de emisiones de un terminal⁵, lo que permitió modelar su impacto en calidad del aire.

Tomando en consideración el rol que asume Transantiago en la contaminación atmosférica en la Región Metropolitana, es posible definir los siguientes escenarios:

- a. **Escenario 2006 (Escenario base):** Un primer estudio caracterizó los impactos durante el año 2006⁶, el que puede ser definido como un escenario diagnóstico de la puesta en marcha.
- b. **Escenario 2007 (Período de Transición):** Durante el año 2007 se realizó un segundo estudio de similares características⁷, el que puede ser considerado como un **período de transición** de la implementación del nuevo sistema de transporte público, en donde se presentaron dificultades operacionales (aglomeración significativa de usuarios en algunos puntos críticos y ausencia de buses en sectores periféricos de la capital principalmente). Este período estuvo caracterizado por la ampliación e introducción gradual de recorridos, incorporación paulatina de más buses en circulación, y el reemplazo de vehículos antiguos. También se invirtió en la construcción de nuevas infraestructuras viales.
- c. **Escenario 2009 (consolidación preliminar):** corresponde más bien a una **etapa de consolidación preliminar** después de constantes ajustes. Se pretende hablar de una etapa preliminar en lugar de una definitiva, puesto que aún hay cambios que se supone afectan a la calidad del aire de la Región Metropolitana, como la ya mencionada renovación del troncal 3, y renovación de flota de alimentadores durante el 2010. Se estima que la futura implementación de otro tipo medidas también debieran repercutir en la calidad del aire, entre las que se puede mencionar próximas modificaciones de recorridos y/o frecuencias, construcción de mejor infraestructura vial y separación de corredores exclusivos para buses de Transantiago. Estas son las principales razones por la cual se ha decidido no referirse a un sistema consolidado en su totalidad.

⁵ Se modeló el terminal Puente Alto. Las emisiones fueron estimadas a partir de información de actividad proveniente de los planes operacionales de los servicios asociados al funcionamiento del terminal (<http://www.transantiago.cl/web2005/operaciones.htm>), información de la composición de la flota y factores de emisión.

⁶ "Análisis y Evaluación del Impacto de Transantiago en la calidad del Aire de la Región Metropolitana, Año 2005-2007". Estudio realizado por CMM Chile para la Subsecretaría de transportes del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. 2007

⁷ "Análisis y Evaluación del Impacto de Transantiago en la calidad del Aire de la Región Metropolitana, Año 2007". Estudio realizado por CMM Chile para la Subsecretaría de Transporte del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. 2008.

Objetivo principal

El objetivo general es contar con un estudio que analice y evalúe el impacto del nuevo Sistema de Transporte en la Calidad del Aire de Santiago, actualizado al año 2009⁸.

Objetivos específicos

- Caracterizar los impactos a nivel de calle en zonas con alto tráfico de buses.
- Caracterizar los impactos a nivel de background urbano.
- Estudiar las diferencias de los impactos en la calidad del aire observadas en Julio de 2007 en el escenario definido por el Estudio "Evaluación del Impacto de Transantiago en la calidad de Aire de la Región Metropolitana, año 2007"; y los resultados encontrados en el desarrollo del presente estudio describiendo las causas que han provocado o influido en tales resultados.
- Describir los impactos en la calidad del aire al interior y/o exterior de áreas caracterizadas como Terminales, infraestructuras destinadas al intercambio modal y/o Depósitos de Buses.
- Identificar los elementos que provocan los posibles impactos y las medidas de solución en las infraestructuras y áreas definidas en el objetivo anterior.

⁸ Si bien el objetivo es claro, conviene tener presente que Transantiago, de acuerdo a los planes de operación (PO), a contar de octubre de 2008 muestra un nivel de estabilización significativo, indicando un estado de consolidación. Sin embargo, aún hay cambios que probablemente pueden influir en la calidad del aire, como la anteriormente nombrada renovación del Troncal 3. Es por esto que el escenario 2009 se clasifica como un período de tiempo correspondiente a una consolidación preliminar, y no una consolidación definitiva.

2 Resultados generales

2.1 Material Particulado

A escala metropolitana se encuentra que la distribución de concentración durante el año 2009 es muy semejante al año 2007, esto es con mayores concentraciones en el centro de Santiago y algunas áreas del sector poniente de la capital. Asimismo, se observa que el área con mayores niveles de concentración durante el 2009 es levemente menor que el 2007, pero sigue siendo más alta que el 2006 (en Parque O'Higgins incluso alcanza incluso un 45%). Esto es consecuencia principalmente por el comportamiento meteorológico, e indica que las mediciones de la Red MACAM no pueden explicar el impacto en la calidad del aire ejercidos por cambios en el transporte público. Esto se debe a que sus estaciones reciben el impacto sinérgico de todas las fuentes emisoras de la capital, y además poseen una carga importante de componentes secundarios.

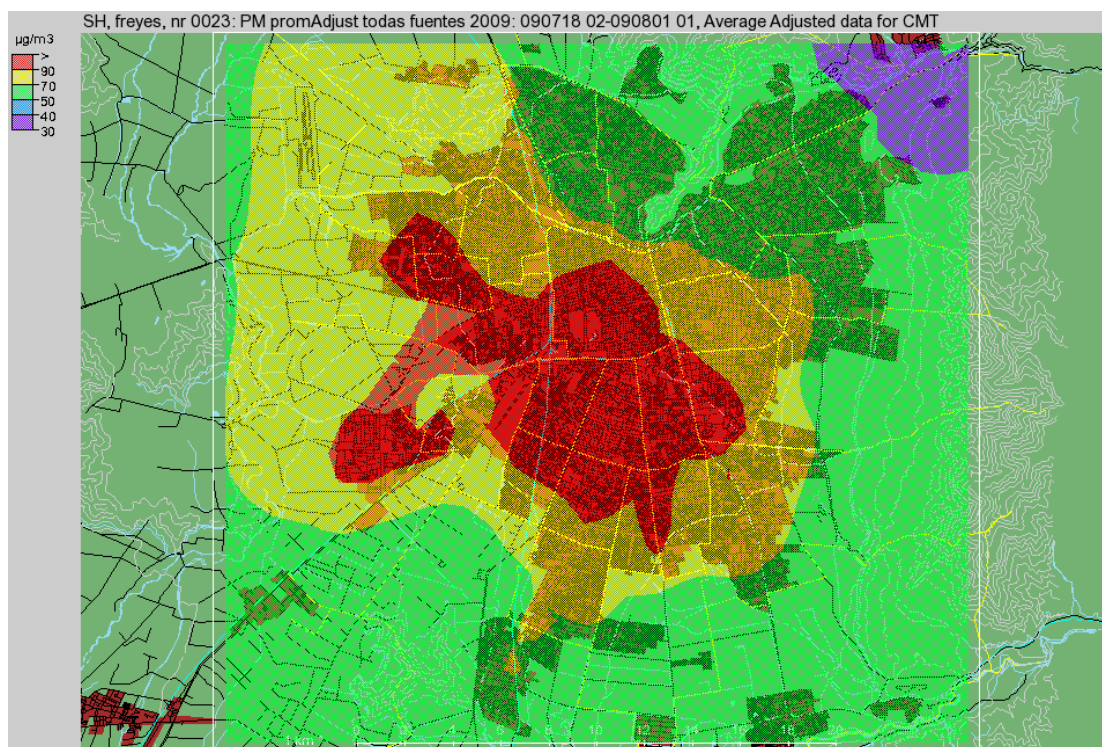


Figura 2.1: Modelación de MP₁₀ promedio 2009. Se realizó una modelación considerando todas las fuentes+20 µg/m³ background, ajustado a datos de calidad del aire de MP₁₀ de 10 estaciones de la Red MACAM.

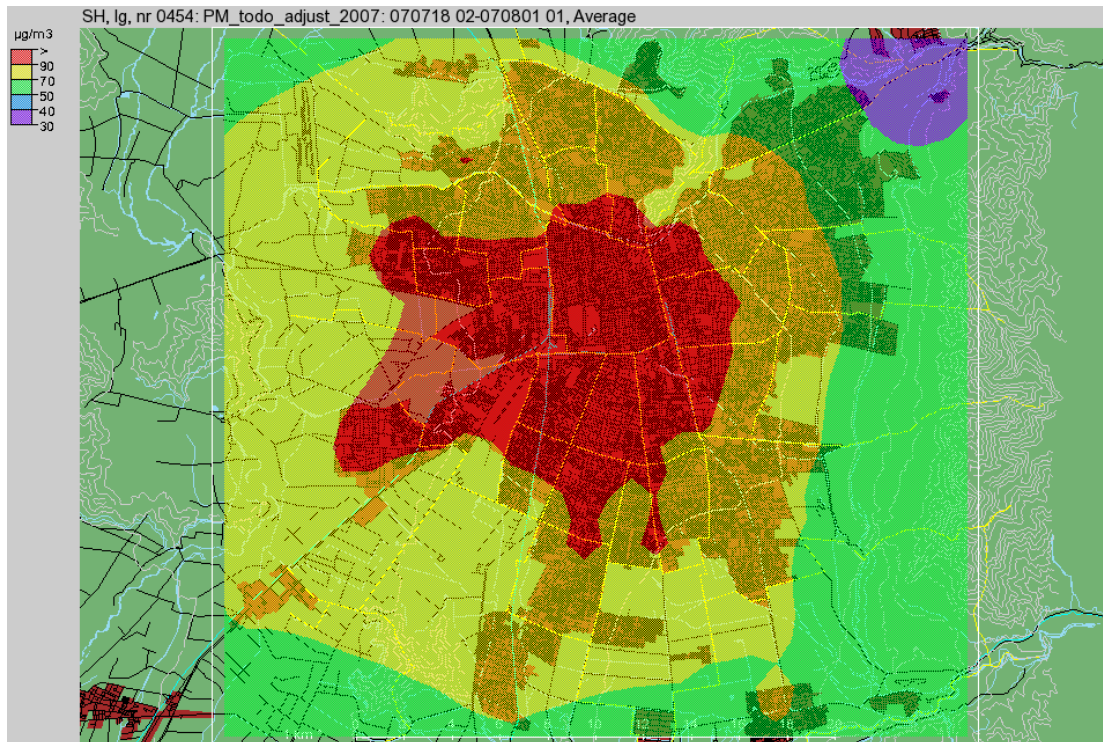


Figura 2.2: Niveles promedio de MP_{10} . Modelación realizada para el año 2007.

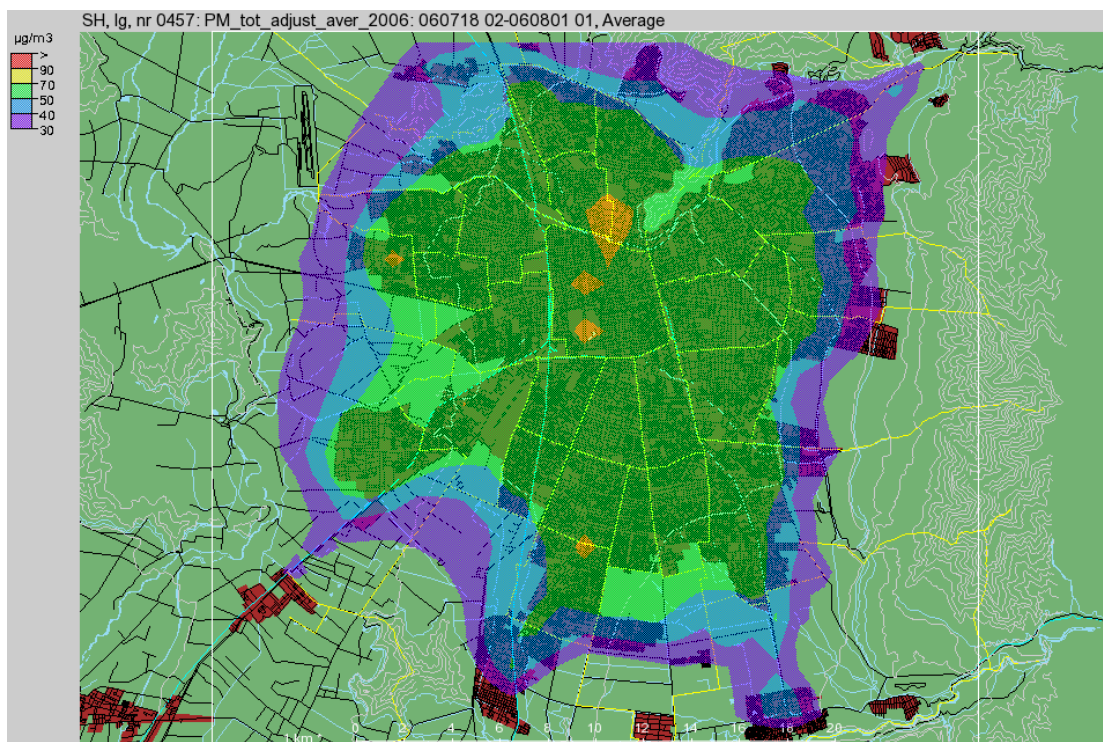


Figura 2.3: Niveles promedio de MP_{10} . Modelación realizada para el año 2006.

En el sitio que representa una vía con renovación tecnológica (Alameda) se observa una reducción importante (un 25% al 2006 y un 11% al 2009) de las partículas ultrafinas, asociadas a emisiones “frescas” de motores vehiculares, como partículas en proceso de condensación y coagulación (Figura 2.4), fruto de la implementación de Transantiago. Este resultado logró en mayor parte en el primer año de implementación mediante el ajuste de las frecuencias y reducción del número de buses. Las reducciones posteriores están más asociadas a la sustitución de buses EURO I y II por buses EURO III nuevos (Figura 2.5).

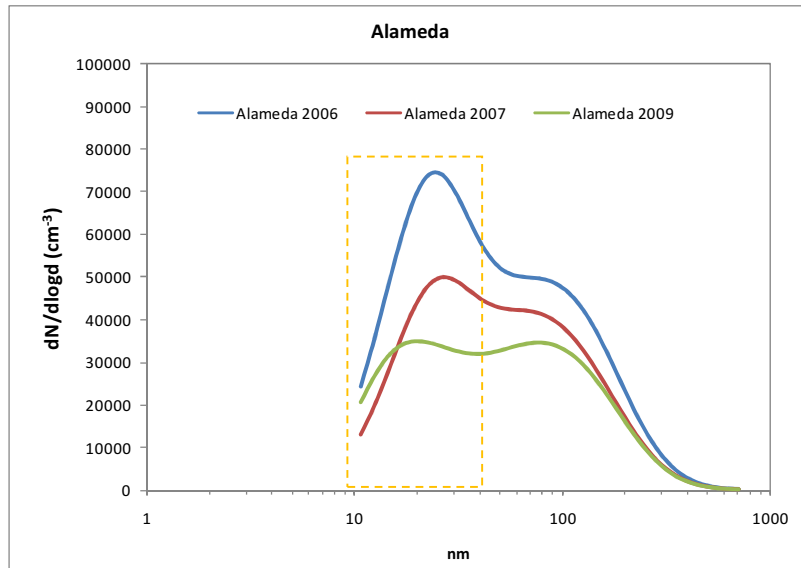


Figura 2.4: Distribución promedio del tamaño de partículas en Alameda para los tres años de medición. La sección demarcada de color naranja indica la evolución de las partículas asociadas a emisiones de tubos de escape.

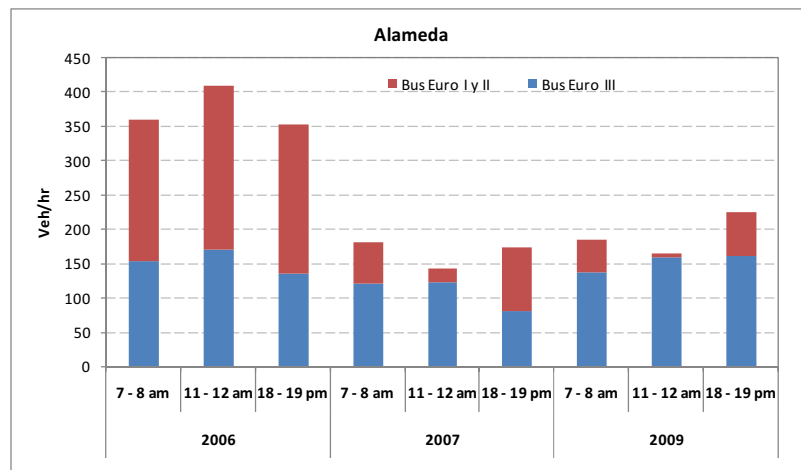


Figura 2.5: Comparación de los flujos promedio de vehículos observados en Alameda para los tres escenarios de evaluación.

La situación del sitio de monitoreo que representa una vía con menor renovación tecnológica (La Cisterna) es diferente a Alameda. Se observa una reducción menor de los flujos de buses (25% en hora punta al comparar 2006 contra 2009) junto a un deterioro de la flota, al aumentar la participación de buses más antiguos EURO I y II (de un 37% en hora punta mañana durante el 2006 a un 63% durante 2009). Adicionalmente se registró un aumento importante en los camiones (49% del 2006 al 2009).

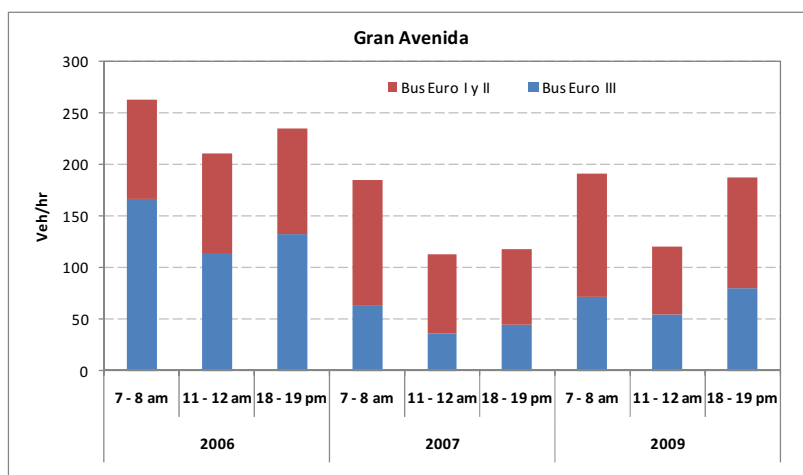


Figura 2.6: Comparación de los flujos promedio de vehículos en La Cisterna para los tres escenarios.

Coincidente con lo anterior, las partículas ultrafinas medidas en Gran Avenida muestran una distribución muy semejante durante el 2006 y 2009 (Figura 2.7). Adicionalmente, el carbono elemental⁹ disminuyó al año 2007 y aumentó considerablemente durante el año 2009 (Figura 2.8).

⁹ Carbono elemental u hollín es un componente del material particulado, el cual cuando es medido cerca de tráfico vehicular puede reflejar de buena manera las emisiones asociadas al funcionamiento de motores.

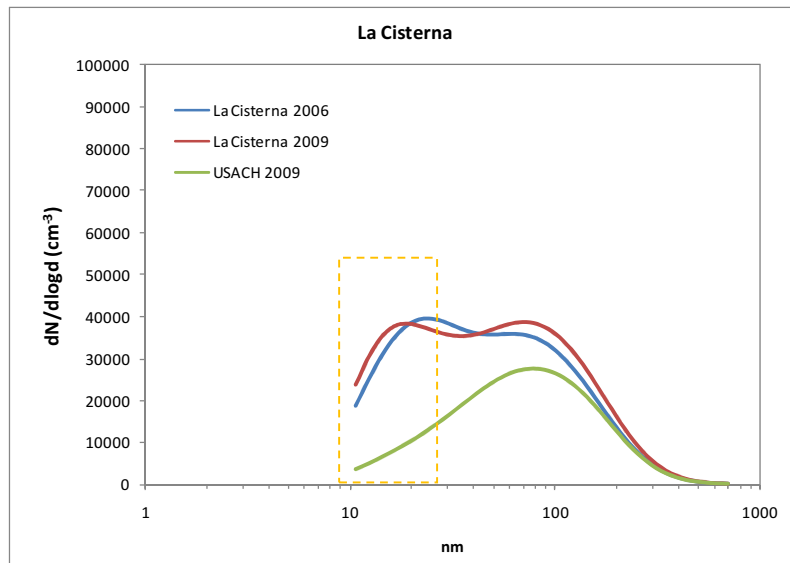


Figura 2.7: Comparación distribución de partículas medidas en La Cisterna 2006 y 2009 con el monitoreo background de USACH 2009. La sección demarcada con color naranja indica la evolución de las partículas asociadas a emisiones de tubos de escape. La distribución de USACH 2009 (color verde) se señala con la finalidad de ilustrar un sitio sin el impacto directo de fuentes de transporte.

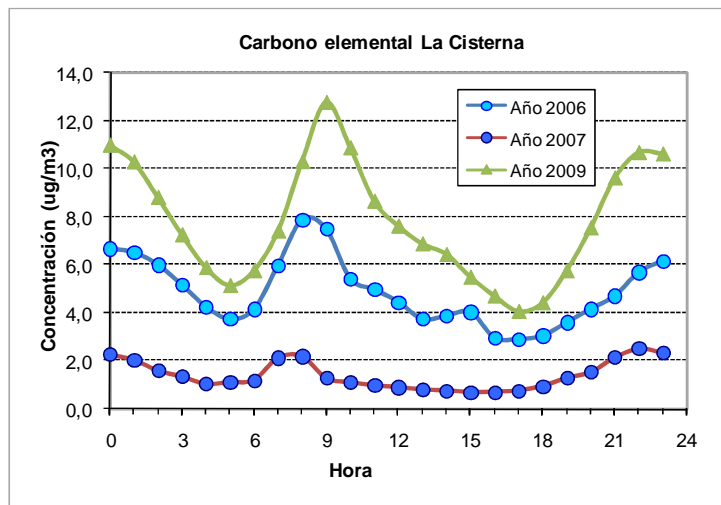


Figura 2.8: Perfil promedio diario de concentración de hollín en La Cisterna para los tres años de evaluación.

La comparación entre Alameda y La Cisterna reafirma la validez de la metodología empleada, ya que permite identificar y describir cambios en contaminantes asociados directamente a la emisión de vehículos de transporte público, y es una clara señal de que

para obtener reducciones de emisiones se deben acompañar las mejoras operacionales del transporte público con una renovación tecnológica.

Considerando que el proceso de ajuste de la flota de buses ya está concluido en gran parte, el presente estudio es una buena línea base para evaluar el impacto de la renovación tecnológica de Transantiago en el material Particulado. En este sentido, el corto plazo considerará la sustitución de los últimos buses Euro II por buses nuevos EURO III con filtros de partículas, mientras que el largo plazo consistirá en la introducción de servicios eléctricos u otras tecnologías de baja emisión que estarán disponible para el proceso de renovación de los actuales operadores.

Es importante mencionar que en la medida que continúe el proceso de renovación de la flota de buses de Transantiago, más evidente será el impacto de otros sistemas de transporte en la calidad del aire por partículas, en especial el transporte de carga, por lo que es altamente recomendable la incorporación de nuevas medidas que permitan la reducción de sus emisiones.

2.2 Óxidos de Nitrógeno

Junto con el material particulado, los motores diesel de los buses son una fuente importante de Óxidos de Nitrógeno. Por esta razón en el estudio se han incorporado dos tipos de monitoreo de este contaminantes. Uno de ellos consiste en la disposición de muestreadores pasivos¹⁰ en diferentes vías troncales y alimentadores. El segundo tipo de monitoreo se lleva por medio del monitoreo continuo. Para diferenciar entre transporte público y privado se ha empleado una modelación a escala local (Alameda).

Los resultados de tubos pasivos señalan que el transporte vehicular es una de las fuentes más importante de NO_x (Figura 2.9). Aquellos tubos dispuestos arterias de alto tráfico como lo representan Gran Avenida, el centro de la ciudad y Av la Florida señalan las mayores concentraciones.

¹⁰ Dispositivos que permiten determinan concentraciones promedios de NO_x/NO/NO₂ para un período determinado de exposición (entre 7 a 10 días usualmente).

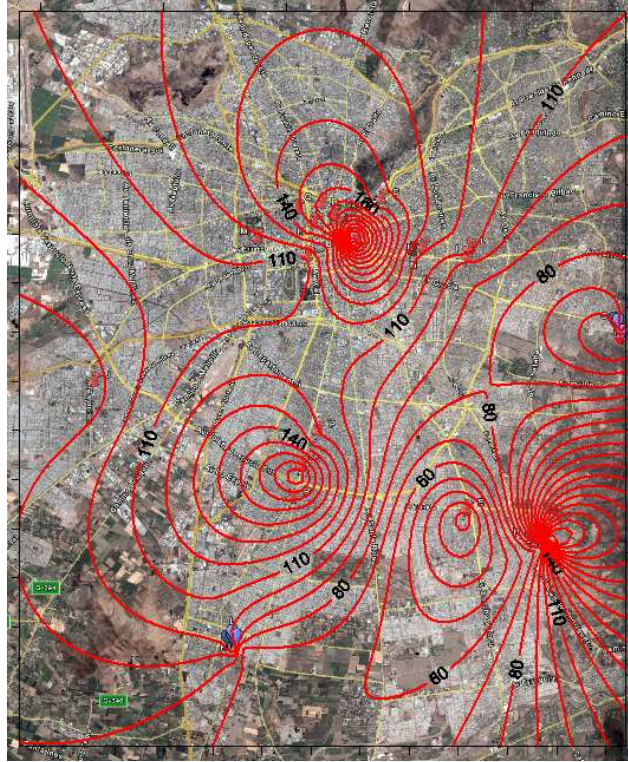


Figura 2.9: Interpolación espacial de las concentraciones de NO_x medidas con muestreadores pasivos 2009.

El uso de modelos de dispersión de la contaminación permitió determinar que el aporte del transporte público a la contaminación por Óxidos de Nitrógeno a nivel de calle en Alameda aumentó levemente como resultado del aumento del número de buses. Esto refleja el hecho que las emisiones de este contaminante no representan variaciones muy significativas entre las tecnologías EURO II y III.

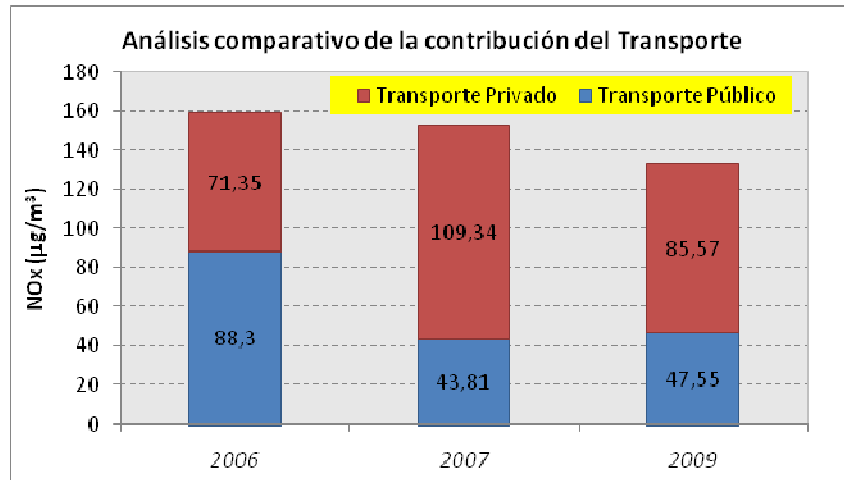


Figura 2.10: Contribuciones locales (modelados) para la calle Alameda como forma de concentración de NO_x para los tres períodos de evaluación.

2.3 Terminal de buses Transantiago

El Terminal Puente Alto fue utilizado para estimar el impacto de su funcionamiento en la calidad del aire. Par esto se utilizó una modelación gaussiana¹¹, datos de concentración de calidad del aire e información de actividad del terminal¹².

Los resultados indicaron que la evaluación porcentual de la participación del terminal en las concentraciones totales de NO_x puede llegar a un 50% en la intersección con Avenida La Florida, pero decae rápidamente en un rango de 2 a 5% en sectores más alejados.

¹¹ Modelación de dispersión de contaminantes.

¹² Composición, tipo y actividad de los buses, extraídos de los Planes Operacionales.

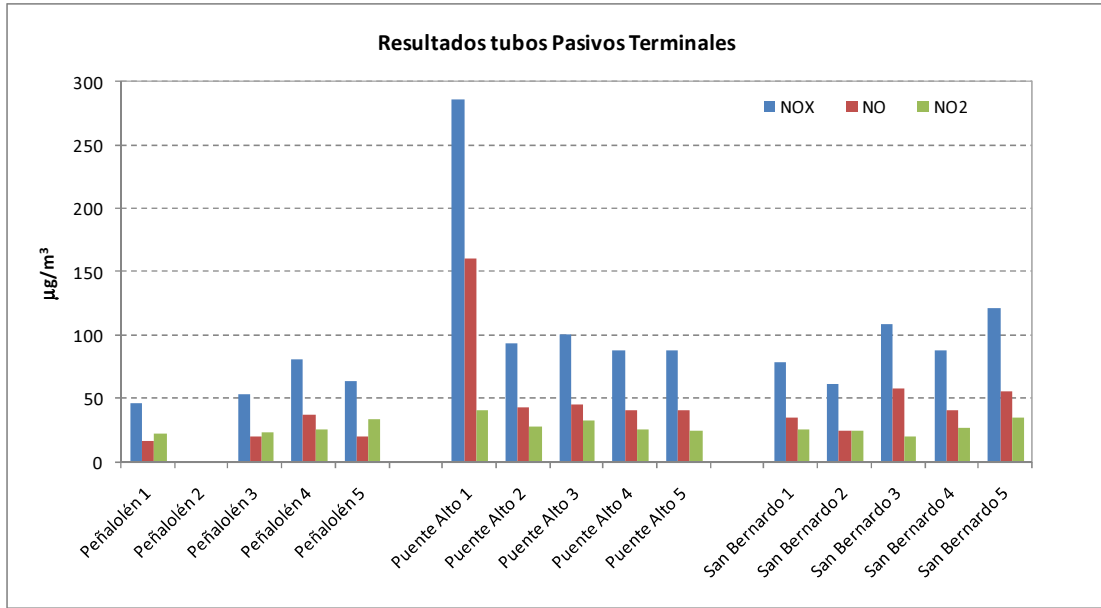


Figura 2.12: Resultados de concentración promedio de NO_x tres terminales de Transantiago, 2009.

3 Cuadro Resumen de Resultados

En la tabla siguiente se encuentra un esquema resumen que integra los resultados más importantes del proyecto.

Tabla 3.1: Esquema resumen de principales resultados asociados a la implementación de Transantiago y su impacto en la Calidad del Aire de la RM.

HITO	MARCO COMPARATIVO 2006 – 2007	MARCO COMPARATIVO 2007 – 2009	OBSERVACIÓN/ CONSECUENCIA/ PRÓXIMO PASO
Situación general de calidad de aire en Santiago	<p>→ A escala regional existe un aumento de las concentraciones medidas por la Red MACAM (en algunas estaciones alcanzando un 45%). Este resultado es explicado principalmente por condiciones meteorológicas.</p> <p>→ Producto de lo anterior, no es posible observar a nivel metropolitano los cambios de Transantiago, dado que hay una compleja matriz de fuentes emisoras y existe una contribución background¹⁴ que domina gran parte de las mediciones.</p>	<p>→ A escala regional existen concentraciones similares, indicando que la meteorología influye fuertemente en las mediciones registradas por la Red MACAM.</p> <p>→ La imposibilidad de detectar efectos de Transantiago en las mediciones de la Red MACAM exige implementar un sistema diferente de monitoreo acorde con las necesidades. Esto debe considerar medición a nivel de calle y background.</p>	<p>La nueva norma MP_{2.5} va a poner el énfasis en la reducción de las emisiones de gases precursores de material particulado secundario formado a partir de gases. Los Óxidos de Nitrógeno serán un tema cada vez más relevante. Los buses son una fuente importante, y existirá una progresiva presión para mantener una renovación de la flota. Por lo tanto nace una necesidad de caracterizar el background urbano de la ciudad de Santiago, para estimar la contribución en la formación de aerosoles secundarios generados por las emisiones de Transantiago.</p>
Composición vehicular del transporte de Santiago	<p>→ Disminución considerable del número de buses de transporte público (59% en Alameda y 47% en</p>	<p>→ Aumento en la flota de buses (22%) con respecto al 2007.</p> <p>→ Recambio tecnológico</p>	<p>En términos generales el primer escenario indica una reducción del número de buses,</p>

¹⁴ “Background Urbano” se refiere a la contaminación que refleja las condiciones de fondo de una ciudad, la cual no es atribuida al impacto directo de una fuente emisora en particular.

HITO	MARCO COMPARATIVO 2006 – 2007	MARCO COMPARATIVO 2007 – 2009	OBSERVACIÓN/ CONSECUENCIA/ PRÓXIMO PASO
	Gran Avenida). → Aumento de los automóviles (27% en Alameda y 10% en Gran Avenida).	importante en Alameda (79% de los buses son EURO III). → No así en Gran Avenida (59% de buses son Euro III). → Aumento importante de de camiones en Gran Avenida (49%) con respecto al 2007.	mientras que el segundo escenario significa más bien en un recambio tecnológico. El transporte privado va a continuar creciendo, por lo que será necesario diferenciar su aporte a la emisión de los precursores del material particulado, con énfasis en los Óxidos de Nitrógeno.
Partículas Ultrafinas (emisiones directas de escape)	→ Reducción en Alameda del orden de un 30%.	→ Reducción del orden de un 15% en Alameda. → No es posible observar reducciones significativas en La Cisterna (la variación es menor a 1%).	La comparación Alameda v/s La Cisterna evidencia que el recambio tecnológico obtiene beneficios ambientales, demostrando que se justifica la incorporación de normas de emisión para motores de buses progresivamente más exigentes.
Óxidos de nitrógeno	→ Disminución de un 50% de la participación del Transporte público. → Contrarrestado por un aumento semejante de la participación del transporte privado.	→ Leve aumento del transporte público (4%) producto de mayor cantidad de buses.	Necesidad de dirigir mayores esfuerzos en el control de las emisiones de NO _x . La norma EURO IV más filtros de partículas incluidas en el Plan de Descontaminación serán un aporte en este sentido.
Terminal			El análisis se realizó solo durante el 2009, y mostró que el impacto en la calidad del aire asociadas al funcionamiento del terminal son bajas en comparación al impacto

HITO	MARCO COMPARATIVO 2006 – 2007	MARCO COMPARATIVO 2007 – 2009	OBSERVACIÓN/ CONSECUENCIA/ PRÓXIMO PASO
	X	X	que reciben las personas que viven en la cercanía de avenidas principales (a menos de 100 metros la participación es menor a un 2%).

4 Conclusiones

Conclusiones generales:

1. Para el periodo de medición de MP_{10} 2007- 2009 tanto los valores experimentales de la Red MACAM como los de modelación a escala urbana, una vez calibrado el modelo, entregan niveles de concentraciones similares. Por el contrario, durante el período 2006-2007 se registró un aumento considerable de las concentraciones (en Parque O'Higgins alcanzando un 45%). El comportamiento de contaminantes a escala urbana que entrega la Red MACAM depende principalmente del factor meteorológico. A su vez, la abundancia de períodos con acumulación producto de una deficiente ventilación favorece la formación de componentes secundarios en la atmósfera dominando lo que se conoce en la literatura especializada como background urbano. Esta es la razón por la cual la Red MACAM no puede percibir cambios de una fuente en particular (como es el caso de Transantiago), por lo que se hace necesario disponer de otra metodología.
2. En este sentido, las mediciones realizadas en la Universidad de Santiago pueden representar muy fielmente el background urbano, esto es el impacto sinérgico de la mezcla de todas las fuentes emisoras de la RM. Disponer de este tipo de estación como parte de la Red de Transantiago más otras a nivel de calle, será fundamental para poder aislar la real contribución a la contaminación atribuida al Transantiago.
3. Se ha construido y validado una metodología que permitirá continuar evaluando la eficacia de las próximas medidas a implementarse en la flota de buses de Transantiago. La completitud y especificidad de las mediciones realizadas durante las campañas del 2009 entregan una mejor evaluación del aporte a los niveles de contaminación generados por Transantiago en la RM. Se ha validado que la utilización de un sistema de monitoreo basado en una estación background más otra a nivel de calle permite aislar eficientemente las emisiones frescas provenientes del transporte.
4. Se ha demostrado que las partículas ultrafinas son el mejor parámetro de medición cuando se estudia el impacto en calidad de aire relacionada con Transantiago en la RM. Esto es porque todas las medidas de control están más fuertemente enfocadas en abatimiento de emisiones de tubos de escape de los vehículos, cuyas partículas se concentran en la fracción ultrafina. Dado su tamaño, éstas aportan una fracción menor en masa al MP , no así en número de partículas.
5. Mientras más se avance en términos de reducción de las partículas de tubos de escape de buses de Transantiago, más importancia irán adquiriendo otros medios de transporte como por ejemplo el de carga. Por consiguiente, la reducción de la contaminación atmosférica que se consigue con la implementación de mejores

tipos de tecnológicas vehiculares deben ser aplicadas al Transporte Público, y también extendidas a otros medios de transporte terrestre.

6. La reducción de partículas ultrafinas implicará en que los óxidos de nitrógeno serán cada vez más importantes, y probablemente la opinión pública y especializada presionará cada vez más en la implementación de medidas para el abatimiento de este contaminante. Ya que los filtros de MP tienen incorporado un catalizador de oxidación es posible encontrar una reducción de los niveles de NO, sin embargo esto deberá ser corroborado en mediciones de calidad del aire. La metodología aplicada en este estudio podrá validar tales aseveraciones.
7. Como ventaja directa de las reducciones de partículas ultrafinas asociadas al cambio tecnológico del transporte, está el hecho que tales medidas implican conseguir reducir el nivel de exposición de población de la RM a contaminantes más riesgosos para la salud.

Conclusiones específicas:

1. Alameda
 - a. Los flujos vehiculares muestran una reducción del número de buses Euro I/II en Alameda en un 32%, y una reducción del 2% en el número de automóviles.
 - b. Se observa una disminución del MP ultrafino entre los años 2006-2009, reducción que está asociada al cambio de buses EURO I/II por EURO III, evidenciando consecuencias positivas de la implementación de programas de renovación tecnológica de la flota de buses de Transantiago. Otra evidencia que tiene relación con la importancia del recambio tecnológico descansa en el hecho que a pesar que se introdujeron más buses al sistema de transporte público igual se consigue reducir las emisiones frescas de partículas.
 - c. Mediciones experimentales y modelación de dispersión de óxidos de nitrógeno a nivel de calle en Alameda indican que este contaminante asociado al transporte público urbano aumentó en un 9% en relación al año 2007. Esto indica que el control de las emisiones de NO_x será uno de los próximos desafíos a enfrentar en las próximas décadas, ya que con las tecnologías disponibles hoy en día no se alcanzan los mismos grados de reducción que las partículas.
2. La Cisterna
 - a. Los flujos del transporte privado (automóviles/furgones/camionetas) aumentaron en un 15%. Paralelamente también se evidenció un aumento en torno a un 8% en el número de buses EURO I/II, y un aumento de un 49% de camiones. La comparación de La Cisterna con Alameda permite evidenciar dos escenarios distintos de evaluación: Alameda representa una vía con una importante renovación tecnológica de buses, mientras que La Cisterna indica una vía con una composición vehicular más deteriorada (con relación al número de buses antiguos y camiones).

- b. Esta es la razón por la cual en La Cisterna se observa un aumento en los niveles de concentración de carbono elemental y una estabilización de los niveles de MP ultrafino. Esta evidencia indica que el recambio tecnológico de Transantiago sí tiene incidencia positiva en la calidad del aire.

3. Terminales

- a. Los resultados experimentales y de modelación indican que no existe un aporte sustantivo desde los terminales en comparación a los niveles de contaminación medidos en las calles adyacentes con tráfico vehicular intenso. Las modelaciones indican que el impacto de la actividad de los terminales es más importante en el interior de las instalaciones, y decrece rápidamente con la distancia hacia las áreas residenciales. La estimación del Terminal Puente Alto indica que a 100 metros de distancia el impacto por decae a solo un 2%.
- b. En base a las mediciones realizadas de NO_x en los terminales con tubos pasivos se postula que la situación ambiental del Terminal Puente Alto puede ser extrapolable a los Terminales San Bernardo y Peñalolén bajo ciertos márgenes. Uno de ellos es la antigüedad de la flota de buses que se depositan, otro es el tamaño, un tercero sería el número de buses y por último la tecnología de ellos.
- c. Atendiendo a lo anterior, los mayores impactos de actividad de Terminales se encontrarían en aquellos que dispongan de una flota antigua. Probablemente, los terminales y depósitos asociados a buses alimentadores impliquen mayores problemas con sectores residenciales aledaños, sin embargo los próximos programas de introducción de filtros de partículas a este tipo de buses ayudará a reducir la contaminación tanto a nivel de calle como en áreas próximas a los terminales.

5 Recomendaciones

El sistema de transporte público de Santiago tiene el desafío de prestar un mejor servicio reduciendo simultáneamente su impacto en la calidad del aire y en la salud de los habitantes. El nuevo Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférico de la Región Metropolitana (PPDA) define nuevas exigencias ambientales que deberán ser cumplidas dentro de la presente década. Estas apuntan a mantener el proceso de renovación de la flota incorporando buses con nuevas tecnologías, al cumplimiento de metas globales de reducción de contaminantes, y a la puesta en marcha de las exigencias de metas de emisiones para los operadores.

Se ha demostrado que con la implementación de Transantiago se ha logrado, para los períodos estudiados, una reducción apreciable de las emisiones de partículas ultrafinas, lo que está directamente asociado a la reducción del número de vehículos de la flota y a la renovación de buses EURO I/EURO II por buses EURO III. En el caso de los Óxidos de Nitrógeno, las reducciones modeladas no han sido tan significativas en comparación con las partículas, y a su vez se ha visto compensada en gran parte por el aumento de la flota del transporte privado.

Para seguir obteniendo una reducción del impacto a nivel de calles de MP fino se requiere continuar con el reemplazo de los buses más antiguos de Transantiago, hasta llegar a un 100% de sustitución. También, será muy valiosa la introducción de filtros de MP a buses de Transantiago. Este tipo de políticas representa un buen aporte para el establecimiento de normativas más estrictas (EURO V y EURO VI).

De acuerdo a la información de la Secretaría Ejecutiva de Transantiago, en el corto plazo se producirá una introducción aun más masiva de filtros en la flota de transporte público de Santiago, por lo que se espera una reducción sustantiva de las emisiones de material particulado. Por esta razón, los desafíos ambientales serán distintos para el proceso de renovación de los actuales operadores, el que planea iniciarse en la segunda mitad de la presente década. Es importante considerar para tal fecha estará en aplicación una nueva fase del PPDA de RM, con énfasis en la reducción de MP_{2.5}, y probablemente existirán exigencias respecto del control de las emisiones de gases de efecto invernadero. Ante este escenario, los objetivos ambientales para Transantiago deberán estar enfocados hacia la reducción de NO_x, especialmente en elucidar su participación en la formación de aerosoles secundarios y en conjunto con los COV la formación de Ozono. Otro tema de gran relevancia internacional, por su impacto global, es la generación de gases efecto invernadero, como lo son las emisiones de CO₂ tema que está siendo regulado mediante normas de emisión¹⁵.

¹⁵ http://ec.europa.eu/environment/air/transport/co2/co2_home.htm

Esto significará una nueva transformación tecnológica, con la renovación de buses EURO III por tecnologías EURO VI o superiores, que incorporaran sistemas avanzados de control de NO_x y de partículas; así como también mediante la incorporación de servicios de transporte público eléctricos de superficie, como tranvías en servicios troncales.

Atendiendo al hecho que las partículas finas y ultrafinas presentan mayor riesgo a la salud de la población, es necesario incorporar estudios de la exposición personal a la contaminación del transporte público, tanto de parte de los usuarios, como de los pasajeros transportados por los demás modos. De esta forma se podrá dar una visión integral de los impactos de Transantiago, así como de los beneficios resultantes de los procesos de optimización operacional y ambiental del sistema.

De cara a los desafíos impuestos por el nuevo PPDA, las próximas fases de este estudio deben complementar las metodologías ya validadas (especialmente el monitoreo de partículas ultrafinas como indicador del impacto de la introducción de filtros), con otras que permitan implementar y dar seguimiento a las nuevas exigencias. En este sentido es importante establecer un **Sistema Integrado de Información Ambiental para el Transporte Público de Santiago**, que incorpore la red de monitoreo recomendada en la versión anterior de este estudio, con el inventario de emisiones de Transantiago, elaborado como parte del estudio Diseño Integral de un Sistema de Compensación de Emisiones Atmosféricas para la Región Metropolitana de Santiago¹⁶. Éste permitirá complementar la evaluación del impacto en calidad del aire junto con el cumplimiento de las metas de emisión asignada por el PPDA, tanto para todo el sistema como para cada uno de los operadores.



Figura 5.1: Esquema del Sistema Integrado de Información para el Transporte Público de Santiago.

¹⁶ Elaborado por Centro Mario Molina Chile como parte del Proyecto GEF TF 052724 “Transporte Sustentable y Calidad del Aire para Santiago”

5.1 Red de Monitoreo de para el seguimiento ambiental del Transporte Público

El diseño de una red de seguimiento del impacto en calidad del aire de los cambios en el sistema de transporte público de largo plazo permite evaluar la eficacia y la eficiencia de diversas intervenciones en el sistema de transporte público que impacten la calidad del aire en la región. Asimismo, más importante es generar soporte para el desarrollo de estrategias de abatimiento de emisiones, tales como las consideradas en la última versión del PPDA para la RM.

De acuerdo a criterios internacionalmente aceptados, la elección de los sitios de monitoreo se debe realizar en base a como se muestral a continuación.

Tabla 5.1: Criterios de clasificación de las estaciones.

Clasificación del sitio	Descripción
<i>Ciudad o centro urbano</i>	<i>Una ubicación urbana representativa de la exposición de la población general en pueblos o centros de ciudades, tales como recintos para peatones o áreas comerciales</i>
<i>Fondo (“background”) urbano</i>	<i>Una ubicación urbana alejada de fuentes de contaminación y, por lo tanto, representativa de las condiciones de fondo (“background”) de toda la ciudad</i>
<i>Suburbano o residencial</i>	<i>Un tipo de ubicación situado en áreas residenciales en los límites de un pueblo o ciudad</i>
<i>Vereda o cerca de calle</i>	<i>Un sitio ubicado dentro de 1 a 5 metros de una calle muy transitada</i>
<i>Industrial</i>	<i>Un área donde fuentes industriales hacen una contribución importante a concentraciones pico o de largo plazo</i>
<i>Rural</i>	<i>Un sitio ubicado a campo abierto tan lejos como sea posible de caminos y áreas pobladas o industriales</i>
<i>Otro</i>	<i>Un sitio especial orientado a una fuente o microambiente en particular, u otro ubicado en un punto receptor de interés como una escuela u hospital</i>

Fuente: Norwegian Institute for Air Research (NILU)

Para el seguimiento de los impactos del transporte en la calidad del aire, hay que considerar el emplazamiento estaciones tipo “Vereda o cerca de calle” y “Fondo (background) urbano” como se indica en Tabla 5.1. Este diseño involucra directa e indirectamente a todos los modos de transporte de la ciudad de Santiago, por lo tanto es fundamental que el monitoreo propuesto permita aportar antecedentes para diferenciar la contribución de la flota de buses de otras fuentes emisoras existentes en la región.

Para el caso específico de diferenciación respecto de otros modos de transporte, se recomienda incluir un monitoreo que distingan entre:

- Troncales y líneas de metro
- Alimentadoras
- Estaciones de trasbordo e intercambio modal y metro
- Corredores segregados

Es importante mencionar que la elección de los sitios y parámetros a medir dependerán del objetivo que se planea alcanzar (impacto de terminales, Intermodales, vías troncales, etc). Para tal efecto se recomienda la construcción de un sistema general basado en el siguiente esquema:



Figura 5.2: Diseño de la Red de Monitoreo para Transantiago. Para una gestión eficiente de la información todos los monitoreos deben estar conectados en línea.

CALLE: deben considerar un set de instrumentos que busquen evaluar el nivel de concentración medida a nivel de calle. No es necesario que el monitoreo sea permanente, sino que más importante es que los instrumentos monitores puedan ser fácilmente trasladados a diferentes sitios según los objetivos de la campaña de monitoreo. EL monitoreo a nivel de calle debe considerar MP_{10} , $MP_{2,5}$, $MP_{1,0}$, CO, CO_2 , Carbono Elemental y Orgánico (en filtros), y NO_x .

ESTACIÓN MVIL: Debe estar compuesto por una estación montada sobre un vehículo idealmente eléctrico para no afectar los parámetros medidos. Este es el componente más importante del sistema de monitoreo. Los parámetros deben considerar Carbono Elemental y Orgánico, N° de Partículas por tamaño, CO, CO_2 , NO_x .

BACKGROUND URBANO: A nivel de calle siempre se encuentran impacto de otro tipo de fuentes, de manera que con esta estación se podrá diferenciar entre la contribución local y la de fondo. Se necesita un monitoreo permanente. Se recomienda monitorear MP_{10} , $MP_{2,5}$, $MP_{1,0}$, N° partículas por tamaño, Carbono elemental y Orgánico.

AIRVIRO: Es recomendable la automatización de todos los sistemas de monitoreo para una gestión eficiente y eficaz de la información generada por el sistema de monitoreo. Airviro representa una excelente vía para este propósito.

Es recomendable también durante campañas específicas de medición, la utilización de tubos pasivos.

La Tabla 5.2 resume las propuestas concernientes a equipamiento recomendado, variables consideradas y su justificación.

Tabla 5.2: Propuesta de Equipamiento recomendado.

Monitoreo /Análisis	Justificación
<i>Monitoreo continuo de partículas ultrafinas</i>	<p><i>Instrumentos como el DMPS (Differential Mobility Particle Sizer), utilizado en este estudio, permiten identificar variaciones de impacto directo del transporte.</i></p> <p><i>Ese tipo de información, debe sumarse a estudios tales como la determinación de “finger print” para la caracterización de las emisiones de distintos modos, son fundamentales para efectos del diseño de futuras medidas a considerar en el PPDA.</i></p> <p><i>Para este tipo de estudio se recomienda la utilización de instrumentos que permiten medir directamente desde los tubos de escape de los buses, tales como los disponibles en los laboratorios del 3CV.</i></p>
<i>Monitoreo mediante Tubos Pasivo para, BTEX, Ozono, SO₂ y NO_x.</i>	<p><i>Este tipo de mediciones resulta crítico para efectos de una evaluación sistemática de la representatividad de distintos sitios de monitoreo.</i></p> <p><i>Además, el monitoreo pasivo resulta determinante para el uso de herramientas de modelación.</i></p>
<i>Monitoreo discreto y continuo de Carbón Elemental y Orgánico</i>	<p><i>Para este monitoreo se recomienda el uso de Impactadores tipo Harvard, con filtros de cuarzo, que permitan determinar los niveles de concentración de Carbón Elemental y Carbón Orgánico, como también filtros de Teflón para el análisis de elementos trazas presentes en las muestras y que están asociados a los combustibles, desgaste de neumáticos y material particulado resuspendido.</i></p> <p><i>Monitoreo continuo de Carbón Elemental y Orgánico también debe considerarse.</i></p>

<p><i>Especiación Físico-Química del Material Particulado por tamaño</i></p>	<p><i>El análisis o especiación físico-química del material particulado en sus distintas fracciones resulta crítico para discriminar el impacto relativo (respecto de otras fuentes) del transporte público.</i></p> <p><i>Para efectos del monitoreo de partículas ultrafinas, atendida su masa muy pequeña, resulta apropiado considerar técnicas de acumulación como las que permite el equipamiento de impactadores de cascada tipo “MOUDI y NANOMOUDI” [multi orifice uniform deposit impactor].</i></p>
--	---

Fuente: Elaboración Propia

5.2 Inventario de Emisiones de Transantiago

El inventario de emisiones de Transantiago desarrollado en Airviro a su vez puede ser utilizado para evaluar la eficacia de la aplicación de medidas con anterioridad al hecho mismo. Este escenario es ventajoso ya que utiliza información real sobre el recorrido y velocidad de los buses de Transantiago. Esta información en conjunto con mediciones de calidad del aire y meteorología generada por la Red MACAM o la futura red de monitoreo de Transporte Público permitirá el uso de herramientas innovadoras en materia de seguimiento de los impactos ambientales, entre los que destacan evaluación de escenarios de simulación, modelación en tiempo real, y otras externalidades del Transantiago. Este sistema podrá generar vías de gestión y manejo de la información permitiendo construir un seguimiento histórico de la contaminación generada por Transantiago.

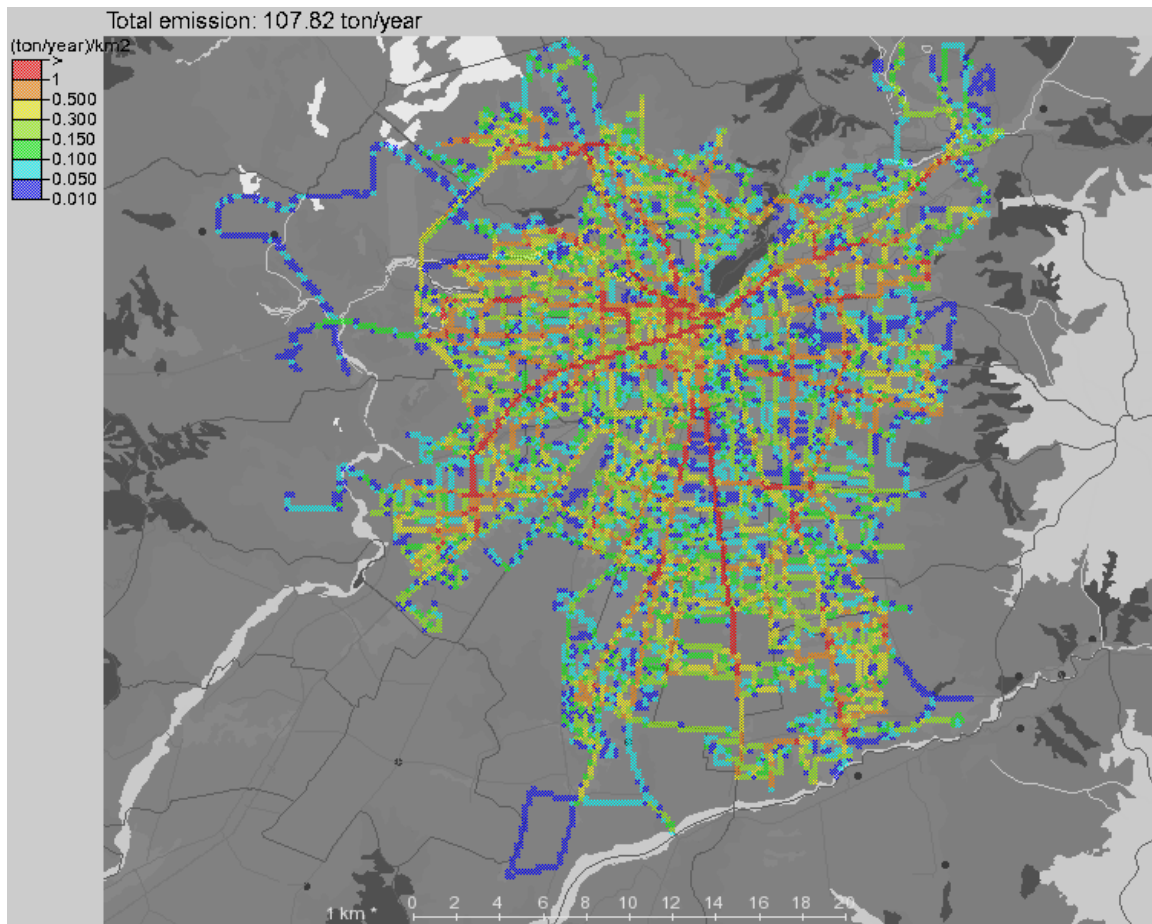


Figura 5.3: Ejemplo de aplicación Inventario de Emisiones Transantiago.