

FUENTES MÓVILES Y LA CARACTERIZACIÓN DE VÍAS DE CIRCULACIÓN: UNA APROXIMACIÓN A LOS MODELOS DE EMISIÓN GRILLADOS

Miguel Ángel Gantuz - José Luis Puliafito

Universidad de Mendoza
Aristides Villanueva 773 , 5500 Mendoza, Argentina
email: miguel.gantuz@um.edu.ar - jose.luis.puliafito@um.edu.ar

Palabras claves: contaminación atmosférica, modelos de emisión grillados, aproximación bottom-up, sistema autotransportado de medición, caracterización de vías de circulación.

Resumen: *Los modelos matemáticos de inmisión (concentración aérea de contaminantes), en general basados en ecuaciones de transporte o de dispersión gaussiana, requieren describir adecuadamente las fuentes de emisión, en particular las fuentes móviles, es decir el tránsito vehicular y sus emisiones. El presente trabajo propone una nueva metodología tipo "bottom-up" para la determinación y estimación de la distribución espacial y temporal de las emisiones de fuentes móviles, enfocada a una descripción en el nivel de celdas, aspecto que es fundamental para elaborar modelos dinámicos grillados de emisión-inmisión más ajustados a la realidad urbana. Ésta está basada en datos obtenidos a partir de un sistema autotransportado de medición, con lo que se busca resolver el problema de la caracterización de la emisión bajo recorridos reales y reducir sustancialmente la incertidumbre de la distribución espacio-temporal de la contaminación. Para ello se introduce un nuevo concepto cual es la caracterización de las vías de circulación en sí mismas a través de factores de emisión propios. Esto implica considerar no solamente al vehículo como responsable de la emisión, sino también a la propia vía de circulación, en la que se manifiesta, con las restricciones de la infraestructura vial, el tránsito vehicular como pulso representativo de la ciudad. La ventaja estriba no solamente en mejorar la modelación de micro escala, y cómo la inmisión puede evolucionar en el tiempo, sino también en permitir la modelación en tiempo real y la verificación permanente de la conformidad de las normas. Dentro de este contexto se presentan los resultados experimentales principales en un caso de estudio como es el Gran Mendoza, así como los elementos que delinean una metodología general para derivar un modelo de emisión grillado.*

1 INTRODUCCIÓN

En un problema general de evaluación de la contaminación atmosférica urbana deben distinguirse el medio atmosférico en sí mismo, que actúa como cuerpo receptor y de mezcla, y las fuentes de emisión, desde donde se producen e inyectan los contaminantes que afectan a la atmósfera. El medio atmosférico urbano (como cuerpo receptor) es la porción inferior de la atmósfera (troposfera inferior), o más precisamente su capa límite (en donde la superficie de la tierra influye fuertemente en la estructura de vientos), con una altura variable que depende de las condiciones particulares de presión y temperatura, así como de la topografía local. Entre las fuentes de emisión por otra parte, interesan en particular aquellas en las que interviene directamente el hombre, éstas abarcan tanto las instalaciones fijas (fuentes fijas) como los vehículos (fuentes móviles).

El tratamiento de los factores atmosféricos propiamente dichos, y que incluye principalmente a la química del aire, la meteorología y el transporte y dispersión de los contaminantes, corresponde a los modelos de inmisión (o dispersión) de contaminantes, entre los que se destacan los de dispersión por pluma gaussiana y los basados en ecuaciones de transporte atmosférico y sus procesos químicos^{10,13}. Por otro lado, los factores que afectan a las fuentes de emisión -que dependen no sólo de los procesos físicos que éstos implican y de sus variaciones, sino también de las actividades antrópicas en sí mismas, vinculadas a la dinámica socio-económica-, son tratados por los modelos de emisión.

A escala de una región, los modelos de inmisión dependen no sólo de los factores atmosféricos propiamente dichos, sino también de establecer con cierta precisión el régimen de emisión y la localización espacial de las fuentes. Las técnicas de cómputo más actuales tienden a combinar programas de simulación clásicos (estacionarios o dinámicos) con Sistemas de Información Geográficos (SIG) en modo ráster, en los que no sólo es posible tratar las fuentes a partir de una base de datos espacial, sino que facilitan también la representación de resultados^{8,9}. Así los modelos de inmisión tienden a una forma grillada en las que las concentraciones en cada celda surgen de computar la contaminación debida a las fuentes propias y la debida a la dispersión de contaminantes provenientes de las fuentes ubicadas en otras celdas.

En este contexto los modelos de emisión deben describir desde dónde y cómo son emitidos los contaminantes a la atmósfera. Cabe destacar que la relación de éstos con los modelos de inmisión arriba mencionados, resulta distinta si se trata de fuentes fijas o de fuentes móviles. Las fuentes fijas (sobre todo las puntuales) son naturalmente acoplables a modelos grillados de dispersión gaussiana o de transporte, y en general requiere más atención el tipo de emisión y sus valores medios que la variación temporal de ésta (que es usualmente limitada). En cambio las fuentes móviles por ser dinámicas tanto en su localización como en el régimen y hasta composición de la emisión, resultan más difíciles de tratar y justifican así una consideración y esfuerzo particular.

Hasta ahora los modelos de emisión de fuentes móviles han adoptado en general una aproximación tipo *top-down*. Esta forma de descripción, pensada más que nada como *modelo de inventario de fuentes* (análisis de la participación en la contaminación por tipo de fuente), es usual en estudios de contribución general de una región a la contaminación atmosférica

local o global, pero puede ser aplicado también en modelos de emisión grillados (principalmente en áreas grandes) cuando hay insuficiencia de datos sobre el uso de vehículos, derivando una estimación media de emisiones por vehículo y por unidad de recorrido. Cada recorrido es caracterizado por sus emisiones y localización, información que luego es volcada a la base de datos geográfica correspondiente. Los datos de entrada de este tipo de modelo de emisión abarcan la cantidad de habitantes, el consumo anual de combustible, la actividad local, la composición del parque automotor, la longitud media recorrida, y los factores de emisión promedio dependientes de la velocidad⁹.

Los modelos de emisión grillados, sin embargo, han despertado más recientemente un creciente interés en aproximaciones tipo *bottom-up*; ya que éstas naturalmente apuntan al cómputo de emisiones en pequeñas áreas, tal como sería el caso de una celda de representación; aunque en el fondo éstas se orientan más al fenómeno de contaminación en micro-escala, también pueden contribuir al estudio de ciudades si se tienen disponibles los datos necesarios de uso de vehículos; incluso a la de macro escala (por ejemplo una región o incluso un país), toda vez que el total de emisiones puede contabilizarse por la suma de aportes de áreas menores. Así un método *bottom-up* típico debería disponer e interconectar:

- a) modelos de tránsito: informaciones específicas acerca de la actividad de tránsito, tales como: millas recorridas por los vehículos (VMT), tiempo promedio de recorridos en horas (VHT), velocidad media y densidad de vehículos (modelo de cuatro pasos).
- b) modelos de factores de emisión: brindan datos de emisión unitaria para varias combinaciones de tipos de vehículos y modos de uso.
- c) modelos de inventario de emisiones vinculan la actividad urbana con los anteriores a fin de calcular las emisiones totales de los vehículos. Los modelos de inventarios de emisiones se utilizan por ejemplo en el análisis de la conformidad de las normas.

Aunque a los fines de un modelo de emisión-inmisión grillado, el método *bottom-up* resulte mucho más atractivo que el más clásico *top-down*, es natural y hasta necesario tratar de realizar el cruzamiento de información entre ambos, ello a fin de validar y corregir errores tanto en datos como en resultados estadísticos. Sin embargo, la experiencia indica que la convergencia entre métodos es dificultosa, lo que justifica mayor investigación en el planteo y uso de los métodos *bottom-up*.

Entre las debilidades atribuidas actualmente al método *bottom-up*, a la hora de validar los valores totales de emisión, figuran¹⁴.

- a) no hay conexión directa entre un modelo de inventario de emisiones y un modelo de emisiones grillado;
- b) las estimaciones de emisiones de los modelos de inventario de emisiones regional no se corresponden con las de los modelos de emisiones grillados;
- c) los modelos de inventario de emisiones regional no están directamente conectados con los modelos de predicción de tránsito;
- d) los modelos grillados de emisiones no tienen interfases apropiadas entre los datos de tránsito y los factores de emisión.

Ello está imponiendo nuevas tendencias en el desarrollo tanto de los modelos de tránsito, como de los modelos de factores de emisión y hasta de inventarios de emisiones. Entre los *modelos de tránsito* se espera pasar de los más aceptados modelos de cuatro pasos estándares a una combinación entre modelos de asignación dinámica y modelos de micro simulación. Estos pueden mejorar significativamente la exactitud de los datos de tránsito, siendo posible su implementación tanto para redes de áreas chicas como grandes, aunque en éste último caso, claro, con computadores de capacidades y velocidades de consideración. En cuanto a los *modelos de factores de emisión*, se espera progresar de los tradicionales factores de emisión basados sólo en la velocidad (aún utilizados ampliamente), a *factores específicos* más detallados, incluyendo eventualmente *factores de emisión modales* (ralentí, aceleración, marcha estacionaria, etc.). Los factores de emisión modales deberían poder utilizarse en todos los niveles de interfase entre tránsito y emisiones, para lo cual aún subsisten grandes limitaciones que deben ser subsanadas. Finalmente, para que los modelos de tránsito y factores de emisión puedan ser combinados en una forma metodológicamente robusta, éstos deben estar en un mismo nivel de interfase, es decir deberán estar construidos a partir de la misma base (ambos basados en segmentos o ambos basados en viajes).

Entre los sistemas más directos de determinación de factores de emisión vehiculares están los ensayos dinamométricos, los dispositivos de sensado remoto y los sistemas autotransportados (también llamados vehículos instrumentados).

Los ensayos dinamométricos constituyen un método de prueba en donde las emisiones de los vehículos se obtienen bajo condiciones de laboratorio reproduciéndose un ciclo sobre rodillos inerciales, que simula las condiciones de operación del vehículo en carretera. Los dispositivos de sensado remoto miden la concentración de contaminantes (por ejemplo mediante radiación infrarroja, y en algunos casos por espectroscopía ultravioleta) cuando el automotor pasa frente a un sensor colocado a la altura de la salida de gases de escape. Aunque estos sistemas son los más antiguos y ampliamente utilizados, adolecen del problema de no representar adecuadamente al automóvil en condiciones reales de marcha.

Los equipos transportables y autotransportados, un grupo reducido de más reciente aparición, pueden en cambio obtener datos en condiciones de funcionamiento real. Éstos no han sido muy utilizados debido en parte al cambio de metodología que ello implica y el costo asociado de reemplazar los ensayos dinamométricos; nótese que las regulaciones en la mayoría de los países establecen límites máximos a los factores de emisión que son en general derivados del método dinamométrico, y verificados en cuanto a su nivel de cumplimiento, en talleres de revisión técnica con rodillos inerciales o con instrumentos en las calles. Sin embargo, las emisiones de los automóviles, cuando éstos recorren trayectos reales, pueden diferir en gran medida con las registradas por éstos métodos. Por esta razón es importante referir las mediciones a trayectos o recorridos reales; éstas, en tanto contribuyan a construir bases empíricas más sólidas, pueden posibilitar estrategias de gestión de calidad de aire más eficientes y una verdadera reducción de emisiones⁶.

Con los datos de alta resolución espacial y temporal, provenientes de sistemas autotransportados, es posible evaluar los efectos locales, como también diseñar e implementar estudios que apunten a la caracterización de las emisiones reales, todo lo cual es precisamente a lo que apunta normalmente un modelo de emisiones bottom-up. Por ejemplo, uno de los

objetivos de estos estudios es lograr mayor conocimiento de puntos de alta emisión (hot spots) en avenidas y carreteras, bajo los aspectos de un modelo modal de emisiones^{3,4,5,6}.

Por ello, en los últimos años los esfuerzos se han centrado en desarrollar equipos de costo más bajo, más como complemento necesario de los estudios dinamométricos y no tanto como sustituto⁷.

La EPA (US Environmental Protection Agency), no es ajena a esta nueva tendencia denominándolos *modelos de nueva generación*. En una publicación específica² ésta delinea la futura dirección estratégica de sus programas de modelado de fuentes de emisiones de contaminantes. Destaca cómo la expansión de la demanda de modelos a una escala más fina (estimaciones de emisiones más localizadas), derivada de los requerimientos legales cada vez más complejos, impulsa mayores estudios y mejores metodologías de modelación de emisiones. Se cree allí que los *nuevos y emergentes sistemas autotransportados* de mediciones de emisiones de fuentes móviles, revolucionarán la forma en que los datos son recolectados-convirtiéndose en el foco del programa de los factores de emisión de la EPA-, y darán la oportunidad de producir un cambio significativo en la forma de aproximación de los modelos de emisión.

2 LA CARACTERIZACIÓN DE VÍAS: UN NUEVO ENFOQUE DE MODELACIÓN

Cuando se requiere estimar la emisión total de una arteria, para un cierto contaminante dado, en un tramo determinado, ya sea por hora o por día, la ecuación que se utiliza normalmente es la siguiente:

$$E_t \text{ [g/h]} = e \cdot N \cdot l \quad (1)$$

donde E_t es la emisión total del tramo en g/h, e es el factor de emisión promedio de los vehículos en g / km , N es la densidad de tránsito (número de vehículos / hora) y l la longitud del tramo considerado en km.

El número N es función del tipo de arteria, de la hora del día y del día de la semana considerado y varía en gran medida con estos parámetros. El factor de emisión e es el parámetro fundamental en este tipo de estudio cuyo valor surge normalmente de las curvas de emitividad en función de la velocidad derivadas de los ciclos de ensayo dinamométricos, y que son aproximadas por una ecuación potencial de la velocidad. El factor e depende del tipo de combustible, de la tecnología automotriz común en la región, la antigüedad del parque automotor, el estado general del parque, la característica física de la calle y la imposición de tránsito así como de las características propias de manejo de la región.

A pesar de ello, se ha prestado poca atención a la cuantificación de la *variabilidad e incertidumbre* de los factores de emisión en las vías de circulación. La variabilidad es la diversidad de los valores de emisión presentados por los diferentes vehículos, por las diferencias de manejo, distintos grados de mantenimiento, distintos tipos de combustible y otros factores. La incertidumbre surge de la privación del conocimiento completo del verdadero valor de los factores de emisión tales como, la limitada disponibilidad de los datos, los errores de medición, la no representatividad de las mediciones con respecto a los valores de emisión de los trayectos reales, etc⁴.

Una gran parte de la incertidumbre que presentan las estimaciones de emisión de fuentes móviles viene compuesta por distintas falencias al obtener y aplicar los datos de los factores de emisión al modelo de tránsito, y que en síntesis son:

1. Los factores de emisión obtenidos en condiciones de laboratorio, basados en ciclos normalizados (lo que sería equivalente a trayectos muy particulares), no están al mismo nivel de jerarquía que los modelos de tránsito basados en segmentos o partes de vías de circulación.
2. Por otro lado, se aplica el mismo factor de emisión para la misma velocidad promedio a distintos segmentos aún cuando difieran en la imposición de tránsito.

El modelo que proponemos parte de un nuevo concepto cual es la caracterización de las vías de circulación en sí mismas a través de factores de emisión propios. Esto implica considerar no solamente al vehículo como responsable de la emisión, sino también, y sobre todo, a la propia vía de circulación. En este sentido no basta considerar un factor de emisión vehicular que multiplique al número medio de automotores circulantes (aún cuando la velocidad promedio dependa de este número), ya que así el tránsito sería caracterizado solamente en forma estacionaria; por el contrario la dinámica del proceso de tránsito influye fuertemente y depende principalmente de las condiciones reinantes y del tipo de manejo, todo lo cual puede ser atribuido a la misma vía de circulación como propiedad característica (ver tabla 1).

Propias del parque automotor	Puesta a punto del motor Temperatura del motor Estado del motor (tecnología y desgaste) y del automotor (estado general) Cilindrada Tipo de combustible Cantidad de pasajeros o peso transportado
Propias del ámbito	Condiciones ambientales (temperatura, presión atmosférica, humedad, lluvia, etc) Características físicas del camino (pendientes, curvas, rugosidad, estado, intersecciones, obstáculos, lomos de burro, etc.) Tipología urbana e imposición de tráfico (detenciones semafóricas, aceleraciones, períodos estacionarios, desaceleraciones etc.)
Propias del conductor	Particulares (características subjetivas propias de cada conductor) Comunes de la región (hábitos de manejo de la población en ese área)

Tabla 1: Clasificación propia de las causas de variación de las emisiones vehiculares

En efecto, si un automóvil recorre un trayecto en línea recta, sin pendiente y a una velocidad constante en marcha no forzada, sus emisiones serán bajas cualquiera sea la velocidad. Por el contrario, en una calle que presente elementos que traben la circulación (desregulación semafórica, baches, móviles estacionados en doble fila, etc.), es decir con mayor *imposición de tránsito*, el automotor presentará siempre mayores emisiones que la del recorrido indicado anteriormente. Ello viene justificado, desde el punto de vista mecánico, por las variaciones de la relación aire/combustible (relación lambda) y los distintos

rendimientos asociados. La cuestión reside en poder cuantificar estas variaciones de emisión con sus causas en trayectos reales, lo que justifica la introducción de un modelo basado en la caracterización de vías de circulación.

La formalización matemática de tal modelo puede realizarse a partir de la ecuación clásica de estimación de emisiones vista en la ec (1) y siguiente la ec. (2):

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_n + \mathbf{E}_g + \mathbf{E}_c + \mathbf{E}_d \quad (2)$$

donde se introducen componentes de emisión según la tecnología vehicular (los índices corresponden a los distintos combustibles y tecnologías, así n: nafta; g: GNC, c: catalizador y d: Diesel), que a su vez siguen también la forma de la ec. (1). En cada una de las componentes el factor de emisión e puede a su vez expresarse en función de factores que representan las causas de variación de las emisiones así como de una emisión básica de referencia para cada combustible y tecnología. De esta forma, la componente para nafteros quedaría:

$$\mathbf{E}_n = (f_{pn} \cdot f_{an} \cdot f_{cn}) \cdot (\text{emisión básica de referencia de nafteros}) \cdot N \cdot l \quad (3)$$

en la que f_{pn} es el factor parque, f_{an} es el factor ámbito y f_{cn} es el factor conductor, que se corresponden con la tabla 1. De forma similar pueden definirse las demás componentes.

En las respectivas emisiones básicas de referencia se consideran las emisiones promedio representativas del parque automotor, es decir las emisiones de un automóvil promedio o tipo. Si entre el grupo se toma un automóvil de referencia (auto patrón) todas las caracterizaciones de vías o tramos pueden referirse a mediciones sobre éste; como se verá, a fin de su apropiada intercalibración, tanto los automóviles del grupo como el auto patrón deben realizar un recorrido de referencia (normalizado) preferentemente de baja emisión (basal). Se puede definir así un factor F que indica la relación de emisiones del auto patrón con respecto al grupo:

$$F = e_{\text{grupo}} [\text{g/km}] / e_{\text{patrón}} [\text{g/km}] \quad (\text{para cada tipo de recorrido}) \quad (4)$$

Asumiendo que $f_{cn} \cong f_{cg} \cong f_{cc} \cong f_{cd} \cong f_c$ ya que es el mismo tipo de conductores (igualdad de factores de conducción), y también $f_{an} \cong f_{ag} \cong f_{ac} \cong f_{ad} \cong f_a$, suponiendo que el ámbito afecte en principio a todos por igual (igualdad de factores de ámbito), la ec. (1) puede explicitarse para un dado contaminante k como sigue:

$$\mathbf{E}_{tk} [\text{g/h}] = (f_a \cdot f_c) \cdot (F \cdot e_{\text{basal-patrón}})_k \cdot (\sum f_{pi} \cdot N_i) \cdot l \quad (5)$$

siendo N_i la composición relativa del parque automotor según los distintos combustibles o tecnologías. Así la ecuación (5) agrupa los distintos factores que modifican las emisiones con sus causas, en donde $(f_a \cdot f_c)$ representa la imposición que manifiesta el recorrido que se trate, esto es la calle propiamente dicha y el tipo de manejo, en tanto que $(F \cdot e_{\text{basal-patrón}})_k$ a las emisiones del auto tipo y la asociación $(\sum f_{pi} \cdot N_i)$ a los factores de modificación debidos a la composición del parque y la relación de emisiones de cada clase de combustible o tecnologías. Con el fin de transformar la ec. (5) en una ecuación práctica para el cálculo, puede definirse un factor E adimensional que representa la relación que existe entre las emisiones de cualquier recorrido real con respecto a las del recorrido basal:

$$E = e_{\text{recorrido}} / e_{\text{basal}} = (fa \cdot fc) \quad (6)$$

Definiendo ahora los factores auxiliares $C_i = e_i / e_n$ (la relación de los distintos factores de emisión promedio para cada combustible y tecnología) y $n_i = N_i / N$ (la proporción porcentual de cada tipo de vehículo en el parque automotor) se tiene:

$$E_{tk} \text{ [g/h]} = E \cdot (F \cdot e_k \cdot \sum C_{ik} \cdot n_i) \cdot N \cdot l \quad (7)$$

donde e_k representa ahora el factor de emisión basal [g/km] de un dado contaminante k del auto patrón naftero. Nótese que el paréntesis representa una emisión compuesta, quedando reconstituida así la ecuación clásica de emisión (1), a menos del factor E que representa precisamente *el factor de emisión de vía* estipulado.

Finalmente consideremos ahora en qué medida las suposiciones establecidas como *igualdad de factores de conducción e igualdad de factores de ámbito* pueden o no alterar la validez de la ec. (7) o al menos la interpretación relativamente directa que se hace de ella. En primera instancia, debe distinguirse entre los contaminantes k a las partículas carbonosas y metálicas emitidas, principalmente para el caso de los motores diesel, cuya formación obedece a mecanismos no comprendidos en la ecuación de combustión típica de los gases. Prescindiendo de esta especie particular, el resto de ellas, obedecen a mecanismos similares independientemente del tipo de motor considerado (al menos en aquellos que regularmente están en uso) y en consecuencia están comprendidas adecuadamente en la ec.(7).

No obstante, en tanto la respuesta dinámica del motor varíe frente a diversas solicitudes y además dependa del punto de ajuste de éste, tiende a producirse una interrelación del factor E de calle con el tránsito N , generándose así un modelo no lineal (y realimentado) que limita en parte la interpretación directa de dicha ecuación. Afortunadamente, los resultados en nuestro caso de estudio indican que tal interrelación es débil aún en condiciones de variaciones grandes de N (como en el caso de la misma vía considerada durante el día y durante la noche). Así, en recorridos por zona céntrica (que son los más comprometidos en este sentido), y a fin caracterizar la variación de la emisión total, puede aplicarse un coeficiente de modulación temporal MT al factor E - o eventualmente al factor de emisión e - que presentan los vehículos en horarios no pico. Lo anterior viene reforzado también por el hecho experimental que recorridos en rutas carreteras, corredores o calles de barrios no presentan prácticamente variación temporal de las emisiones vehiculares.

Esta interdependencia débil entre E y N (o en su caso entre e y N), puede ser comparada con la dependencia térmica de la movilidad de los portadores de un conductor eléctrico, de la que resulta en definitiva una dependencia de la resistividad de éstos con respecto a la intensidad de circulación de los portadores. Allí también el modelo de circulación es aplicable principalmente porque tal interrelación es débil y puede ser expresada mediante coeficientes térmicos bajos. De hecho la variación paramétrica de E (o e según se prefiera) puede interpretarse como una *variación con respecto a la temperatura estadística del sistema*, si se sigue un modelo cinético físico equivalente del tránsito.

Lo mismo podría decirse también de los factores F y C_i los que pueden presentar variación paramétrica con respecto al tipo de recorrido, en este caso dependiendo más del ajuste del automotor, la que también puede asignársele alternativamente al factor e . En estimaciones en

donde se requiera mayor precisión deben usarse los F y C que correspondan a ese tipo de área. No obstante, esta variación no es muy significativa para la mayoría de los estudios prácticos, y en virtud de simplificar las estimaciones puede utilizarse el valor promedio de los mismos.

De acuerdo al modelo planteado el procedimiento metodológico necesariamente debe considerar los siguientes pasos:

1. Tomar un lote de vehículos lo más representativo posible del parque automotor de la zona bajo caracterización.
2. Elegir entre los automóviles del grupo uno que representará al grupo (*auto patrón*), y que “carga” la información de todo el grupo. Este vehículo patrón es el que recorre las vías de circulación de la zona bajo estudio.
3. Establecer un recorrido de referencia (recorrido *basal*). Este debe transitarse con todos los vehículos del grupo.
4. Calcular las emisiones producidas en recorridos reales.
5. Establecer los factores de emisión de las calles recorridas (o segmentos de las mismas) con respecto al recorrido de referencia.

De esta manera puede estimarse la emisión de cada arteria aplicando la ecuación general (7). Es importante señalar que esta forma de cálculo es aplicable a un tramo o segmento del tamaño que se requiera, el cual dependerá de su localización espacial -como ser los alrededores de un colegio, hospital, zona bancaria, etc.- así como también del área representada, según sea la resolución espacial del modelo de emisión buscada; así, esta forma de caracterización parte desde el nivel mismo de microescala, compatibilizando en un único paso las variables espaciales de arteria (o segmento de la misma), de tránsito y de emisiones.

3 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN

Para la caracterización de las vías de circulación se implementó un sistema autotransportado de medición “ad hoc” con la capacidad de localizar y determinar en tiempo real, durante un ciclo de marcha habitual y corriente, la emisión de por lo menos Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarburos Totales (HC), por ser éstos dos de los contaminantes principales de un vehículo equipado con motor de combustión interna. El sistema quedó constituido con los siguientes componentes:

1. Analizador de cuatro gases: Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos Totales (HC), Oxígeno (O₂), Dióxido de carbono (CO₂), además determina la relación aire / combustible (relación Lambda) y las revoluciones por minuto del motor (rpm) (LH-5169)
2. Computadora personal portátil
3. Receptor de posicionamiento geográfico (GPS) con antena magnética exterior y conexión PCM – CIA
4. Módulo inversor de 12 V C.C. a 220 V C.A. como alimentador general
5. Programa informático desarrollado bajo Visual Basic para almacenamiento de datos de gases y tiempo de recorrido.

6. Programa informático diseñado bajo Visual Basic para almacenamiento de datos de coordenadas geográficas, altura s.n.m. y velocidad del móvil (parámetros del recorrido).
7. Programa informático auxiliar para asistir al conductor en ciclos I/M 240 en recorridos reales.
8. Programa informático desarrollado para el cálculo de los factores de emisión e indicadores.

Comparando el sistema autotransportado (SA) propio con los automóviles instrumentados utilizados en los trabajos más citados, tales como el ROVER, desarrollado en la Universidad de Pittsburgh¹¹ y el OEM- 2100 desarrollado por Clean Air Technologies International⁵, puede destacarse su pequeño volumen y costo relativamente bajo (aproximadamente U\$S 7000 en componentes) logrando niveles de prestación similares. Una ventaja importante del SA propio con relación al ROVER y al OEM 2100 es su independencia de dispositivos especiales para obtener la información de velocidad y las revoluciones (rpm) del motor, como es el caso de la computadora de diagnóstico del automóvil (OBD) incluida en los automotores modernos en los países desarrollados. Dicha dependencia -que limita considerablemente la posibilidad de medir vehículos de tecnología mas antigua, como los del parque automotor argentino- fue evitada con la combinación de informaciones de detección de chispa de encendido y del GPS, éste último además permitiendo una correcta localización geográfica de los datos.

A fin de verificar y ajustar el funcionamiento del SA se hicieron ensayos preliminares sobre trayectos pilotos y sobre distintos vehículos, todo lo cual permitió ganar la experiencia necesaria y asegurar el nivel de prestación requerido. El sistema funcionó satisfactoriamente, midiendo y registrando en tiempo real, durante un ciclo de marcha habitual y corriente, la emisión de Monóxido de Carbono; Dióxido de carbono, Oxígeno, Hidrocarburos totales, relación aire/combustible, altura y posición geográfica. La instalación en cualquier vehículo toma un tiempo aproximado de 20 minutos. Normalmente durante el ensayo viajan en el móvil dos personas, el conductor y el encargado de operar el sistema autotransportado. La antena magnética del GPS funcionó correctamente cuando fue ubicada en el plano exterior del techo del automóvil, pero en muchos casos ha dado también buen resultado cuando fue colocada interiormente bajo la luneta trasera o bajo el parabrisas.

3.1 Selección de elementos metodológicos

Los restantes componentes metodológicos quedaron definidos de la siguiente manera:

Grupo de vehículos: De un total de trece automóviles ensayados, nueve fueron seleccionados a fin de realizar por un lado la contrastación del sistema autotransportado y por otro la caracterización misma de vías de circulación. Este número aunque pequeño -debido a la imposibilidad física y temporal de tomar un número mayor-, es representativo del parque automotor de Mendoza, aún de las proporciones según tipo y estado (tanto para vehículos alimentados a Nafta como GNC); no obstante hay que indicar aquí que el objeto principal de este estudio ha sido desarrollar una metodología adecuada. La totalidad de los automotores fueron alimentados con nafta de 95 y 97 octanos y seis de ellos utilizando a su vez gas natural comprimido (GNC). Se dividió el conjunto, o grupo de muestra, en tres subgrupos de motores con cilindradas crecientes. Las alimentaciones de los vehículos ensayados fueron por

carburador y por inyección electrónica directa monopunto y multipunto, con kilometrajes que van desde los 75.000 kilómetros a 180.000 kilómetros (todos sin catalizador aunque también se han ensayado vehículos con catalizador). Todos los automóviles fueron puestos bajo prueba, realizando distintos recorridos reales en el Gran Mendoza, lo que permitió obtener datos de vías e intercalibrar el conjunto con el auto patrón elegido (Alfa Romeo 164 TS) de forma de continuar el relevamiento en otras vías con un único vehículo (tabla 2).

Subgrupo	Nº Automóvil	Automóvil	Cilindrada (litros)	Alimentación
1	1	FIAT 147	1.3	Carburador
	2	FIAT VIVACE	1.3	Carburador
	3	FORD FIESTA	1.3	Inyección monopunto
2	4	RENAULT 9 (1)	1.6	Carburador
	5	RENAULT 9 (2)	1.6	Carburador
	6	FIAT UNO	1.6	Carburador
3	7	ALFA ROMEO 164	2.0	Inyección multipunto
	8	RENAULT 21 NEVADA	2.0	Carburador
	9	FORD F150	3.6	Carburador

Tabla 2: Grupo de muestra

Recorrido Basal: La idea ha sido la adopción de un recorrido referencial, que proporcione una base de comparación, con el fin de aplicarla a posteriori a cualquier trayecto real, llamándose consecuentemente “basales” a las emisiones que surgen del mismo. Estas emisiones son las mínimas esperables, y si bien, se pueden reproducir y registrar con facilidad, representan condiciones ideales, que muy rara vez se dan en funcionamiento normal. El recorrido debe ser realizado a velocidad constante, en línea recta, con pendiente nula, marcha (cambio de la caja de transmisión) lo más alta posible y temperatura normal del motor en fase caliente de régimen. Se adoptó como Basal la arteria lateral norte del carril Paso, entre acceso Sur y Maza (Maipú), por cumplir satisfactoriamente las condiciones aludidas más arriba. La elección de una velocidad constante, tomada como basal, es un punto importante en ese estudio, y debe ser tenida en cuenta al momento de establecer una referencia de comparación en las mediciones de ciclos reales. Una velocidad de 40 km/h es una buena opción porque representa la más beneficiosa para trasladarse de un punto a otro dentro de la ciudad, en términos de seguridad, mínima emisión, mínimo consumo de combustible y mínimo tiempo. No está de más aclarar que esta velocidad es puramente ideal en la realidad del tránsito urbano, pero a su vez perfectamente factible de llevar a cabo en los ensayos. Por otro lado, dado que utilizando distintas marchas del móvil se verifican diferencias en los factores de emisión, se optó por normalizar además la relación de marcha de este tipo de recorrido, adoptándose la cuarta velocidad en automóviles con cinco velocidades y la tercera velocidad en vehículos con solamente cuatro cambios. Hay automóviles que a 40 km/h no soportan bien la cuarta marcha, por los que en estos casos es necesario ejecutar el trayecto en la marcha inmediata inferior.

Recorridos piloto: Para recaudar información estadística suficiente se seleccionaron trayectos pilotos, incluyendo circuitos en corredores, circuitos de vías terciarias (barrios) y un circuitos céntricos de gran emisión. Los automóviles nafteros se ensayaron con la misma nafta utilizada por sus propietarios (los que funcionaban con nafta y gas natural comprimido GNC se

ensayaron con nafta y GNC). El vehículo patrón recorrió los circuitos aludidos varias veces cada uno y otros recorridos adicionales a fin de comparar y enriquecen el conocimiento de las vías de circulación más representativas. El número de recorridos realizados con todos los autos y el patrón es aproximadamente cien, descontando alrededor de veinte recorridos preliminares en algunos automóviles, realizados para la prueba y puesta a punto del sistema autotransportado. Los trayectos se llevaron a cabo teniendo también en cuenta las condiciones atmosféricas reinantes (temperatura y presión).

3.2 Contratación del sistema de medición autotransportado

Aunque la sola elección del recorrido basal ya constituye una calibración relativa del método, un elemento importante de validación absoluta de las mediciones obtenidas la representa el *test de contrastación* del SA contra estadísticas de emisión típicas y sobre ciclos de marcha normalizados en banco dinamométricos. Ello facilita la comparación de valores de emisión propios con los obtenidos en otros trabajos y con otras metodologías.

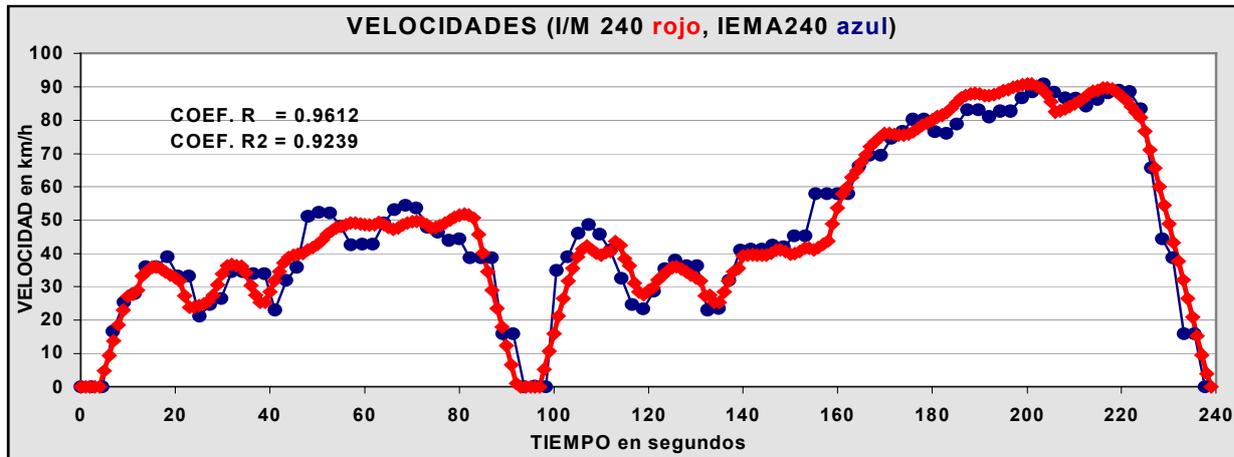
Como ha sido apuntado, se tomó una colección de vehículos comunes del parque automotor, los cuales, en ensayos repetidos sobre el recorrido basal común, verificaron como es natural, resultados distintos según la unidad, pero coherentes internamente. Esto permitió como primera medida la intercalibración de las emisiones de los autos entre sí, incluido el vehículo patrón (tabla superior en la fig. 1).

A su vez para la contrastación externa del SA se utilizó información estadística del Laboratorio de Control de Emisiones Gaseosas Vehiculares (LCEGV), que funciona en dependencias del Instituto Nacional del Agua y Ambiente en Buenos Aires. El test consistió en un procedimiento de tres etapas independientes entre sí:

1. Se desarrolló *en ruta* el ciclo I/M 240 (ciclo de Inspección y Mantenimiento de EE.UU de 240 segundos de duración) denominado aquí IEMA240 con un automóvil del grupo previamente intercalibrado (Renault 21). Para la reproducción del ciclo I/M240 se utilizó un software de apoyo especialmente desarrollado para asistir al conductor en la variación de velocidades y marchas, lográndose así una réplica muy ajustada (gráfico central en la fig. 1). Las emisiones totales de CO y HC caen dentro de la colección de datos del referido ciclo, medidos sobre un automóvil de 2.3 litros (en 30 ensayos), es decir dentro de la banda de valores que dieron los ciclos I/M 240 del LCEGV, validando así los resultados obtenidos con el SA propio (tabla inferior en la fig.1)
2. Se sintetizó un ciclo I/M 240 *virtual* con los datos de todos los recorridos del auto patrón, dando como resultado valores del mismo orden (considerando la dispersión producida por ser diferentes automóviles) y convalidando así las mediciones de forma distinta (tabla inferior en la fig. 1)
3. Por último se analizaron los datos del grupo en función de la cilindrada (se pueden reducir a un auto virtual con cilindrada media de 1.8 l), y éstos a su vez comparados con los datos los provistos por el LCEGV, demostrando también que el auto LCEGV cae dentro de la franja de dispersión del grupo.

Lo anterior no sólo convalida las mediciones de SA, sino que también lo hace con la intercalibración basal, mediante la cual es posible realizar y medir, dentro de la propia franja de dispersión de grupo, todos los recorridos con cualquiera de los autos constituyentes, en particular con el auto patrón, y asimismo comparar todos los recorridos reales con el recorrido basal.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
CIL	AUTOMÓVIL	T rec	Vpro	Drec	RPM	MAR	M CO	M HC		e total /CIL		desv. auto	prom.	
										media	20.44	0.91	27.28	0.52
										desv.	15.06	0.288	74%	32%
										CO	HC	eCOg/km	eHCg/km	
1.81	auto promedio									e / cil		37.01	1.64	
1.3	FIAT 147	1.75	41.53	1.21	1619	4	54.77	1.95		34.78	1.24	45.22	1.61	
1.3	VIVACE	1.12	40.79	0.76	1600	4	23.19	0.85		23.49	0.87	30.54	1.13	
1.3	FIESTA	1.72	41.05	1.17	1593	4	8.31	1.01		5.51	0.66	7.16	0.86	
1.6	REN9 1	1.83	42.60	1.30	1370	4	5.97	1.66		3.28	0.91	5.24	1.46	
1.6	REN9 2	1.63	40.37	1.10	1566	4	59.71	2.67		33.96	1.52	54.34	2.43	
1.6	UNO	2.57	40.90	1.75	1658	4	128.17	2.06		45.78	0.73	73.25	1.18	
2.0	ALFA (patrón)	2.87	42.23	2.02	1364	4	61.46	2.89		15.23	0.72	30.46	1.43	
2.0	RENAULT 21	3.67	35.81	2.19	1407	4	69.65	3.11		15.92	0.71	31.83	1.42	
3.6	F150	2.03	39.69	1.35	1685	3	28.88	3.92		5.96	0.81	21.47	2.91	



PARAMETRO	AUTOMÓVIL		
CO g/km	LCEGVINA	Renault 21	Alfa Romeo (patrón)
Promedio	50.92	59.74	68.20
Promedio - desviación	43.47	---	33.39
Promedio + desviación	58.36	--	103.00
HC g/km	LCEGVINA	Renault 21	Alfa Romeo (patrón)
Promedio	3.61	3.60	2.30
Promedio - desviación	2.38	--	1.36
Promedio + desviación	4.84	--	3.24

Fig. 1: Algunos resultados de la calibración del Sistema Autotransportado

4 ALGUNOS RESULTADOS DEMOSTRATIVOS

Los valores de emisión de recorridos de distinta categoría se obtuvieron de un estudio comparativo tomando trayectos de imposición intermedia y máxima de tránsito, algunos de los cuales fueron desarrollados por la totalidad del grupo de automóviles y otros sólo por el auto patrón. Los recorridos de la totalidad del grupo abarcaron, en horarios de pico diurno (mediodía), tanto calles terciarias (imposición intermedia) como céntricas (imposición máxima). Las calles terciarias se ubicaron en la zona denominada Quinta Sección de la ciudad. La emisión de estos trayectos es prácticamente igual a la medida en barrios de Godoy Cruz y otras zonas residenciales típicas. El circuito céntrico se desarrolló por Av. San Martín hacia el norte, partiendo de calle Infanta Mercedes de San Martín hasta calle Entre Ríos, transitando una distancia aproximada de 1.2 km.

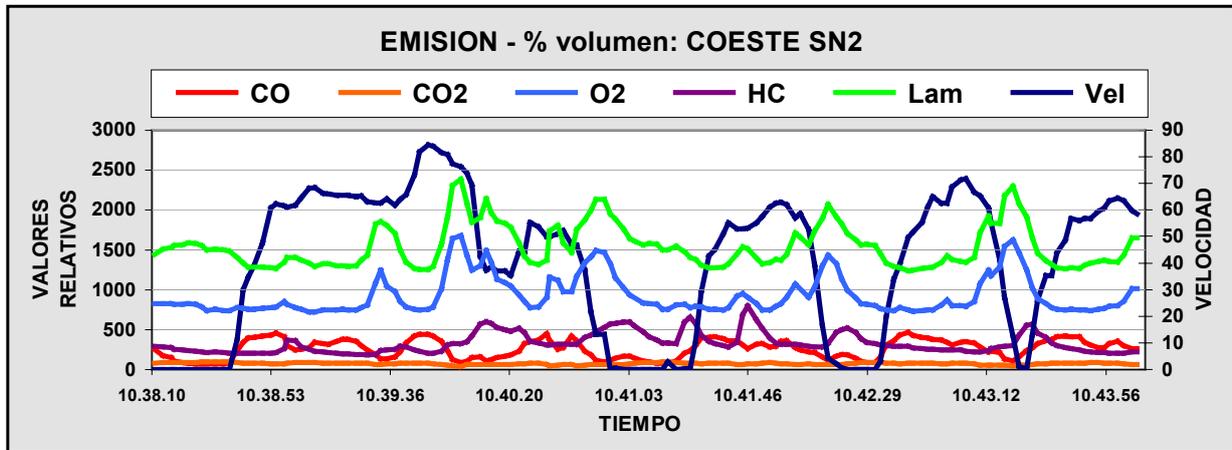
El auto patrón recorrió varias veces los circuitos a cuatro horarios diferentes para conocer la variación temporal de la tasa de emisión. Los trayectos adicionales desarrollados por el auto patrón, fueron los siguientes: a) *en rutas y corredores*: Acceso Sur, Ruta 60, Corredor del Oeste, Panamericana, Av. Libertador, Corredor Paso; b) *terciarias residenciales*: calles de barrios en Godoy Cruz y en Quinta Sección-ciudad; c) *primarias y céntricas*: Calle Perito Moreno (Godoy Cruz), calle Rioja, Av. Vicente Zapata, Av. Colón y Av. Arístides Villanueva.

4.1 Comprobación de algunos factores que causan la variación de las emisiones

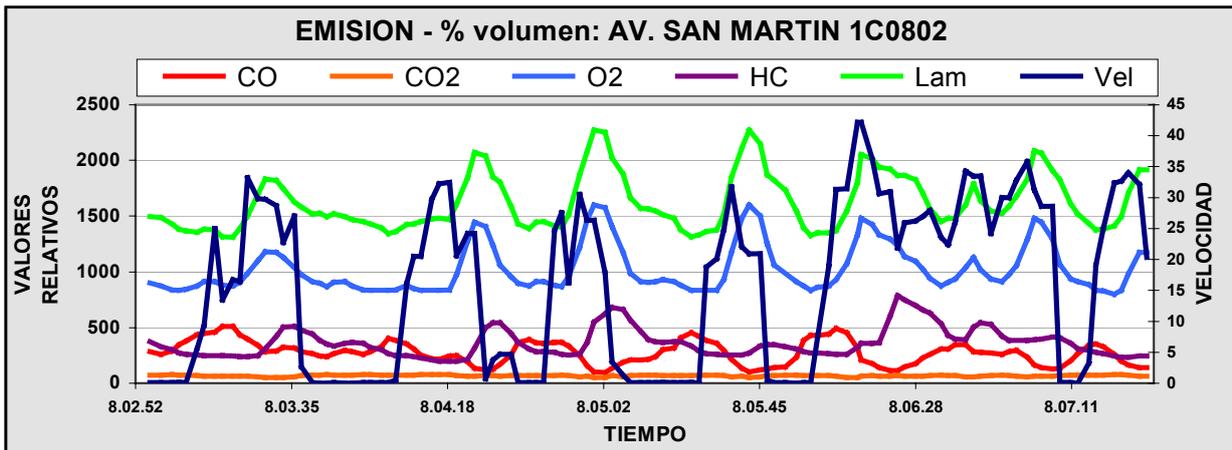
Algunas mediciones que se muestran a continuación, permiten apreciar la cantidad de información que puede obtenerse con el sistema autotransportado, como también la utilidad del factor E , y cómo éste varía en función de los recorridos y sus características.

Modificación de las emisiones por la pendiente del recorrido: Para estudiar las variaciones de las emisiones en función de la pendiente del recorrido (subidas y bajadas), se tomó un trayecto de Av. Libertador, entre el monumento Caballitos de Marly y el Zoológico, en parque General San Martín. Se realizaron cuatro viajes, dos de subida y dos de bajada. La pendiente del trayecto es de 3.82 %. Durante la subida se registraron factores de emisiones mayores que la basal con la correspondiente disminución de λ : el CO aumentó 2.48 veces (148 %), los HC aumentaron 1.33 veces (el 33%) y el λ bajó al valor 0.86 (se redujo 14 %). Durante la bajada el CO disminuyó a 0.60 (se redujo un 40 %) y el λ aumentó el 18 %; contrariamente los HC aumentaron un 143 %, aumento que puede ser explicado por la denominada *falla de encendido* (en estos casos la mezcla es tan pobre que la combustión no siempre se mantiene por la chispa de encendido¹² y que se corresponde con la disminución del CO₂ (29 %) y el aumento del O₂ (55%). Esto justifica porqué el recorrido basal debe tener pendiente nula).

Modificación de las emisiones en calles que poseen elementos limitadores de velocidad: Aunque se ha hablado bastante en congresos y talleres de medio ambiente sobre el aumento de emisión que los baches o “lomos de burro” provocan, no se conocen estudios detallados que hubiesen cuantificado este aumento. Utilizando el sistema propuesto en este trabajo y realizando el análisis de los factores se puede estimar la influencia de estos elementos. Con este fin, se tomó un tramo de vía terciaria dentro de un barrio típico de una longitud de 2.42



Velocidad prom. km/h	40.39	Gases	CO	CO2	O2	HC	LAMBDA P.
Distancia recorr. Km	3.99	Factor de emisión en g/km	57.85	228.72	208.79	2.87	1.54
Tiempo total recorr. min.	5.933333	e basal	30.46	164.78	148.52	1.43	1.58
Volumen total litros	7185.23	e recorrido/ e basal	1.90	1.39	1.41	2.01	0.98



Velocidad prom. km/h	15.91	Gases	CO	CO2	O2	HC	LAMBDA P.
Distancia recorr. Km	1.22	Factor de emisión en g/km	133.47	509.01	600.47	7.87	1.62
Tiempo total recorr. min.	4.6	e basal	30.46	164.78	148.52	1.43	1.58
Volumen total litros	5301.72	e recorrido/ e basal	4.38	3.09	4.04	5.50	1.03

Fig 2: Ejemplo de variación de emisiones por diferente jerarquía vial. Arriba se muestra el registro de datos y tabla de valores correspondiente a un trayecto en el Corredor del Oeste. Abajo se observa similar información para un trayecto en Av. San Martín.

kilómetros. Se produjeron detenciones a razón de una por cuadra simulando baches (las detenciones se contabilizaron a partir de velocidades menores a 5 km/h) y se compararon las mediciones resultantes con las obtenidas en recorridos idénticos en condiciones de circulación normal, es decir sin ninguna limitación más que la natural impuesta por el tránsito y las bocacalles. El resultado del análisis indica que cuando por cuadra se produce una restricción de velocidad impuesta por un bache o lomo de burro, las emisiones de CO aumentan un valor

promedio de 3.26 veces y los HC aumentan 1.85 veces. Este aumento de los factores de emisión puede ser importante en calles de mucho tránsito.

Cambio de emisiones debido a vías de circulación de diferente jerarquía: De casi cien recorridos desarrollados en diferentes zonas del Gran Mendoza, se seleccionaron dos para mostrar las características más representativas. La fig. 2 (arriba) muestra los registros de datos, los parámetros promedios y los factores de emisión de un recorrido por un corredor urbano (Corredor del Oeste). Representa una vía de circulación primaria, interdepartamental o interzonal) semaforizada y de doble carril⁹ con velocidad promedio de 43 km/h, y velocidades máximas del orden de 80 km/h. El monóxido de carbono aumenta 1,9 veces y los hidrocarburos totales a 2,01 veces, con lambda decayendo un 2%. Todo lo anterior indica que el trayecto impone factores de emisión mayores que la basal debido a una imposición de tránsito mayor. En este sentido, puede apreciarse claramente la variación producida por la regulación semafórica del corredor. La fig. 2 (abajo) muestra una circulación por una avenida céntrica de alta congestión (Av. San Martín, entre calles I.M de San Martín y Entre Ríos) que corresponde a la hora pico matutina. Se observa un incremento en las emisiones de monóxido de carbono de 4,38 veces y de 5,49 veces en los hidrocarburos totales. La comparación demuestra cuántas veces es más contaminante un recorrido por una avenida céntrica con respecto a un corredor urbano, y ambos con respecto a la basal. Similares datos pueden observarse en circulación por calles de barrio, con aumentos del monóxido de carbono a 2,5 veces y 3,12 veces para hidrocarburos. Estos valores se sitúan entre los mostrados anteriormente.

4.2 Otros resultados relativos a la caracterización de vías

En la tabla 3, se muestran los resultados promedios de los trayectos terciarios (barrios) y céntricos al medio día que se obtuvieron con la totalidad del grupo de muestra, alimentado con combustible súper 95 octanos; ésta manifiesta como se incrementa el factor de emisión normalizado E, a medida que se incrementa la imposición de tránsito.

P		eCO	eHC	ECO	EHC
VIVACE BARRIO					
FIESTA BARRIO	prom	86.45	7.46	2.60	4.65
REN9 1 BARRIO	desv est	57.51	4.03		
REN9 2 BARRIO	desv est %	67%	54%		
UNO BARRIO	F: prom/patrón	1.15	1.14		
ALFA BARRIO PROM	V.prom.	24.29			
REN 21 BARRIO	V. Desv. estándar	3.55			
F150 BARRIO	V. Desv estándar %	15%			
Flat147 SAN MARTÍN		promedios de SM		E norm.	
VIVACE SM					
FIESTA SM	prom	156.36	11.89	4.70	7.42
REN9 1 SM	desv est	87.61	6.19		
REN9 2 SM	desv est %	56%	52%		
UNO SM	F: prom/patrón	1.17	1.26		
ALFA SM	V.prom.	10.14			
REN 21 SM	V. Desv. estándar	2.26			
F150 SM	V. Desv estándar %	22%			

Tabla 3: Algunos resultados medios de trayectos de media (amarillo) y alta imposición (rojo) de tránsito

Los recorridos terciarios muestran en promedio una velocidad de 24 km/h y emisiones 2.60 veces mayor que la basal para el CO (factor de emisión E_{CO}) y 4.65 veces mayor para los HC

(factor de emisión E_{HC}). Los recorridos por Av. San Martín muestran una velocidad promedio de alrededor de 10 km/h, un E_{CO} de 4.70 y un E_{HC} de 7.42.

La tabla 3 muestra también como varía el factor F promedio (relación del promedio de emisiones del grupo al auto patrón) el que aumenta a medida que crece la imposición de tránsito, es decir el grupo presenta mayor dispersión en sus emisiones a medida que el tránsito se vuelve más complejo; no obstante cabe destacar que el aumento no es significativo en ninguno de los dos componentes de contaminación.

HORAS PICO	eCOg/km	eHCg/km	E CO	EHC
COLON	100.11	7.16	3.29	5.00
RIOJA	104.49	8.03	3.43	5.61
SAN MARTÍN	133.69	9.43	4.39	6.59
HORAS NO PICO	eCOg/km	eHCg/km	E CO	EHC
COLON	82.94	5.65	2.72	3.94
RIOJA	84.12	5.82	2.76	4.07
SAN MARTÍN	98.06	7.16	3.22	5.00

	MT CO	MT HC
COLON	0.83	0.79
RIOJA	0.81	0.72
SAN MARTÍN	0.73	0.76
Promedios	0.79	0.76

Tabla 4: Dependencia temporal de las emisiones en calles céntricas

En tabla 4 se observan los resultados de emisión en calles céntricas en dos horarios diferentes y el comportamiento del factor MT de modulación temporal. Debido al horario comercial, laboral y educativo existen en Mendoza tres horarios pico, uno por la mañana (07:30 a 08:30 hs.), otro al medio día (12:00 a 13:30 hs.) y otro en las últimas horas de la tarde (19:30 a 21:00 hs.). La variación de los factores de emisión entre el pico diurno de mediodía a un horario nocturno de bajo tránsito (alrededor de las 23:00 hs) resulta en coeficientes MT del orden de 0,8 en ambos contaminantes. Esta variación se evidencia casi exclusivamente en zona céntrica o en lugares puntuales de congestión (zonas que rodean colegios, bancos, comercios, oficinas, etc.). En cambio, en calles terciarias los factores de emisión no difieren en distintos horarios, ya que no alcanza a producirse congestión vehicular.

Para establecer las relaciones de emisiones entre Nafta y GNC (factores Ci) se seleccionó del grupo de automóviles los que funcionaban indistintamente con estos dos combustibles. Estos vehículos desarrollaron los mismos trayectos anteriores pero en este caso alimentados a GNC. El índice comparativo entre emisiones surge dividiendo el factor promedio del grupo GNC para cada tipo de recorrido, por el factor de emisión promedio de cada recorrido del grupo alimentado con Nafta. Este demuestra que con el uso de GNC se reducen las emisiones de CO aproximadamente el 90 % y las de HC aproximadamente el 60% con respecto al uso de Nafta. La reducción de estos dos contaminantes es del mismo orden que la que se midió en el Laboratorio de Control de Emisiones Vehiculares. Mientras que el LCEGV realizó el estudio con un solo vehículo en el ciclo I/M 240, en este trabajo, el estudio se desarrolló con seis automotores de distinta cilindrada y estado, y lo que es más importante transitando recorridos reales por zona urbana.

De la misma forma se analizó la relación de emisiones entre un vehículo con catalizador (Ford KA) y las del grupo de muestra sin catalizador. La reducción de emisiones obtenida en CO están dentro del 96 % al 98 % y las obtenidas en los HC dentro del 90 % al 95 %, y son similares a los obtenidos por LCEGV sobre un vehículo de 1.6 litros de cilindrada catalítico, contra un vehículo de 2.3 litros de cilindrada no catalítico.

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Ya se ha indicado que la estimación clásica se basa en determinar el factor de emisión e [g/km] en función de una ecuación potencial del tipo $e = A \cdot V^{-B}$ (A y B son constantes que dependen del contaminante y V es la velocidad media del recorrido). En realidad esta función representa la curva de regresión (mínimos cuadrados) de los valores de emisión en función de la velocidad desarrollada en algún ciclo normalizado (FTP, I/M 240, EUDC, etc) medidos sobre un lote de automóviles. Los factores se obtienen de inventarios, entre los que figuran los del Programa de Coordinación de la Información de Medio Ambiente-Aire (CORINAIR), dependiente de la Agencia Medioambiental Europea (EEA) sobre un ciclo normalizado como el EUDC, similar al I/M 240 estadounidense, y que representa al promedio de Europa de los automóviles “viejas tecnologías sin catalizador”, comparables a los que en su mayoría circulan por Argentina.

Si se grafican los datos promedio, obtenidos del grupo de muestra, en las distintas vías de circulación en Mendoza, se observan grandes diferencias con respecto a los factores de emisión de la curva del CORINAIR (línea negra continua) mostradas en la fig. 3 (gráfico CO arriba y gráfico HC abajo). Para una velocidad promedio de Av. San Martín de 10 km/h corresponde en la curva CORINAIR una emisión de CO de 63.3 g/km, mientras que el grupo muestra una emisión de 156.4 g/km, es decir más del doble de la estimación CORINAIR. Similar situación ocurre con los HC que arrojan 6 g/km contra 12 g/km respectivamente. También aparecen diferencias apreciables para los otros recorridos mostrados en ambos gráficos. Éstas no son atribuibles a factores de dispersión varios sino a verdaderas diferencias entre los tipos de recorridos; en efecto, dejando de lado la curva CORINAIR, y comparando, por ejemplo, las calles de barrios con las avenidas se ve que para velocidades similares (barrios 24 km/h, avenidas 26 km/h), se dan emisiones muy distintas. En cambio, cuando se comparan los valores promedio de las curvas CORINAIR con los valores de emisión del ciclo IEMA 240 (Renault 21) con aproximadamente 47 km/h, puede apreciarse que éstos están muy cerca entre sí, es decir que las mediciones realizadas con el sistema autotransportado están dentro del rango de variabilidad de las realizadas por CORINAIR.

Si se reúnen recorridos similares, las diferencias apuntadas se manifiestan más notablemente; por ejemplo tomando los recorridos céntricos, éstos se pueden asociar a una sola curva como la mostrada en línea roja continua con un $R^2 = 0.9838$ (CO) o la mostrada en con línea violeta continua (HC) con un $R^2 = 0.9732$. Las mismas podrían servir para establecer el valor de emisión de otra calle céntrica conociendo solamente su velocidad promedio, pero no más allá de 25 km/h, debido a que rara vez se presentarán velocidades promedio mayores en este tipo de trayecto. Lo mismo podría hacerse con los corredores de acceso (curva naranja discontinua en CO y violeta discontinua en HC), válidas para velocidades promedio mayores a 40 km/h, o con los barrios, aunque para simplificar éstos se han sintetizado en un único valor promedio de emisiones.

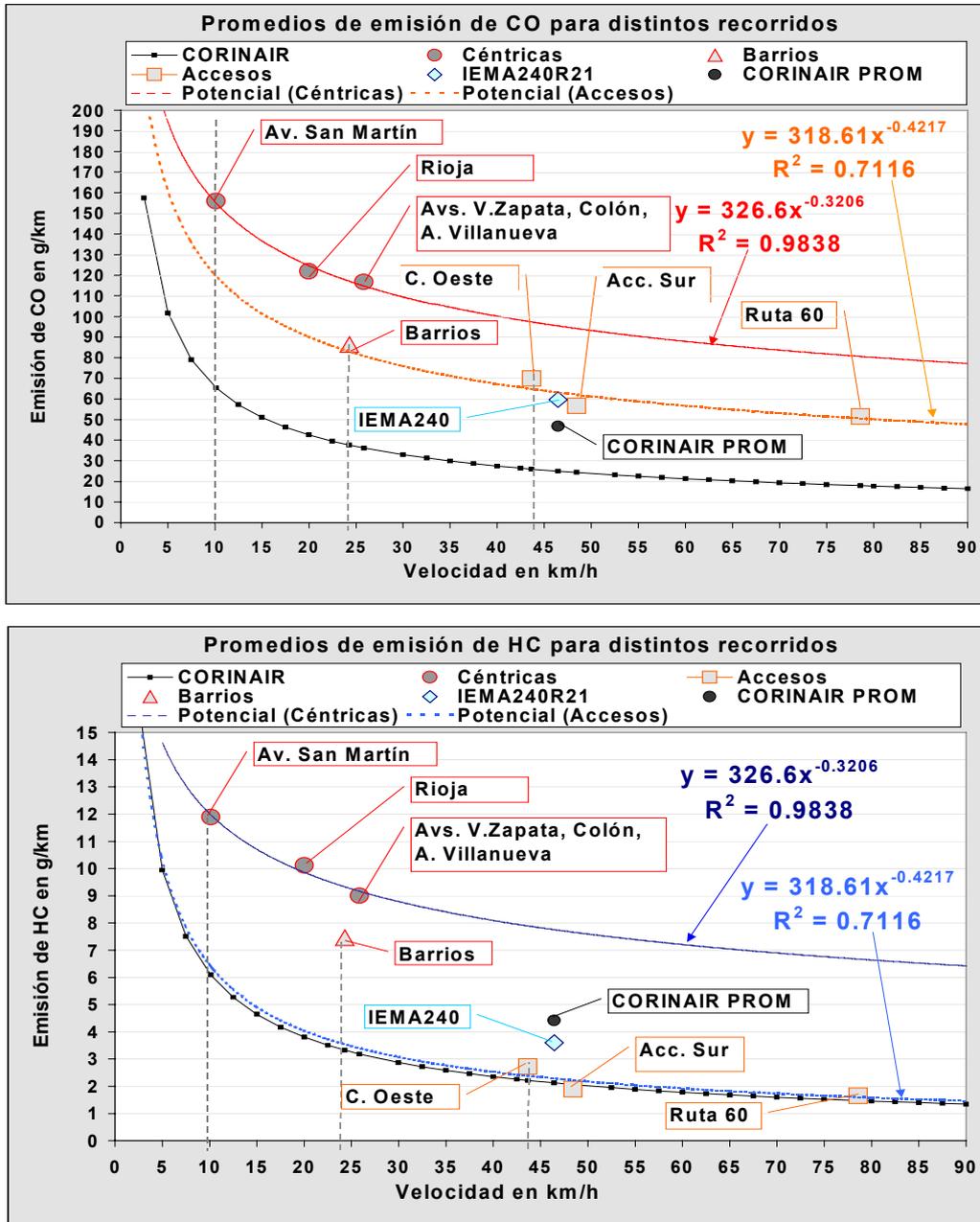


Fig. 3- Comparación de resultados promedio con curvas CORINAIR

5.1 Análisis y justificación de diferencias mediante la distribución de velocidades

En la fig. 4 se muestran las distribuciones de velocidades de los recorridos más representativos, los que poseen dos modos bien marcados: uno que comprende las frecuencias normalizadas de ocurrencia de paradas y arranques (*stop and go*) (definidas aquí con velocidades menores a 5 km/h) y otro que comprende a las *marchas* (velocidades mayores a 5

km/h). Por ejemplo, en las avenidas céntricas las *detenciones - arranques* representan aproximadamente el 50 % de la probabilidad de ocurrencia, mientras que el resto se distribuye en las velocidades desarrolladas en el modo *marcha*. Las calles de barrios presentan una distribución parecida, pero las relaciones entre los valores de frecuencia de las *detenciones - arranques* y *marchas* son distintas (27 % de *stop and go*) lo que justifica una emisión totalmente diferente; lo mismo puede decirse para corredores. A los efectos de comparar recorridos reales con ciclos de ensayo en laboratorio se ha graficado también la distribución de velocidades del ciclo I/M 240 sobre rodillos; puede verse que la distribución del ciclo es muy distinta a las distribuciones reales de calles (es más plana y ancha), lo que explica la divergencia de las emisiones estimadas por éste método con las medidas.

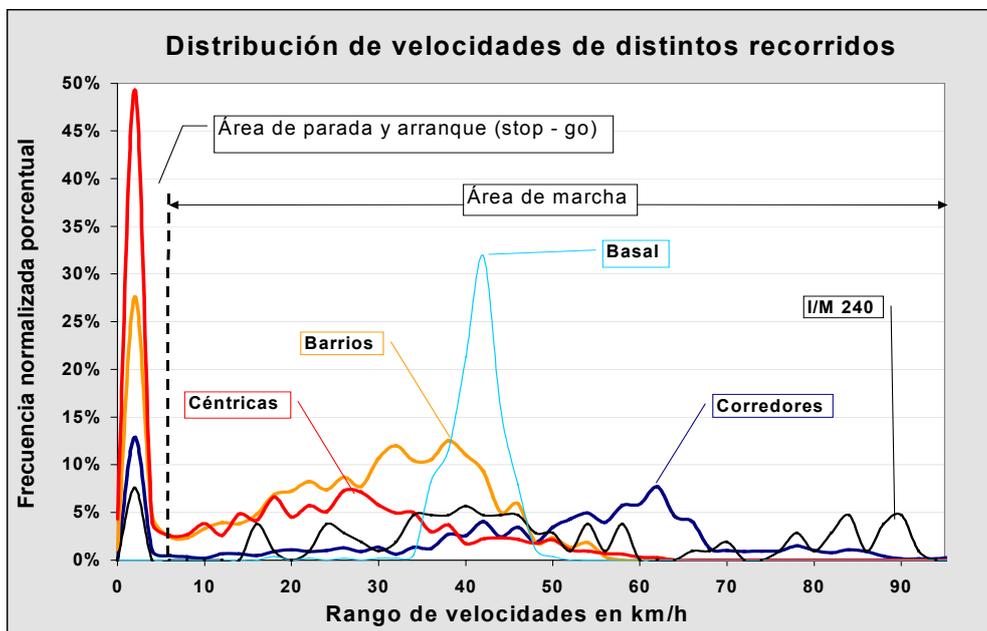


Fig. 4: Distribución de velocidades de distintos tipos de recorridos

Para encontrar una ecuación que tenga en cuenta el fenómeno físico de la variabilidad de las emisiones vehiculares debido a la circulación en distintos tipos de calles, se debe tener en cuenta la relación entre las áreas de *paradas - arranques* y *marcha* para un mismo recorrido. El área total de la distribución, que representa la probabilidad de ocurrencia de las velocidades y que debe ser igualada a 1, puede considerarse como una suma de probabilidades parciales, es decir como la suma de las áreas de paradas-arranques y de marcha:

$$A_t = A_{pa} + A_m = \int_0^{\infty} p(v)dv = \int_0^c p(v)dv + \int_c^{\infty} p(v)dv = 1 \quad (8)$$

en donde: A_t es el área total, A_{pa} el área de parada y arranque, A_m el área de marcha, $p(v)$ la densidad de probabilidad de ocurrencia y vc la velocidad de corte del área de paradas-arranque (aproximadamente 5 km/h). Dividiendo la (8) por A_m :

$$\frac{1}{A_m} = \left(1 + \frac{A_{pa}}{A_m} \right) = \frac{e_r(g/s)}{e_b(g/s)} \quad (9)$$

se obtiene un factor que varía entre un mínimo de 1 (cuando el área de parada es cero, como en la basal) y un valor arbitrariamente alto; evidentemente este factor *es representativo de la propia definición de la emitividad de un recorrido*, concepto que se ha venido sosteniendo hasta el momento, en este caso dado por una relación expresada en [g/s] (ya que no se tienen en cuenta longitudes de recorrido), donde e_r y e_b son los factores de emisión de dicho recorrido y del recorrido basal respectivamente. Convirtiendo $e_r[g/km] = e_r [g/seg]/v_r$ y asimismo $e_b[g/km] = e_b[g/seg]/v_b$, en donde v_r es la velocidad media del recorrido y v_b es la velocidad media basal, el factor de emisión de calle queda de la siguiente forma:

$$E = \frac{e_r(g/km)}{e_b(g/km)} = \left(1 + \frac{A_{pa}}{A_m} \right) \cdot \frac{v_b}{v_r} \quad (10)$$

ecuación que no sólo define el factor E sino que también constituye el *principio de categorización de las vías de circulación*.

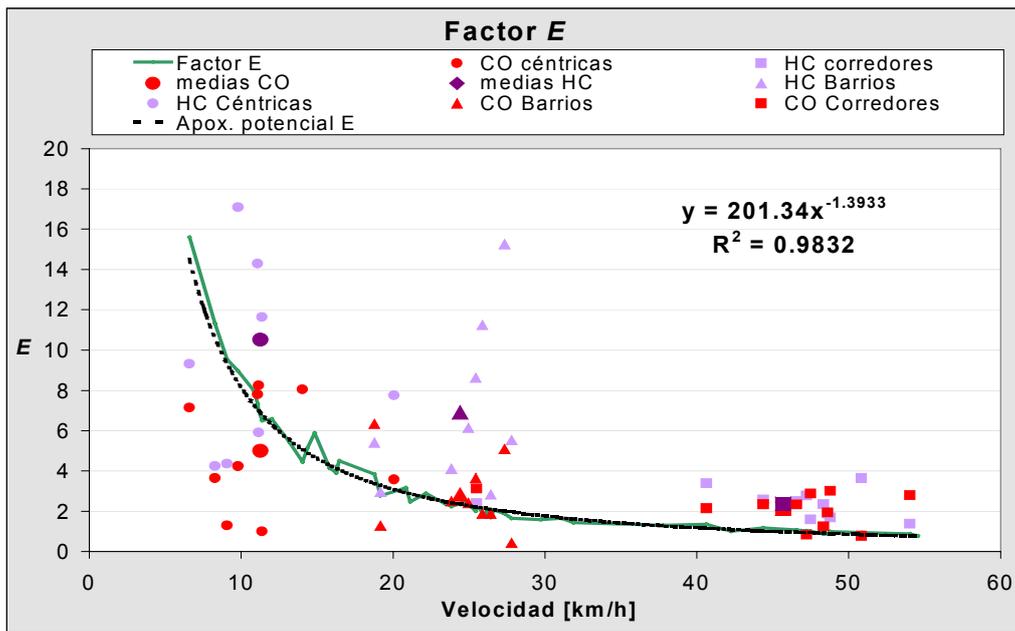


Fig.5- Correlación entre mediciones de CO y HC en distintos recorridos con la ecuación de definición del factor E a partir de la distribución de velocidades

En la fig. 5 se han volcado los datos de CO y HC (y promedios) de 50 recorridos realizados por los distintos vehículos del grupo de muestra, incluyendo céntricos, barrios y corredores; además se ha graficado la ec. (10) (calculada con las distribuciones de velocidad para cada recorrido), así como una aproximación potencial de ésta. Puede verse cómo la ec (10) explica por sí misma gran parte del fenómeno de distribución desigual de emisiones en función de la velocidad (variabilidad), y cuya aproximación potencial es $E = 201,34 V^{-1,3933}$ (con un

$R^2=0,9832$), es decir con un exponente que *más que duplica* el de la curva CORINAIR. Así el *factor E es representativo de la característica vial* (en tanto tomada como precursora de la emisión), tal como se describe en la ecuación (10). Aún más, esta ecuación podría tomarse como una *mejor aproximación* a las emisiones normalizadas de un trayecto que la que ofrece la del CORINAIR, cualquiera sea su ubicación o tipología.

La aproximación potencial de E representa mejor las emisiones medias de CO, y en menor medida las de HC (a través de un factor prácticamente constante para velocidades inferiores a 40 km/h). Hay que tener en cuenta aquí que éstos dos gases no reaccionan de igual manera ante los cambios de Lambda durante las distintas exigencias impuestas por los recorridos urbanos (sobre todo en el caso de motores que no poseen regulación electrónica del Lambda), de modo que durante gran parte del tiempo en las explosiones del motor no se cumple la ecuación estequiométrica de combustión y consecuentemente los gases emitidos no conservan relaciones viriales entre sí¹⁰.

Aunque la aproximación con la curva potencial obtenida es posible en ambos gases para todo tipo de recorrido, éste no es el sentido buscado ni la función del factor E por sí mismo; para estimar las emisiones totalizadas de un segmento de recorrido r será necesario utilizar el factor E de dicho recorrido (E_r) y los factores de emisión e_k que pueden ser corregidos a través de un factor apropiado:

$$E_r = (\alpha_k \cdot e_k) \cdot E_r ; \text{ con } \alpha_k \approx 1 \text{ para CO y } \alpha_k \approx 2 \text{ para HC} \quad (11)$$

5.2 Utilización del factor E y el plano de caracterización vial

La caracterización de las vías de circulación en distintos tipos puede realizarse a partir de la ecuación (10), separándola en dos factores y tomando sus inversas:

$$\eta = \frac{1}{\left(1 + \frac{A_{pa}}{A_m}\right)} \quad \mu = \frac{1}{\left(\frac{v_b}{v_r}\right)} \quad (12)$$

Estos factores pueden relacionarse gráficamente en un *plano de caracterización vial*, como el mostrado en la fig 6, en el que los pares de valores ($\eta; \mu$) representan cada uno de los recorridos considerados anteriormente. Este gráfico induce rápidamente a una interpretación de la categoría vial, esto es las tipologías de recorridos (céntricos, barrios, corredores y etc.), ya que los puntos medidos quedan asociados en *clusters* que pertenecen a un mismo tipo.

Los valores crecientes de E se encuentran al disminuir los componentes η y μ cuando se recorre el gráfico desde arriba a la derecha abajo a la izquierda, definiendo el centro del cluster el valor medio esperado de E, y así *determinando su categorización* en función de dicho valor medio. A fin de interpretar el significado de las posiciones de los posibles clusters, puede dividirse el plano anterior en dos áreas, mediante una recta (trazo discontinuo) que une el origen (emisiones normalizadas infinitas) con $\eta = 1$ y $\mu = 1$ (en este último se encuentra precisamente el recorrido basal ideal, punto negro cuadrado con emisiones normalizadas unitarias). El área superior es una *región dominada por la densidad de tránsito*, es decir la limitación de velocidad media se debe principalmente a un efecto de

encadenamiento del tránsito, que se hace más “pesado” a medida que crece su densidad. A su vez, el área inferior es una *región dominada por obstáculos y la prudencia vial*; contrariamente a la anterior aquí predominan elementos de regulación que no dependen directamente del tránsito (los físicos propios, bocacalles, peatones, imposición semafórica, etc.). Así en la zona superior el factor *E* medio del cluster depende principalmente de la velocidad media de diseño de las vías de circulación en tanto que en la zona inferior más de la estructura urbana y su zonificación.

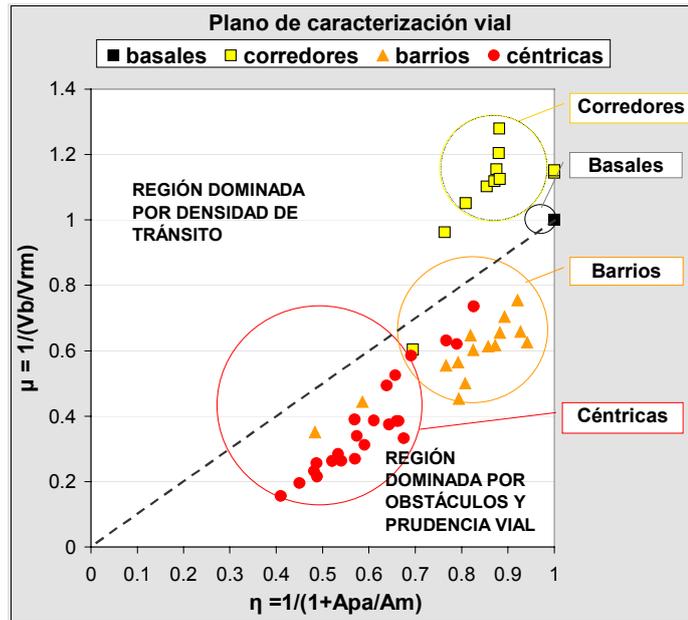


Fig. 6- Plano de caracterización vial que permite la utilización directa del factor E

De esta manera este plano resulta de suma utilidad cuando se intenta *comparar calles entre sí* (intra ciudad), para *estimar el factor E de una calle* en función del valor medio de su tipo, cuando se intenta *comparar ciudades distintas* entre sí (inter ciudad), sean éstas de un mismo país o de distintos países, o incluso cuando se necesita conocer o estimar los *resultados de distintas políticas de reducción de emisiones* vehiculares.

A partir del conocimiento del factor *E* por calle o tramo, que reduce en gran medida la incertidumbre de los factores de emisión, pueden formarse mapas de emisión grillados y así mejorar el conocimiento de la distribución espacio – temporal de cada contaminante de interés. Para ello puede seguirse la siguiente metodología:

Grillado: Se define el tamaño de la celda (píxel), teniendo en cuenta que si se toma un área elemental grande, se simplifica la tarea computacional pero a costa de resolución espacial, y por el contrario, si es muy chica se gana resolución espacial pero se vuelve muy laborioso el trabajo computacional. En nuestros estudios se ha elegido una grilla estándar de 350 metros por 350 metros (9 manzanas), totalizando el Gran Mendoza una grilla de 65 por 85 celdas.

Categorización de vías y celdas: Un plano (layer) de información SIG debe contener todas las vías de circulación de la ciudad categorizadas según los tramos específicos. La intersección de

las bases de datos correspondientes al grillado y a la categorización de vías produce automáticamente la identificación de cada celda en términos de sus vías (y tramos) incluidas (categorización de celdas).

Cómputo del tránsito: Si bien la jerarquía de las arterias de alguna forma contiene información de tránsito, el valor puntual de éste debe conocerse a lo largo del tramo de la calle considerada. Ésta puede extraerse básicamente de la concentración de población y actividades, debidamente calibrada con relevamientos puntuales⁹ así como de la combinación con otras fuentes de datos incluidas eventualmente las encuestas de origen y destino.

Cálculo de emisión de la celda: Conocidos los factores de emisión de las calles que conforman la celda (extraídos del conocimiento de su categoría y el tránsito de éstas), es posible calcular la emisión total de la misma, aplicando una extensión apropiada de la ecuación (10), debidamente pesada calle a calle por la densidad de tránsito correspondiente. Eventualmente se puede expresar la densidad de emisión del contaminante en cuestión en términos de emisión por unidad de superficie de la celda.

Representación en mapas de emisión: Con la información del paso anterior, se pueden construir mapas SIG – raster, para distintos períodos horarios y estacionales, derivados de la modulación temporal de los factores de emisión.

Validación de la información: Un dado mapa SIG se puede validar tomando uno o más píxeles de control, y relevando por medición in situ la verdadera emisión de éstos. Las eventuales diferencias dan información para producir factores de corrección generales. Los píxeles de control deben reflejar las distintas situaciones de densidad urbana (centro, barrios, áreas escasamente ocupadas, etc).

6 CONCLUSIONES

Se ha propuesto una nueva metodología en la determinación y estimación de la distribución espacial y temporal de las emisiones de fuentes móviles como contribución al estudio de la contaminación ambiental de las ciudades, tomando como caso de estudio el Gran Mendoza.

Esta nueva metodología apunta a combatir las debilidades de los modelos de emisión actuales basados tanto en la aproximación clásica top-down como en la más actual bottom-up, que se utilizan para alimentar los modelos de inmisión de contaminantes. En ambos métodos, los modelos dependen críticamente de establecer factores de emisión apropiados. Estudios de reciente data, la mayoría aún en etapa de desarrollo, coinciden en destacar la necesidad de una revisión de los métodos más tradicionales para determinar dichos factores. Estas investigaciones emergentes tienen, como base de obtención de datos de emisión, sistemas autotransportados. Precisamente la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), entre otros, ha recogido estas inquietudes estableciendo prioridad a la reformulación de los modelos de emisión.

De esto surge que los modelos de emisión futuros serán cada vez más del tipo grillado, en el que se adapta naturalmente el concepto “bottom-up” mediante mediciones de emisiones basadas en vehículos instrumentados. La ventaja de este tipo de modelos estriba no solamente en mejorar la modelación de micro escala, sino también en permitir la modelación en tiempo

real y la verificación permanente de la conformidad de las normas. Sin embargo, a juzgar por su estado actual de desarrollo, los modelos bottom-up basados en modelos de tránsito y emisiones modales resultan tal vez excesivamente detallados y de gran complejidad, y por ende no necesariamente mejores que las opciones alternativas.

La metodología y sistema aquí propuestos apuntan también a un modelo grillado, para lo cual se aboca a resolver el problema de la caracterización de la emisión para recorridos reales, reduciendo así sustancialmente la incertidumbre de la distribución espacio-temporal de la contaminación, cuestión aún no resuelta en los estudios emergentes. Para ello se introduce un nuevo concepto cual es la caracterización de las vías de circulación en sí mismas a través de factores de emisión propios. Esto implica considerar no solamente al vehículo como responsable de la emisión, sino también a la propia vía de circulación, en la que se manifiesta, con las restricciones de la infraestructura vial, el tránsito vehicular como pulso representativo de la ciudad.

Siguiendo esta idea se implementó y utilizó un sistema autotransportado propio de medición de contaminantes vehiculares -que sirve para estimar las emisiones en un ciclo de marcha real y para caracterizar las distintas vías de circulación- en el contexto de una metodología específica de validación y ensayos; se destacan aquí la selección de un vehículo patrón y el conjunto auxiliar de vehículos, más o menos representativos de nuestro parque naftero, y como estos son caracterizados a través de un ensayo estacionario tipo denominado *basal* así como de un ensayo dinámico que replica al IM240 utilizado por el CORINAIR. Esto permite no sólo verificar las mediciones realizadas por los equipos propios sino también establecer la correlación del ensayo basal con los test dinámicos usuales sobre rodillos, y el escalamiento de las emisiones producidas por los autos auxiliares con el auto patrón.

Un número importante de mediciones sobre varios vehículos, con distintas motorizaciones y por diferentes recorridos en el Gran Mendoza, demuestran grandes diferencias de los factores de emisión en función del tipo de vehículo, motor e imposición de tránsito. Los resultados permiten detectar los rasgos distintivos de las emisiones cuando el móvil recorre trayectos con distinta imposición de tráfico: vías de circulación similares tienen comportamientos de emisión similares, vías de circulación distintas, tienen comportamientos distintos. La metodología de análisis y el sistema autotransportado desarrollados permiten estudiar acabadamente estas diferencias, y cuantificar el error que surge de aplicar la estimación utilizando las curvas producidas por el sistema de rodillos inerciales. Con la introducción del concepto del factor de emisión de vías de circulación no sólo es posible caracterizar el régimen dinámico de emisiones de un vehículo en trayecto real sino también contribuir a la categorización de éstas. Esto último permite a su vez delinear una metodología de estimación de emisiones al nivel de celdas (o píxeles), aspecto que es fundamental para elaborar modelos dinámicos grillados de emisión-inmisión más ajustados a la realidad urbana.

7. REFERENCIAS

1. CORINAIR, 1999 - Road Transport – Emisión Inventory Guidebook E.E.A.
2. EPA 2001- New Generation Mobile Source Emissions Model: Initial Proposal and Issues, EPA Mobile Source Emissions Modeling Workgroup, Office of Air and Radiation, Office

- of Research and Development, Region 4, EPA 420-R-01-007
3. Frey, H.C., A. Unal, and J. Chen, 2002- Recommended Strategy for On-Board Emission Data Analysis and Collection for the New Generation Model, North Carolina State University for Office of Transportation and Air Quality, U.S, EPA, Raleigh, NC.
 4. Frey, H.C., D.A. Eichenberger, 1997- Remote Sensing of Mobile Source Air Pollutant Emissions: Variability and Uncertainty in On-Road Emissions Estimates of Carbon Monoxide and Hydrocarbons for School and Transit Buses North Carolina State University for North Carolina Department of Transportation, Raleigh, NC.
 5. Frey, H.C., N.M. Roupail, A. Unal, and J. Colyar, 2001a -Measurement of On-Road Tailpipe CO, NO, and Hydrocarbon Emissions Using a Portable Instrument- Proceedings, Annual Meeting of the Air & Waste Management Association, Orlando, FL.
 6. Frey, H.C., N.M. Roupail, A. Unal, J. Colyar, 2001b -Emission Reductions Through Better Traffic Management: An Empirical Evaluation Based Upon On-Road Measurements, FHwy/NC/2002-001, North Carolina State University for North Carolina Department of Transportation, Raleigh, NC.
 7. Fuller, Andrew D., 2001- A Flow Rate Measurement System for a Mobile Emissions Measurement System- West Virginia University ,West Virginia.
 8. Puliafito E., M. Guevara, C. Puliafito, 2001 - Modelling air pollution in an industrial area using GIS as an assessment tool- in Air Pollution IX, Serie Advance in Air Pollution- Vol. 9, pp 529-538, G. Latini, C. Brebbia (Eds.), Editorial Witt Press, Sothampton, Boston, Computational Mechanics Publications,.
 9. Puliafito, E.; M. Guevara; C. Puliafito, 2003 -Characterization of urban air quality using GIS as management system. Environmental Pollution Vol 122, pp 105-117.
 10. Seinfeld, John H. 1978 (lectura)- Contaminación Atmosférica: Fundamentos físicos y químicos-. Ed. McGraw Hill Book Company.
 11. Vojtisek-Lom, M., Cobb, Jr., J.T., 1998 - On-Road Light-Duty Vehicle Mass Emission Measurements Using a Novel Inexpensive On-Board Portable System- in Proceedings of the Eighth CRC On-Road Vehicle Workshop, San Diego, CA,
 12. Wark, Warner, 1996 (lectura)- Contaminación ambiental. Origen y control- Ed. Limusa, Noriega Editores.
 13. Zannetti, P., 1998 (lectura)- Air Pollution Modeling - Van Nostrand Reinhold – New York.
 14. Zheng ,Y., 2001 - A Grid-Based Mobile Sources Emissions Inventory Model- UC Davis-Caltrans Air Quality Project - <http://AQP.engr.ucdavis.edu> -University of California.