

Atlas argentino de emisiones de carbono debido al sector transporte

Salvador Enrique Puliafito^{1,2}, David Allende¹, Sebastián Pinto², Ariel Werner², Paula Castesana²

¹ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza / CONICET Rodríguez 273, (5500) Mendoza, Argentina

² Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Medrano 951, (C1179AAQ) Buenos Aires, Argentina

epuliafito@frm.utn.edu.ar

Recibido el 29 de agosto de 2014, aprobado el 24 de octubre de 2014

Resumen

Se plantea un procedimiento sencillo para preparar un inventario de emisiones grillado de alta resolución (9×9 km) para el sector transporte basado en un sistema de información geográfico usando información de fácil acceso. La variable básica usada es la actividad vehicular (vehículo-km transportado) que se estima a partir del consumo de combustible y una eficiencia de combustible. Esta información luego se distribuye estáticamente a la grilla según una jerarquía vial y la longitud del segmento asignada a cada calle. El consumo de combustible se obtiene del consumo por distrito, y luego se distribuye a nivel urbano usando la banda roja de la imagen satelital *DMSP-OLS Earth at night*. Esto es necesario ya que no existe información local o urbana de la distribución del consumo de combustible a esa escala. La comparación con bases internacionales mostró una mejor distribución espacial de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector transporte, pero similares valores nacionales totales.

PALABRAS CLAVE: INVENTARIO DE EMISIONES - SECTOR TRANSPORTE - SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO - DISTRIBUCIÓN ESPACIAL - VEHÍCULO KILÓMETRO TRANSPORTADO

Abstract

A simple procedure is proposed in order to develop an inventory of emissions with high resolution (9 km) for the transport sector based on a geographic information system using readily available information. The basic variable used is the vehicle activity (vehicle - km transported) estimated from fuel consumption and fuel efficiency. This information is distributed to a spatial grid according to a road hierarchy and segment length assigned to each street within the cell. Information on fuel is obtained from district consumption, but weighted using the *DMSP-OLS Earth at night* satellite image, to allow an urban scale distribution. Comparison with international databases showed a better spatial distribution of greenhouse gases (GHG) emissions in the transport sector, but similar total national values.

KEYWORDS: HIGH RESOLUTION EMISSIONS INVENTORY – ROAD TRANSPORT SECTOR - GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM - SPATIAL DISTRIBUTION - VEHICLE KILOMETER TRANSPORTED

Introducción

Los Modelos de Calidad del Aire (MCA) son herramientas matemáticas utilizadas para predecir concentraciones de contaminantes en el aire por medio de la simulación de los procesos físicos y químicos implicados en la dispersión, transporte y reacción de dichas sustancias. La correcta representación de estos fenómenos y sus interacciones constituyen todavía un campo de trabajo muy amplio (Allende, 2011). La preparación de un detallado inventario de emisiones que se adecúe a los usos en modelos regionales meteorológicos es fundamental, ya que permite una estimación adecuada del destino de contaminantes primarios y la formación de secundarios (por ejemplo, WRF/Chem: Grell et al., [2005]) y de calidad del aire (por ejemplo, CALPUFF: Scire et al., [2000]; AERMOD: Cimarelli et al., [2003] o CMAQ: Binkowski y Roselle, [2003]).

Existe mucha literatura que trata el tema de las emisiones del sector del transporte carretero. Por ejemplo, el artículo de Uherek et al., (2010), revisa las causas e impactos sobre la calidad del aire y el clima que genera el transporte carretero, desde el problema de la movilidad, los factores de emisión, las emisiones de gases y los modelos actualmente en uso. Se han confeccionado diversos inventarios de transporte carretero con el objeto de conocer las emisiones de gases de efecto invernadero y estimar el potencial de reducción de este sector, los cuales han sido recopilados por el IPCC (2007). Existen diversas formas para organizar un inventario de emisiones basado en el consumo de combustible: Singer y Harley, (1996) para Los Angeles EE.UU.; Yan y Crookes, (2009) y Hao et al., (2011) para China, entre otros. Rentziou et al., (2012) y Bastani et al. (2012) presentan una amplia revisión bibliográfica de los modelos de actividad vehicular y consumo de combustibles y estudian las principales variables que afectan la cantidad de kilómetros recorridos anualmente y discuten las incertidumbres asociadas con los cálculos de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del transporte.

El uso de los SIG en modelos de calidad del aire y el cálculo de las emisiones vehiculares pueden estudiarse en los iniciales trabajos metodológicos de Bruckman, (1992) u otros aplicados a ciudades y regiones: Gualtieri y Tarta-

glia, (1998) en Florencia, Italia; Borrego et al., (2003) en Lisboa, Portugal; Lin and Lin, (2002) en Taichung, Taiwan; Puliafito et al., (2003) en Mendoza, Argentina; Puliafito et al., (2011) en Bahía Blanca y Buenos Aires, Argentina y Gattikunda y Calori, (2013) en Delhi, India.

La actividad vehicular se estima utilizando información nacional agregada, como el número y distribución de los habitantes, el número promedio de viajes y distancias medias de conducción, la composición del parque automotor y la eficiencia de consumo de combustible. Los factores de emisión se estiman usando modelos operativos que incluyen diversos tipos de vehículos, combustibles y velocidades (COPERT: Ntziachristos y Samaras, 2000; SMOKE: Coats, 1995, Wang et al., 2011; MOBILE6: EPA 2008, Zhang y Batterman, 2010; *International Vehicle Emissions Model* (IVE): Davis et al., (2005).

En los últimos años, se han confeccionado muchos inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos en varias escalas. Baldasano et al., (2008) presentan un inventario de emisiones para España y Europa (HERMES) en muy alta resolución espacial (1 km) y temporal (1 hora) que permite estimar las emisiones por sector o actividad. Ferreira et al., (2013) presentan una comparación de varias bases de datos sobre territorio europeo: *European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP)*. *Netherlands Organisation for Applied Scientific Research* (TNO), desarrolló la base de datos de emisiones para la Investigación Atmosférica Global (EDGAR: *Emissions Database for Global Atmospheric Research*) (EDGAR, 2011). La versión más reciente EDGARv4.2 proporciona datos globales anuales de emisiones para todos los contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero, desagregados por países con una grilla de 0,1 grados de resolución. La estimación de estas emisiones está condicionada a las incertidumbres en los datos de actividad procedentes de las estadísticas nacionales, los ajustes para las series de tiempo incompleto, y el empleo de los factores generales de emisiones. Asimismo, si los datos geográficos disponibles son de resoluciones muy gruesas (por grandes distritos) el mapa global es de baja fiabilidad.

Cuando se desea aplicar estas bases de datos internacionales en un modelo regional de calidad del aire, es decir en escalas del orden

de los cientos a miles de km, las bases de datos internacionales disponibles no siempre tienen la resolución adecuada o no están suficientemente actualizadas. Por otra parte, no todos los países poseen el mismo nivel de desagregación de información tanto en cantidad, calidad o resolución espacial, que permita armar un inventario consistente y adaptable a los modelos regionales. Es por ello que el objeto de este artículo es mostrar un enfoque metodológico práctico del tipo *top-down* aplicado a la elaboración de un inventario regional de emisiones distribuido geográficamente de alta resolución proveniente del parque vehicular carretero para la República Argentina, que mejore el inventario de emisiones existente y poder aplicarlo posteriormente a un modelo regional de calidad del aire. Si bien este estudio se aplica a la Argentina, su descripción metodo-

lógica es transferible a cualquier región o país. Consecuentemente con este objetivo se ha buscado usar sólo información básica y accesible para muchos países.

Parte experimental

Breve descripción del área de estudio

La Argentina, ubicada en el extremo sur de Sudamérica, tiene 40 millones de habitantes y comprende una superficie aproximada de 2.800.000 km² de territorio continental e insular. En el año 2012 el producto bruto era de 470 millones de USD (a precios actuales) con un PBI/cápita de 11.500 USD anuales. El territorio nacional se divide en 23 provincias y una ciudad autónoma. Las provincias a su vez se organizan en

PROVINCIA	POBLACIÓN habitantes	GAS OIL m ³	NAFTA m ³	GNC Miles m ³
Buenos Aires	15.625.084	3.161.319	2.529.259	910.390.729
Córdoba	3.308.876	1.051.671	619.064	267.450.534
Santa Fe	3.194.537	991.989	553.213	183.305.650
Capital Federal	2.890.151	451.421	627.370	229.353.440
Mendoza	1.738.929	501.378	282.473	177.285.823
Tucumán	1.448.188	221.385	195.556	86.035.755
Entre Ríos	1.235.994	397.105	207.923	56.114.328
Salta	1.214.441	241.485	166.516	50.857.099
Misiones	1.101.593	240.997	173.913	-
Chaco	1.055.259	196.970	128.666	-
Corrientes	992.595	181.279	152.830	-
Santiago del Estero	874.006	134.924	80.123	29.474.363
San Juan	681.055	109.234	77.801	32.334.058
Jujuy	673.307	103.868	57.215	23.350.000
Río Negro	638.645	238.025	160.971	25.957.470
Neuquén	551.266	152.127	126.542	17.686.171
Formosa	530.162	55.598	56.012	-
Cubut	509.108	203.324	189.207	1.884.180
San Luis	432.310	138.608	112.472	36.930.262
Catamarca	367.828	43.847	44.476	11.084.492
La Rioja	333.642	44.847	50.593	6.533.742
La Pampa	318.951	161.225	84.198	9.001.649
Santa Cruz	273.964	136.370	118.411	-
Tierra del Fuego	127.205	33.654	54.315	-
TOTAL	40.117.096	9.192.649	6.849.119	2.155.029.745

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Secretaría de Energía de la Nación, INDEC

Tabla 1. Estadística de consumo anual de combustibles por Provincia 2012

Tipo	Auto Liviano			Carga liviana	Bus	Carga pesada	Total
	Motonaftas	GNC	gasoil	gasoil	gasoil	gasoil	
Buenos Aires	1.850,7	900,0	693,9	724,2	190,3	28,4	4.387,6
Capital Federal	740,4	244,1	235,4	229,2	68,2	14,2	1.531,6
Córdoba	507,5	178,3	160,0	219,9	58,8	4,7	1.129,2
Santa Fe	437,9	162,9	141,6	184,9	60,9	4,3	992,5
Mendoza	255,5	86,1	78,1	117,9	32,1	3,4	573,2
Entre Ríos	159,5	56,4	49,5	77,2	22,0	2,0	366,5
Tucumán	102,7	33,8	30,5	44,7	15,0	1,2	227,8
Chubut	108,4	7,9	29,8	51,8	13,3	1,9	213,2
Neuquén	82,5	27,0	24,7	48,9	11,5	2,0	196,7
Rio Negro	90,1	21,0	28,8	42,8	9,5	1,7	193,9
Misiones	99,6	-	23,0	40,3	15,3	1,6	179,8
Salta	70,9	26,8	25,6	42,8	12,1	1,3	179,5
Corrientes	99,1	-	24,6	39,5	13,9	1,2	178,4
San Juan	82,2	11,9	21,3	31,7	8,8	0,9	156,8
Chaco	78,7	-	20,6	39,6	12,4	0,7	152,0
Santa Cruz	73,0	-	16,8	26,4	6,8	1,5	124,6
La Pampa	60,9	4,8	17,3	31,4	7,0	0,6	121,9
San Luis	50,0	18,1	16,6	23,4	5,3	0,5	114,0
Jujuy	52,3	4,8	13,4	27,3	10,3	1,8	109,9
Santiago del Estero	44,8	7,8	13,4	25,0	6,9	0,7	98,6
Catamarca	31,1	5,6	9,7	13,9	3,1	0,5	63,8
Tierra del Fuego	37,8	-	8,6	12,2	3,1	1,2	63,0
La Rioja	35,8	-	9,5	12,4	3,2	0,5	61,2
Formosa	28,6	4,9	7,9	15,5	3,7	0,5	61,0
Total	5.180	1.802	1.000	2.123	593	77	11.477

Fuente: Elaboración propia a partir de datos ADEFA y de la Secretaría de Energía de la Nación

Tabla 2. Distribución de vehículos (en miles) por Provincia, año 2012

municipios o partidos totalizando 537 distritos (incluyendo los 22 distritos de la Ciudad de Buenos Aires). El 48% de estos municipios tienen menos de 25.000 habitantes sumando el 7% de la población total; 37% tienen entre 25.000 y 150.000 habitantes (29% población total), y el 15% restante tiene poblaciones mayores a 150.000 habitantes sumando el 64% de la población total. El parque automotor alcanza los 11,5 millones de vehículos, con un consumo anual de combustibles del sector transporte de 8,8 millones de m³ de gas-oil, 6,5 millones de m³ de gasolina y 2.000 millones de m³ de gas natural comprimido (ver la Figura 1 en la página 38). La red caminera supera los 500 mil km, de las cuales 38 mil km corresponden a accesos primarios (90% pavimentadas), 202 mil km de rutas primarias (20 % pavimentadas) y 270 mil km a caminos secundarios y terciarios mayoritariamente no pavimentados (INDEC, ADEFA, Vialidad Nacional, Secretaría de Energía).

La Tabla 1 muestra el consumo anual para Ar-

gentina al año 2012 y la Tabla 2 los vehículos registrados por provincia.

Como información primaria se usaron las siguientes bases de datos:

- Fuentes de puntos: Mapas de localidades y censo de Tránsito Diario Medio Anual TDMA (DNVA), el cual existe para las principales rutas. Venta de combustible por localidades (Secretaría de Energía);
- Fuentes de área o polígonos: Mapa de Argentina por departamento (*Sh Arg pob*) con información de población, densidad poblacional y otros indicadores económico - sociales (INDEC, IGN);
- Fuentes de líneas: Mapas de calles y rutas (*Openstreetmap e IGNA*) (*Sh Arg roads*), clasificados en accesos, rutas troncales, rutas nacionales, rutas provinciales, primarias, secundarias y terciarias.

d) Imágenes satelitales: *Imagen satelital DMSP-OLS Earth at night tipo TIFF* con tres bandas: roja, verde y azul (NOAA-NGDC, 2010).

Cálculo de los flujos vehiculares

La base de la preparación del inventario se realizó sobre un sistema de información geográfico (SIG). Un SIG utiliza tres formas básicas para manejar la información vectorial espacial referenciada: puntos, líneas y polígonos. Las imágenes (*o raster*) pueden convertirse a alguno de estos tipos anteriores.

El mapa base donde se preparó en base a una grilla con celdas de 9x9 km de resolución que cubre toda la República Argentina, con un ancho de 1200 km E-O y 3000 km de largo N-S. A este mapa lo denominamos *Sh Arg grid 9x9* y se usó para guardar toda la información primaria y elaborada en este proyecto.

La mejor información disponible públicamente de población y otras variables sociodemográficas está agregada a nivel de distritos, lo cual es una resolución espacial menor al del tamaño de la celda de la grilla. Si bien se dispone de un mapa de localidades, éste se representa como un punto y no queda definido el contorno urbano, salvo por algunas calles, y no siempre en todo el territorio. Por lo tanto a fin de identificar los centros urbanos, como principales emisores, se asociaron estos centros urbanos usando la banda R (roja) proveniente de *Sh Earth night*.

Para obtener este nuevo mapa de zonas urbanas se convirtió la imagen (TIFF) *Earth at night* a formato polígono (*shape*) (*Sh Earth night*) y luego se intersectó con la grilla base (*Sh Arg grid 9x9*). De la misma forma se intersectó la información poblacional (*Sh Arg pob*) con el de grilla (*Sh Arg grid 9x9*), incorporando a esta grilla base los datos poblacionales y socio-económicos de cada distrito. La población del departamento se distribuyó en la grilla de celdas *Sh Arg grid 9x9* según la intensidad de la banda R, $B_R(x,y)$:

$$Pob_{GRILLA}(x,y) = Pob_{DT}(m) \times \frac{B_R(x,y,m)}{\sum_{x,y} B_R(x,y,m)} \quad (1)$$

Donde $Pob_{GRILLA}(x,y)$ es la población asignada a

la celda de coordenadas (x,y) y $Pob_{DT}(m)$ es la población de cada distrito m ,

Para estimar el consumo total de combustibles debido al transporte carretero se usó la base de datos de venta de combustible por jurisdicción (Secretaría de Energía). Estos datos ($Fuel_{DT}$) se obtienen a nivel de distritos (m), En forma análoga a la distribución de la población por grilla, se realizó una asignación de combustible vendido por celda:

$$Fuel_{GRILLA}(x,y,i) = Fuel_{DT}(m,i) \times \frac{B_R(x,y,m)}{\sum_{x,y} B_R(x,y,m)} \quad (2)$$

El subíndice i de la Ec, (2) indica el tipo de combustible (motonaftas, gas-oil o GNC). Se asumió en este estudio que no todo el combustible vendido o asignado a la celda (x,y) $Fuel_{GRILLA}$ se consume completamente en la misma celda, sino que consumen su combustible en las celdas aledañas a medida que los vehículos circulan, y es proporcional a la densidad poblacional de cada centro urbano. El consumo por celda $Fuel_{GRILLA}$ se distribuye siguiendo una función del tipo gaussiana, (i.e, Mertens et al., 1977 y similares). La nueva distribución se obtiene a partir de la convolución entre la información por grilla y una función filtro bi-gaussiana $bg(x,y)$. Para este caso se usó una función filtro de 15x15 celdas con una desviación d (variable para cada tipo de combustible) con valor medio x_m e y_m :

$$bg(x,y) = \exp \left[- \left(\frac{x-x_m}{a} \right)^2 \right] \times \exp \left[- \left(\frac{y-y_m}{a} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Nótese que la función $bg(xm,ym)= 1$

$$Fuel_{CONV}(x,y,i) = \frac{1}{\sum_{u,v} bg(u,v)} \iint_{u=u_0, v=v_0}^{u=u_f, v=v_f} [Fuel_{GRID}(u,v,i) \times bg(x-u, y-v)] dudv \quad (4)$$

$Fuel_{CONV}$ es la proporción del combustible consumido (o distribuido) en cada celda de coordenadas (x,y) ; siendo $u_{f,0} = x \pm x_m/2$; $v_{f,0} = y \pm y_m/2$. Este paso es necesario, porque de otra forma las rutas o celdas rurales aparecerían con un consumo nulo o muy subestimado y las celdas urbanas sobreestimado. El ancho de la

función filtro puede regularse para cada tipo de combustible $d(i)$, así para gas-oil (mayormente en vehículos de carga) la distribución será más dispersa. A fin de calibrar el modelo con datos de los flujos diarios por carretera (TDMA), es necesario estimar la actividad VKT (vehículos km transportados) por tipo de combustible. Ésta se calcula a través del combustible vendido por jurisdicción y una eficiencia estimada de combustible (Anuario Adefa, 2012) (Tabla 2 y Tabla 3):

$$VKT_{DT}(m, i) = Fuel_{DT}(m, i) \times \gamma(i) \quad (5)$$

γ es la eficiencia promedio (km/l para combustibles líquidos o km/m³ para GNC) para ese combustible, la jurisdicción DT puede ser nacional, provincial, departamental; i es el combustible (gasolinas, gas-oil o GNC).

De manera análoga se puede determinar la actividad de cada celda VKT_{GRILLA} a partir del combustible asignado a cada celda $Fuel_{CONV}$ usando la Ec. (5):

$$VKT_{GRILLA}(x, y, i) = Fuel_{CONV}(x, y, i) \times \gamma(i) \quad (6)$$

VKT_{GRILLA} es un valor de actividad total (para todo tipo de vehículos) por celda, Sin embargo el consumo propiamente dicho se realiza sobre las rutas. A fin de trasladar la información de la grilla a la ruta, representada en el SIG por los segmentos de líneas, se intersectó el mapa de rutas (*Sh Arg roads*) con el de grillas (*Sh Arg grid*). La actividad en cada segmento VKT_{SEGM} es:

$$VKT_{SEGM}(s, i) = VEH_{SEGM}(s, i) \times L(s) \quad (7)$$

Donde $VEH_{SEGM}(s, i)$ son los vehículos con combustible i circulando por el segmento s , y $L(s)$ es la longitud de ese segmento. Nótese que normalmente no se dispone de la información de los vehículos diarios en cada segmento, por lo tanto debe estimarse a partir del consumo de la celda y de la jerarquía de las rutas. Por otra parte a pesar que los vehículos diarios en cada segmento son una variable aleatoria sus valores medios diarios anuales se mantienen aproximadamente estables. A fin de estimar VKT_{SEGM} a partir de VKT_{GRILLA} se clasificó cada segmento en jerarquías definiéndose en rutas tipo: accesos, troncales, primarias y caminos secundarios. A una celda le corresponde un único valor de actividad VKT_{GRID} y en cada celda co-existen s segmentos de distintas longitudes y jerarquías. La actividad del segmento será proporcional al VKT_{GRID} y al promedio ponderado entre el producto de la jerarquía vial $J(j)$ y la longitud del segmento $L(s)$ para cada grilla:

$$VKT_{GRILLA}(x, y, i) = \sum_S VKT_{SEGM}(s, i) = VEH_{REF} \sum_S J(S) \times L(S) \quad (8)$$

Donde VEH_{REF} es un valor de referencia, por ejemplo la cantidad de vehículos que circula en una ruta acceso es 1000 veces mayor que la de una ruta secundaria. El valor de $J(s)$ tiene en cuenta el flujo vehicular, ancho, tipo, uso e importancia de la vía. A partir de los puntos donde existen conteos de flujos se puede estimar el valor de las jerarquías. En el caso de estudio se tomaron los siguientes valores: accesos primarios= 1000; rutas troncales= 500; rutas nacionales= 100; rutas provinciales y secundarias= 1, La razones entre estos coeficientes indican las tasas entre los flujos en ese punto. Entonces la actividad del segmento se estima de la siguiente forma:

Variable / Combustible	Unidad	NAFTA	GASOIL	GNC	TOTAL
Proporción vehículos	%	46%	39%	16%	100%
Veh año 2012	miles	5,237	4,444	1,796	1,477
Actividad / veh anual	km anuales	14,387	18,616	16,801	
Actividad / veh diaria	km diarios	39	51	46	
Eficiencia	km/l o km/m ³ *	11	9	14*	
Consumo	Miles m ³ / mill, m ³ *	6,849	9,193	2,155*	
VKT anual	Millones	75,340	82,734	30,170	188,245
VKT diario	Millones	208	190	91	489
Proporción VKT	%	42%	39%	19%	100

Ref: VKT: Vehículos-km transportados; (*) unidades para GNC, Fuente: Elaboración propia,

Tabla 3. Tasas de actividad media anual nacional

PROYECCIONES - Publicación de investigación y posgrado de la FRBA www.frba.utn.edu.ar/investigacion/proyecciones

$$VKT_{SEGM}(s, i) = \frac{VKT_{GRID}(x, y, i) \times J_{GRID}(s) \times L_{GRID}(s)}{\sum_s [J_{GRID}(s) \times L_{GRID}(s)]} \quad (9)$$

Donde $VKT_{SEGM}(s, i)$ es la actividad diaria del segmento s y combustible i , ubicados en la celda (x, y) . La suma de todos los VKT diarios de todos los segmentos o celdas debe ser equivalente a la actividad nacional total por día. Una vez estimado el valor de VKT_{SEGM} se estiman los vehículos diarios VEH_{SEGM} en cada segmento dividiendo por la longitud del segmento $L(s)$. Este valor nos permite comparar los resultados con las estadísticas de TDMA existentes.

Cálculo de las emisiones

El proceso realizado nos permite calcular y asociar las emisiones desde la celda o los segmentos para las diversas jurisdicciones. Las emisiones E_{DT} para el contaminante k , pueden calcularse en función del consumo de combustible i para distintos niveles de jurisdicción m (Provincia o Distrito) y un factor de emisión promedio del combustible quemado $F_{EF}(k, i)$ (Tabla 4), como así también por celda E_{GRILLA} :

$$E_{DT}(m, k) = \sum_i [Fuel_{DT}(m, i) \times F_{EF}(k, i)] \quad (10)$$

$$E_{GRILLA}(x, y, k) = \sum_i [Fuel_{GRILLA}(x, y, i) \times F_{EF}(k, i)] \quad (11)$$

Una vez determinada la cantidad de vehículos por segmento, por tipo y por combustible se calculan las emisiones por segmento E_{SEGM} por unidad de tiempo usando factores de emisión de actividad $A_{EF}(i, z, k)$ (g/km) recorridos por cada tipo de vehículo:

$$E_{SEGM}(s, k) = \sum_{j, i, z} [V_{SEGM}(s, i, z) \times L(s) \times A_{EF}(i, z, k)] \quad (12)$$

Cada segmento posee la identificación de la celda a la que pertenece, por lo tanto las emisiones por segmento se pueden volver a asociar al de la grilla. La emisión por celda y por contaminante k , será la suma de las emisiones de todos los segmentos s :

$$E_{GRILLA}(k, x, y) = \sum_s E_{SEGM}(s, k) \quad (13)$$

Mientras que las emisiones de Ec. (10) se calculan sobre la base de la venta de combustibles en la celda, la Ec. (12) se realiza en base a la discriminación por tipo de vehículo que recorre los segmentos de cada celda. Finalmente las emisiones totales (nacionales) por contaminante podrán totalizarse por distritos, por segmentos o por celdas:

$$E(k) = \sum_x \sum_y E_{GRILLA}(k, x, y) \quad (14)$$

Factores de Conversión de energía a emisiones	Naftas	Gasoiil	GNC	Fuel Oil
de	m ³	m ³	1000 m ³	m ³
a TJ	0,0318	0,0361	0,0348	0,0388
de TJ a Tn de CO	13,0000	0,5100	0,7230	0,6100
de TJ a Tn de HC	1,4000	0,0800	0,0900	0,1300
de TJ a Tn de NO _x	0,6000	0,7160	0,3800	1,8000
de TJ a miles Tn de CO ₂	0,0686	0,0744	0,0555	0,0779
de TJ a Tn de CH ₄	0,2000	0,0020	0,6300	0,0060
de TJ a Tn de N ₂ O	0,0010	0,0040	-	0,0020

Ref.: IPCC (2007)

Tabla 4. Factores de emisión FEF

Resultados

La Figura 1 muestra la evolución del consumo de combustibles en Argentina en el período 1960-2012, y se distribuye de acuerdo al tipo de combustible. La Figura 2 muestra además una partición de las emisiones de carbonos calculadas

de acuerdo al tipo de transporte usado y el tipo de combustible. En ambas figuras se aprecia la importancia del uso de gas-oil especialmente en el servicio de carga. Sin embargo el transporte liviano (autos particulares) suma el 63% de las emisiones, 6% corresponde al transporte público y el 31% corresponde a movimiento de cargas.

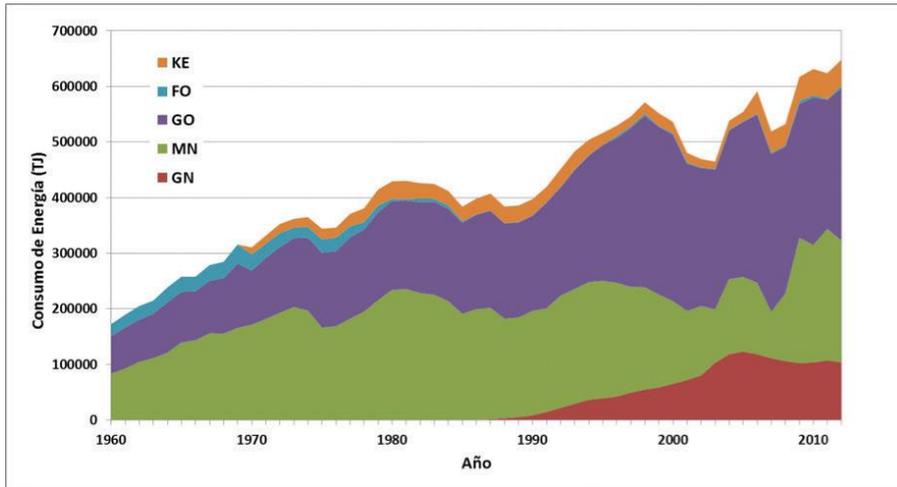


Fig. 1. Evolución del consumo de energía (TJ) por el sector transporte en Argentina, según el tipo de combustible usado. Ref: KE: Kerosene y aeronaftas, FO: Fuel-Oil, GO: Gas-Oil, MN: Motonaftas y GN Gas Natural Comprimido. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Secretaría de Energía de la Nación

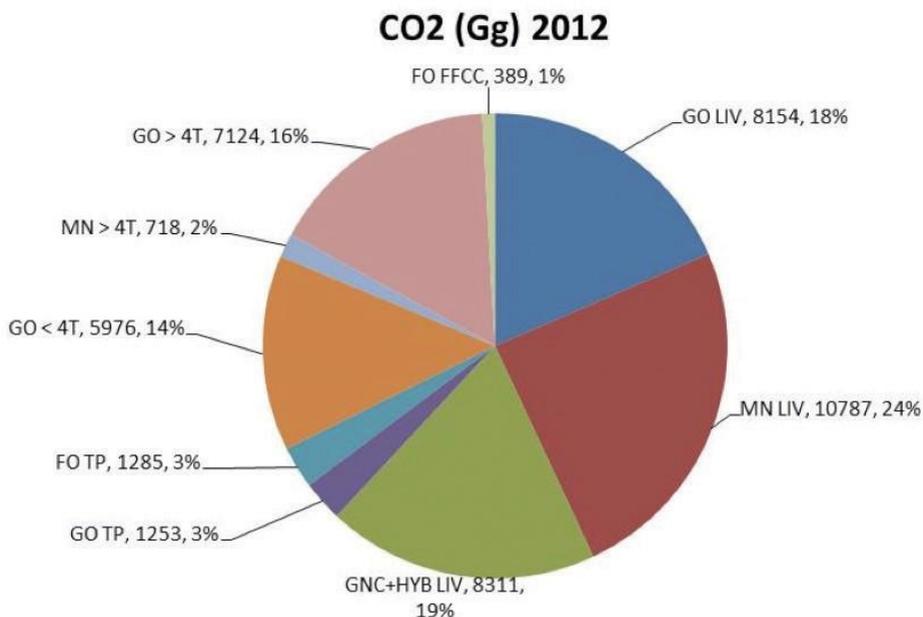


Fig. 2. Distribución de las emisiones de CO₂ (Gg) para el año 2012, debido al sector transporte en Argentina, según el tipo de combustible usado y medio de transporte, Ref: KE: Kerosene y aeronaftas, FO: Fuel-Oil, GO: Gas-oil, MN: Motonaftas y GNC Gas Natural Comprimido; FFCC Cargas por ferrocarril; > 4T Cargas en camiones mayores a 4 toneladas; < 4T Cargas en camiones menores a 4 toneladas; TP: transporte público; LIV vehículos livianos (autos particulares); HYB: Vehículos híbridos

La Figura 3 muestra un mapa de Argentina con su distribución de población por departamentos o distritos. En esta figura se representan los cuatro tipos de información geográfica asociada a un sistema de información geográfica: áreas:

países y distritos (Figura 3a), líneas y puntos: rutas y localidades (Figuras 3b y 3c), imágenes: luces de *Earth at night* (Figura 3c). La Figura 3d representa la grilla básica utilizada *Sh Arg grid 9x9*.

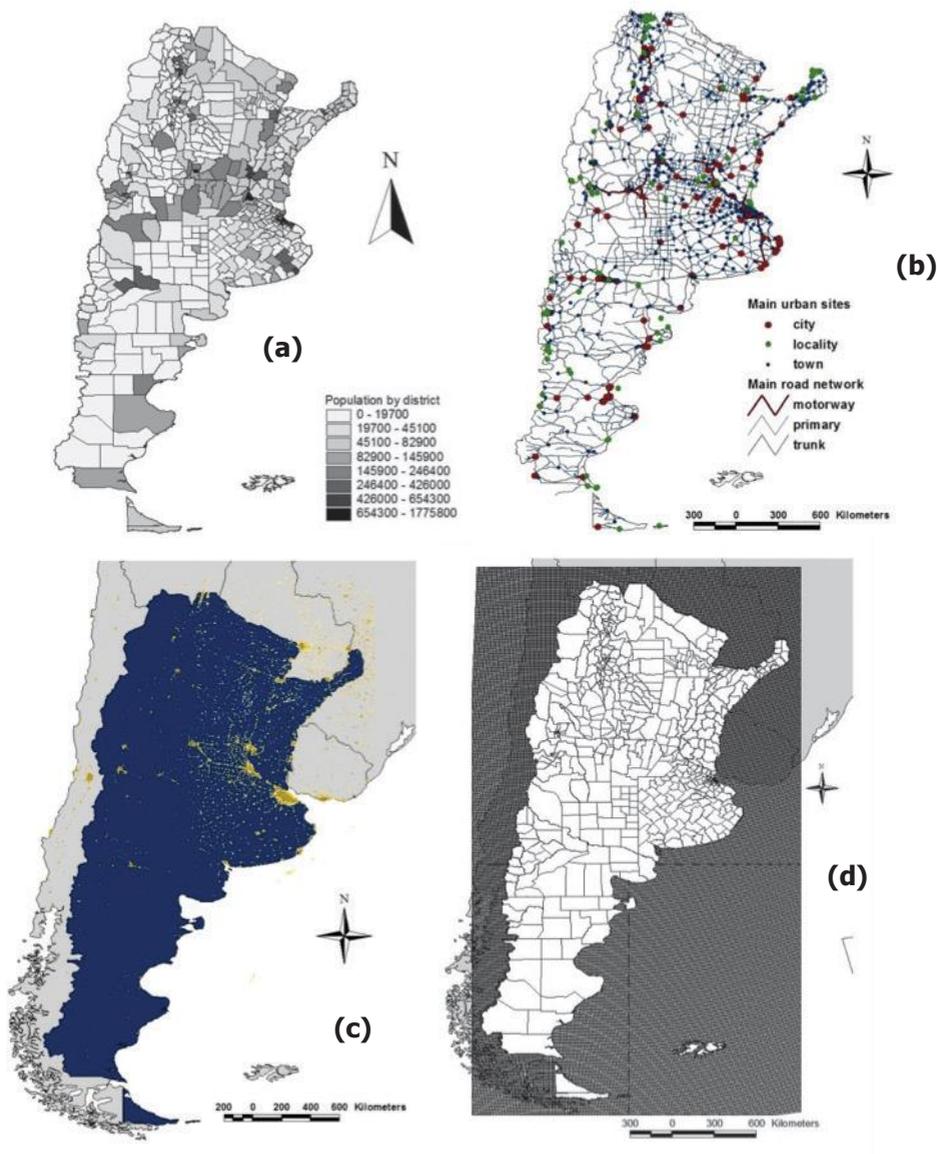


Fig. 3. Información inicial básica referenciada geográficamente usando distintos tipos de representación en GIS (superficie, línea, tipo e imagen), Arriba izquierda (a): *Sh Arg pob*: Población Argentina por distritos (Información de superficie). Arriba Derecha (b): *Sh Arg roads*: Ubicación de ciudades y pueblos (información de punto); rutas y accesos principales (información de línea). Abajo izquierda (c): Fotos de luces nocturnas (*Earth at night*) (información de imagen). Abajo derecha (d): *Sh Arg grid 9x9*: Grilla base de 9 x 9 km sobre el territorio argentino

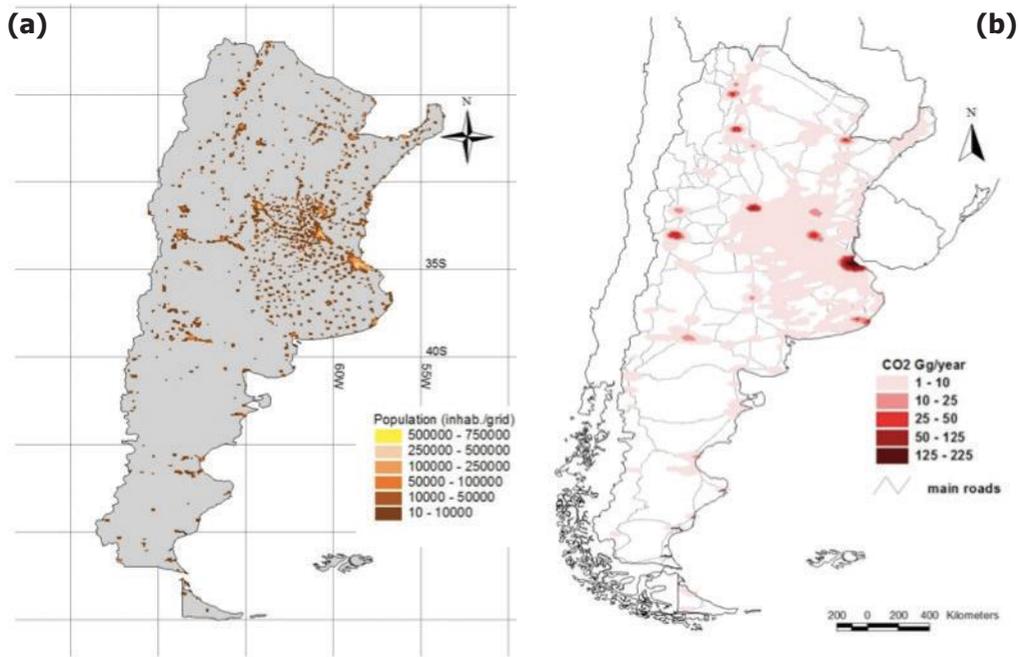


Fig. 4. Derecha (a): Población territorial usando *Earth at night*. Izquierda (b) Emisiones de dióxido de carbono luego de la convolución $Fuel_{CONV}(x,y)$

La Tabla 1 muestra el consumo anual para Argentina al año 2012 discriminada por distrito $Fuel_{DT}$, por tipo de combustible, la energía total consumida y las emisiones de CO_2 respectivas. Las emisiones de contaminantes emitidos en la combustión como CO , CH_4 y NO_x (entre otros) pueden estimarse usando el factor de emisión apropiado $F_{FE}(k,i)$ (Tabla 4) a partir del mismo consumo según la Ec. (11) o Ec. (12). La Tabla 5 muestra la distribución de consumo anual de combustibles según el tamaño de la población.

Las Tablas 1 a 4 junto con las cuatro figuras 3, constituyen la información básica disponible en las bases de datos habituales.

La Figura 4a muestra el efecto de intersectar la grilla $Sh\ Arg\ grid\ 9 \times 9$ con el mapa de luces, obteniéndose una distribución de poblaciones por celda $Pob_{GRID}(x,y)$ de acuerdo a la Ec. (1) (Figura 4 b). La Figura 4b muestra la distribución de consumos de energía $Fuel_{CONV}$ aplicando la función de convolución de la Ec. (4).

Se observa en la Tabla 5 que el consumo de gasolina (naftas) y el de GNC prácticamente es proporcional a la población del distrito, variando

su consumo per cápita levemente, no así el de Gas-oil, que involucra el transporte de bienes. El consumo per cápita de GNC es mayor en los distritos más poblados, debido a la mayor presencia de estaciones de gas.

La Figura 5 muestra los vehículos en los segmentos, jerarquizados por tipo de rutas, Los espesores y colores indican la mayor o menor cantidad de flujo vehicular, obtenidos. La Figura 6 muestra las emisiones anuales de CO_2 obtenidos en un formato de grilla. La Tabla 6 muestra la distribución de las emisiones del transporte de acuerdo a la jerarquía de la ruta. Se aprecia que el 46% del total de las emisiones se desarrollan en las autopistas y rutas troncales, y el 30% se desarrolla en el ámbito urbano.

Rango Población / Consumo	Total Miles Hab.	GAS-OIL Miles m ³	NAFTA Miles m ³	GNC Miles m ³
Pob. < 25.000	2.850	892	487	48.108
25.000 < pob. < 150.000	11.538	3.843	1.993	487.719
Pob. > 150.000	25.729	4.457	4.369	1.619.202
TODOS	40.117	9.192	6.849	2.155.029
Rango población	proporción	%	%	%
Pob. < 25.000	7%	10%	7%	2%
25.000 < pob. < 150.000	29%	42%	29%	23%
Pob. > 150.000	64%	48%	64%	75%
TODOS	100%	100%	100%	100%
población	Consumo anual	l/Hab	l/Hab	m ³ /Hab
Pob. < 25.000		313,0	170,9	16.880
25.000 < pob. < 150.000		333,1	172,7	42.271
Pob. > 150.000		173,2	169,8	62.933
TODOS		229,1	170,7	53.719

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Secretaría de Energía de la Nación, INDEC

Tabla 5. Estadística de consumo anual de combustible por tamaño de distritos

Combustible	Nº Seg	Long	GNC	MN	GO	Total
Autopistas	7.538	7.922	1.552	3.233	5.463	10.271
Rutas Troncales	12.514	38.317	1.026	3.072	5.755	9.854
Rutas Primarias	25.800	78.011	1.530	4.412	8.217	14.167
Rutas Secundarias	29.617	39.077	1.050	2.958	5.227	9.247
Otras Jerarquías	2.933	5.275	42,1	128,3	243,2	413,6
Total	78.402	168.602	5.202	13.805	24.907	43.954

Ref.: GNC: Gas Natural Comprimido; MN: Motonaftas (Gasolina); GO: Gas-Oil;
Nº Seg: Cantidad de segmentos; Long: longitud total de los segmentos (km)

Tabla 6. Distribución de las emisiones de CO₂ según la jeraquía de la ruta (Gg/año) para el año 2012

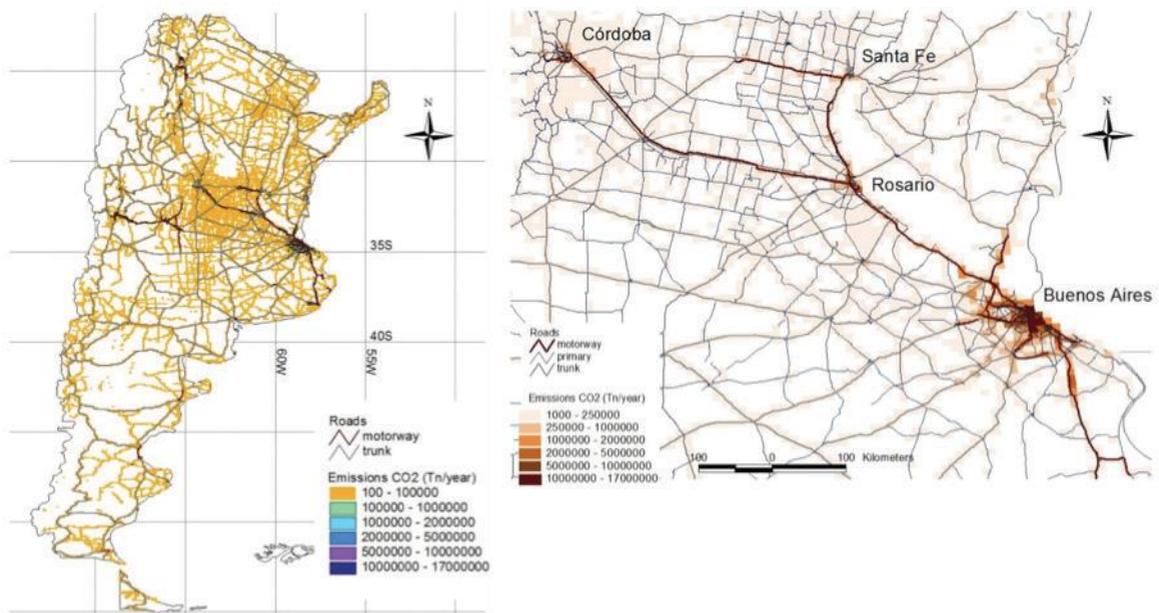


Fig. 5. Asignación de vehículos diarios por segmentos y comparación con las medidas de TDMA en rutas nacionales. Derecha: detalle de la zona de Buenos Aires – Rosario.

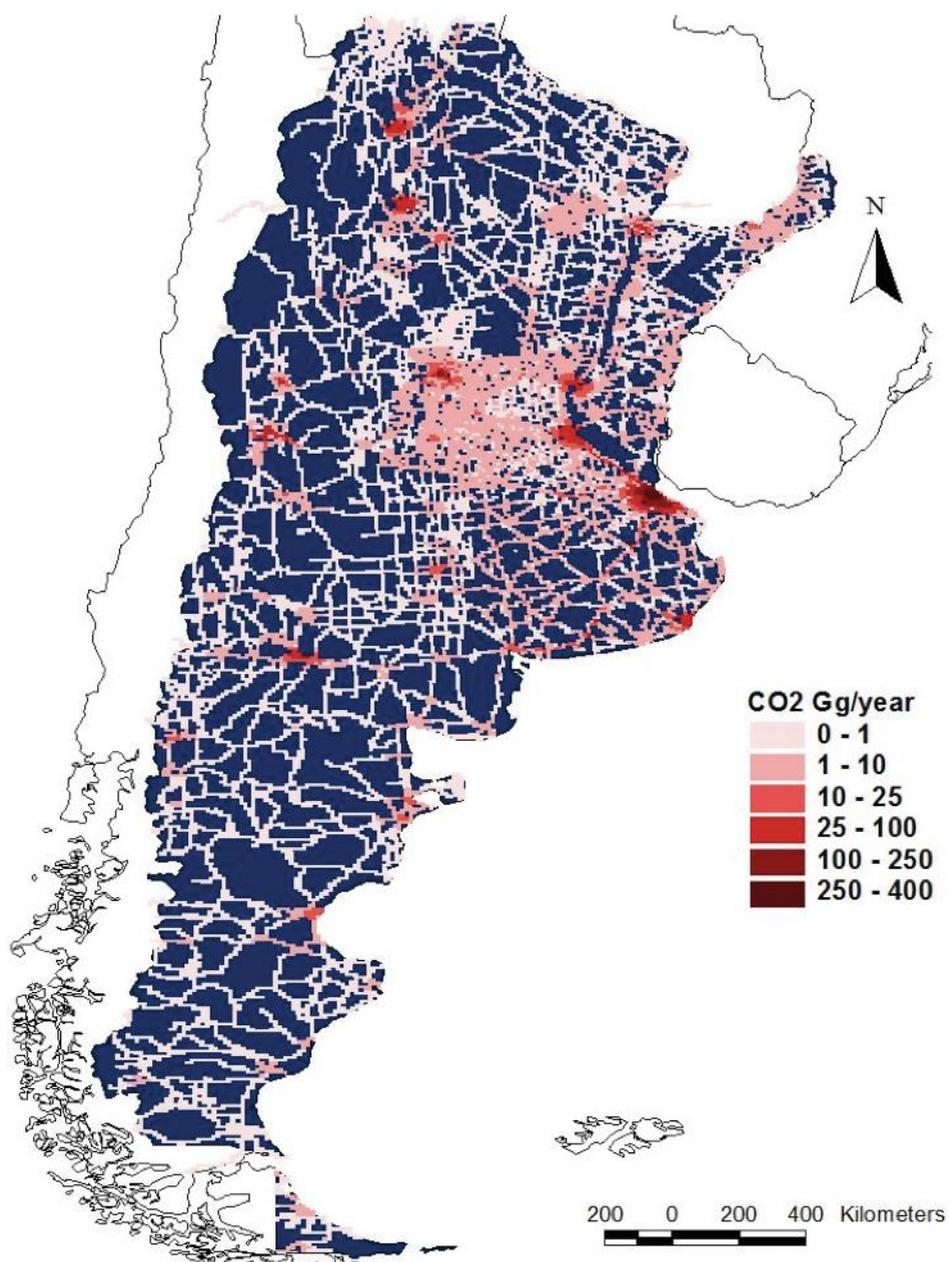


Fig. 6. Mapa de emisiones de CO₂ por línea

Conclusión

Los modelos de calidad del aire requieren del ingreso de mucha información de base, como es el tipo de uso del suelo, la topografía, los datos meteorológicos y especialmente los inventarios de emisión de las fuentes disponibles en el área bajo estudio. En los modelos regionales, este requerimiento es un verdadero desafío, por la extensión de las escalas usadas (de cientos a miles de km) y fundamentalmente por la escasez de datos organizados disponibles. Por otra parte, las bases de datos internacionales no tienen la misma resolución para todas las naciones, pudiendo ser en algunos países de baja resolución espacial asociada a grandes distritos (cientos de km).

Para la metodología propuesta en este trabajo la variable básica es la actividad vehicular vehículo-km transportados (VKT), que se estima a partir del consumo de combustible por grilla y una eficiencia de combustible. Esta información luego se distribuye estáticamente según una jerarquía vial y la longitud del segmento de calle. El consumo de combustible se obtiene del consumo por distrito, pero pesado por la

banda roja de la imagen de *Earth at night*. A fin de distribuir este consumo en las zonas rurales, el consumo de combustible es diluido con una función bigaussiana, que implícitamente considera que los flujos de tráfico son más intensos cerca de las zonas urbanas y se diluye a medida que nos alejamos de ella.

Finalmente conviene destacar, que si bien la grilla de base es de 9×9 km, al producir un mapa de línea con los tráficos medios anuales y sus respectivas emisiones, es posible generar mapas de mayor resolución espacial, en especial para usar en modelos de calidad del aire de escala local o regional media. En estudios posteriores se incluirán a este Atlas de Argentina otras fuentes de emisiones.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional y CONICET por el apoyo a las actividades de investigación. Este trabajo se enmarca en los Proyectos UTN PID IFI 1799 y 1487 y PIP CONICET 112 201101 00673.

Referencias

- ALLENDE, D. G., (2011), Sistema de Modelado Ambiental Multiescala y Multimodo, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería.
- BALDASANO, J. M.; GÜERECA, L. P.; LÓPEZ, E.; GASSÓ, S.; JIMÉNEZ GUERRERO, P., (2008), Development of a high-resolution (1 km \times 1 km, 1 h) emission model for Spain: the high-elective resolution modelling emission system (HERMES), *Atmospheric Environment* 42, 7215-7233.
- BASTANI, P.; HEYWOOD, J. y HOPE, C., (2012), The effect of uncertainty on US transport-related GHG emissions and fuel consumption out to 2050, *Transportation Research Part A*, (46), 517-548.
- BINKOWSKI, F. S. and ROSELLE, S. J., (2003), Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model aerosol Component 1, Model description, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 108(D6), 4183.
- BORREGO, C.; TCHEPEL, O.; COSTA, A.; AMORIM, J. y MIRANDA, A., (2003), Emission and dispersion modelling of Lisbon air quality at local scale, *Atmospheric Environment* 37, pp, 5197–5205.
- BRUCKMAN, L.; DICKSON, R. J. y WILKONSON, J. G., (1992), The use of GIS software in the development of emissions inventories and emissions modeling, In: *Proceedings of the Air and Waste Management Association*, Pittsburgh, PA.
- CIMORELLI, A. J.; VENKATRAM, A.; WEIL, J. C.; PAINE, R.; WILSON, R. y LEE, R., (2003), AERMOD: Description of model formulation, Environmental Protection Agency.
- COATS, C., (1995), High Performance Algorithms in the Sparse Matrix Operator Kernel Emissions Modeling System, Microelectronics Center of North Carolina, Environmental Systems Divisions.
- DAVIS, N.; LENTS, J.; OSSES, M.; NIKKILA, N. y BARTH, M., (2005), Development and Application of an International Vehicle Emissions Model, *Transportation Research Record*, 51-59.
- GRELL, G. A.; PECKHAM, S. E.; SCHMITZ, R.; MCKEEN, S.; FROST, G. y SKAMAROCK, W. C., (2005), Fully coupled "online" chemistry within the WRF model, *Atmospheric Environment*, 39(37), 6957-6975.
- GUALTIERI, G. and TARTAGLIA, M., (1998), Predicting Urban Traffic Air Pollution: A GIS Framework", *Transportation Research Part D*, 3 (5), pp. 329-336.
- GUTTIKUNDA, S. y CALORI, G., (2013), A GIS based emissions inventory at 1 km \times 1 km spatial resolution for air pollution analysis in Delhi, India, *Atmospheric Environment*, 67, pp. 101-111.
- HAO, H.; WANG, H. y OUYANG, M., (2011), Fuel conservation and GHG (Greenhouse gas) emissions mitigation scenarios for China's passenger vehicle fleet, *Energy*, 36, pp. 6520-6528.
- LIN, M. and LIN, C., (2002), The application of GIS to air quality analysis in Taichung City, Taiwan, ROC, *Environmental Modelling & Software* 17 (2002) 11–19.
- NTZIACHRISTOS, L. and SAMARAS, Z., (2000), COPERT III Computer programme to calculate emissions from road transport Methodology and emission factors, Technical Report No 49, EEA, Copenhagen.
- PULIAFITO, S.E.; ALLENDE, D.; FERNANDEZ, R.; CASTRO, F. y CREMADES, P., (2011), New approaches for urban and regional air pollution modelling and management, In *Advance in Air Pollution*, Farhad Nejadkoorki (Ed), Intech, pp, 429-454.
- PULIAFITO, S.E.; GUEVARA, M. y PULIAFITO, C., (2003), Characterization of urban air quality using GIS as management system, *Environmental Pollution*, 122, pp, 105-117.
- RENTZIOU, A.; GKRTIZA, K. y SOULEYRETTE, R., (2012), VMT, energy consumption, and GHG emissions forecasting for passenger transportation, *Transportation Research Part A* 46, pp, 487–500.
- SCIRE, J. S.; STRIMAITIS, D. G. y YAMARTINO, R. J., (2000a), A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model, Concord, MA.
- SINGER, B. C. y HARLEY, R. A., (1996), A fuel-based motor vehicle emission inventory, *Journal of Air and Waste Management Association* 46, pp. 581-593.
- SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; WANG, W. y POWERS, J. G., (2008), A Description of the Advanced Research WRF Version 3, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research.
- UHEREK, E.; HALENKA, T.; BORKEN-KLEEFELD, J.; BALKANSKI, Y.; BERNTSEN, T.; BORREGO, C.; GAUSS, M.; HOOR, P.; JUDA-REZLER, K.; LELIEVELD, J.; MELAS, D.; RYPDAL, K. and SCHMID, S.,

YAN, X. y CROOKES, R., (2009), Reduction potentials of energy demand and GHG emissions in China's road transport sector, *Energy Policy* (37), pp, 658–668.

ZHANG, K. y BATTERMAN, S., (2010), Near-road air pollutant concentrations of CO and PM_{2,5}: A comparison of MOBILE6,2/CALINE4 and generalized additive models, *Atmospheric Environment* 44, PP 1740-1748.

ADEFA, Asociación de Fábricas de Automotores www.adefa.org.ar

BEN, Balance Energético Nacional, www.energia3.mecon.gov.ar

BP (2010), *British Petroleum Statistical Review of World Energy*, BP, London, UK (2010).

DNRPA, Dirección Nacional del Registro de la Propiedad Automotor www.dnrpa.gov.ar

DNVA: Dirección Nacional de Vialidad de Argentina <http://www.vialidad.gov.ar/>

EDGAR, (2011), Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGARv4,2), <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>

EIA, International Energy Outlook www.eia.gov/ieo

EMEP, (2007), EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook e 2007, EEA Technical Report No 16/2007, European Environment Agency, Copenhagen, <http://reports.eea.europa.eu/EMEP-CORINAIR5/en/>

IEA (2010b) International Energy Agency, CO₂ Emissions from Fuel Combustion, IEA, Paris, France.

IEA(2010a), International Energy Agency, Energy Balances of Non-OECD Countries; and Energy Balances of OECD Countries, IEA, Paris, France.

IGNA, Instituto Geográfico Nacional <http://www.ign.gob.ar/>

INDEC, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (Argentine National Institute for Statistics and Census) <http://www.indec.mecon.ar/>

IPCC, (2007), *Climate Change 2007, Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, In: PachauriRK, Reisinger A (eds,) IPCC, Geneva, Switzerland.

NOAA-NGDC, 2010, Version 4 DMSP-OLS Nighttime Lights Time Series [WWW Document] URL <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/downloadV4composites.html>

Openstreetmap, Free open source maps of the world, <http://www.openstreetmap.org/about>

SEN, Secretaría de Energía de la Nación (Secretary of Energy), www.energia3.mecon.gov.ar

STN, Secretaría de Transporte de la Nación (Secretary of Transportation), www.transporte.gov.ar

The International Vehicle Emissions (IVE) Model <http://www.issrc.org/ive/>

UN (2010), United Nations, *Energy Statistics Yearbook*, UN, NY, USA,