



**SD-AYMAD. "Sostenibilidad ambiental y
valorización energética de residuos urbanos."
Organizada por el Ayuntamiento de Madrid**

**CONTROL MEDIOAMBIENTAL DE LA VALORIZACIÓN
ENERGÉTICA DE RESIDUOS URBANOS**

José María Baldasano
Catedrático
Universidad Politécnica de Cataluña



Congreso Nacional del Medio Ambiente

Cumbre del Desarrollo Sostenible

Del 1 al 5 de diciembre de 2008

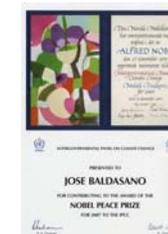
MADRID. Palacio Municipal de Congresos del Campo de Las Naciones

[Inicio](#) | [Fundación CONAMA](#) | [Decálogo de principios](#) | [Ediciones anteriores](#)

Control medioambiental de la valorización energética de residuos urbanos



José María Baldasano



Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS)
Premio Rey Jaime I de Medio Ambiente
Experto del IPCC

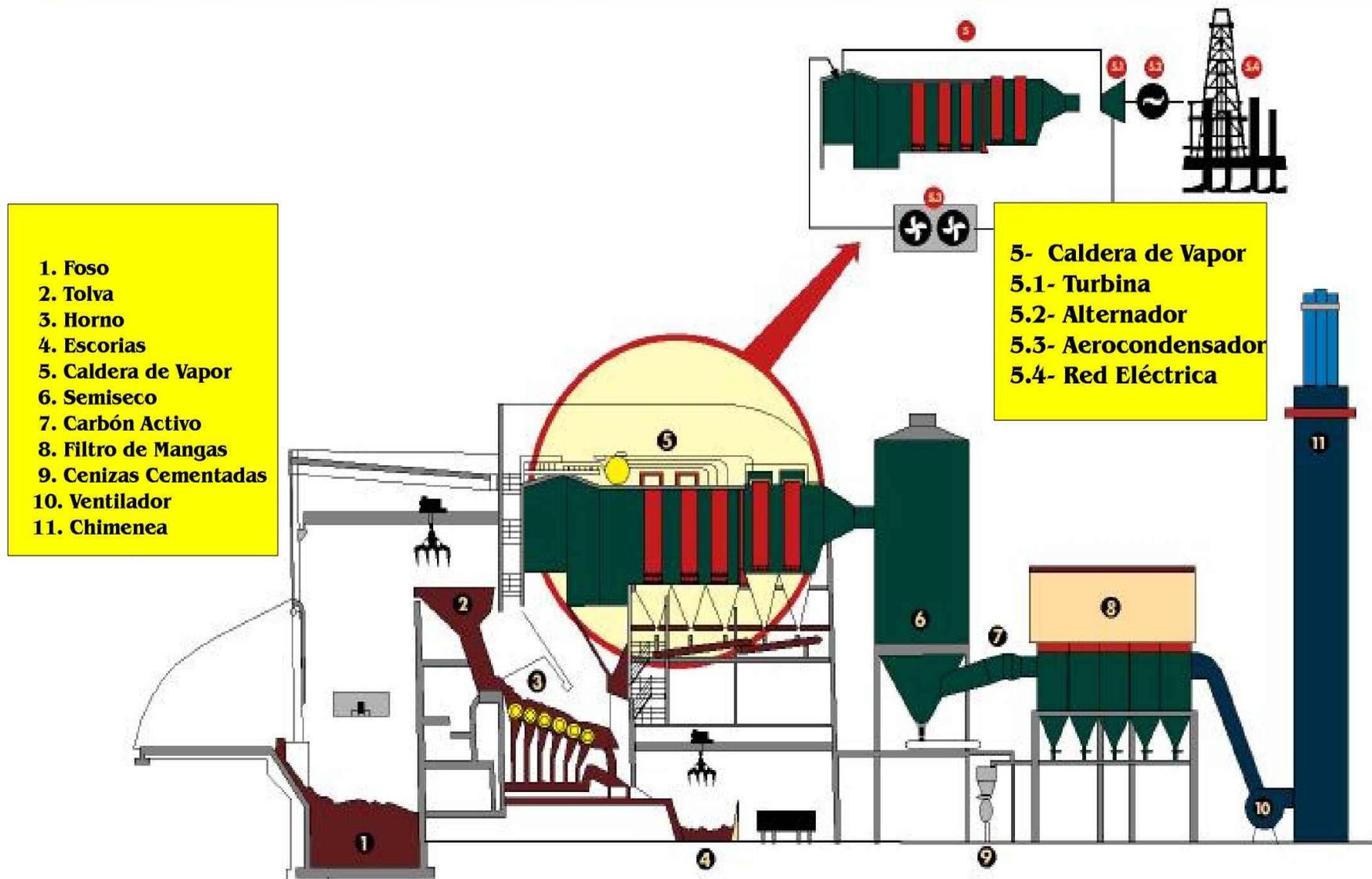
La valorización energética:

- es un proceso de combustión de los residuos a temperaturas superiores a 850 °C [RM] con un exceso de oxígeno del 6% con respecto al estequiométrico, resultando un proceso exotérmico, que permite recuperar el poder calorífico del residuo en forma de calor actuando de forma equivalente a una central térmica

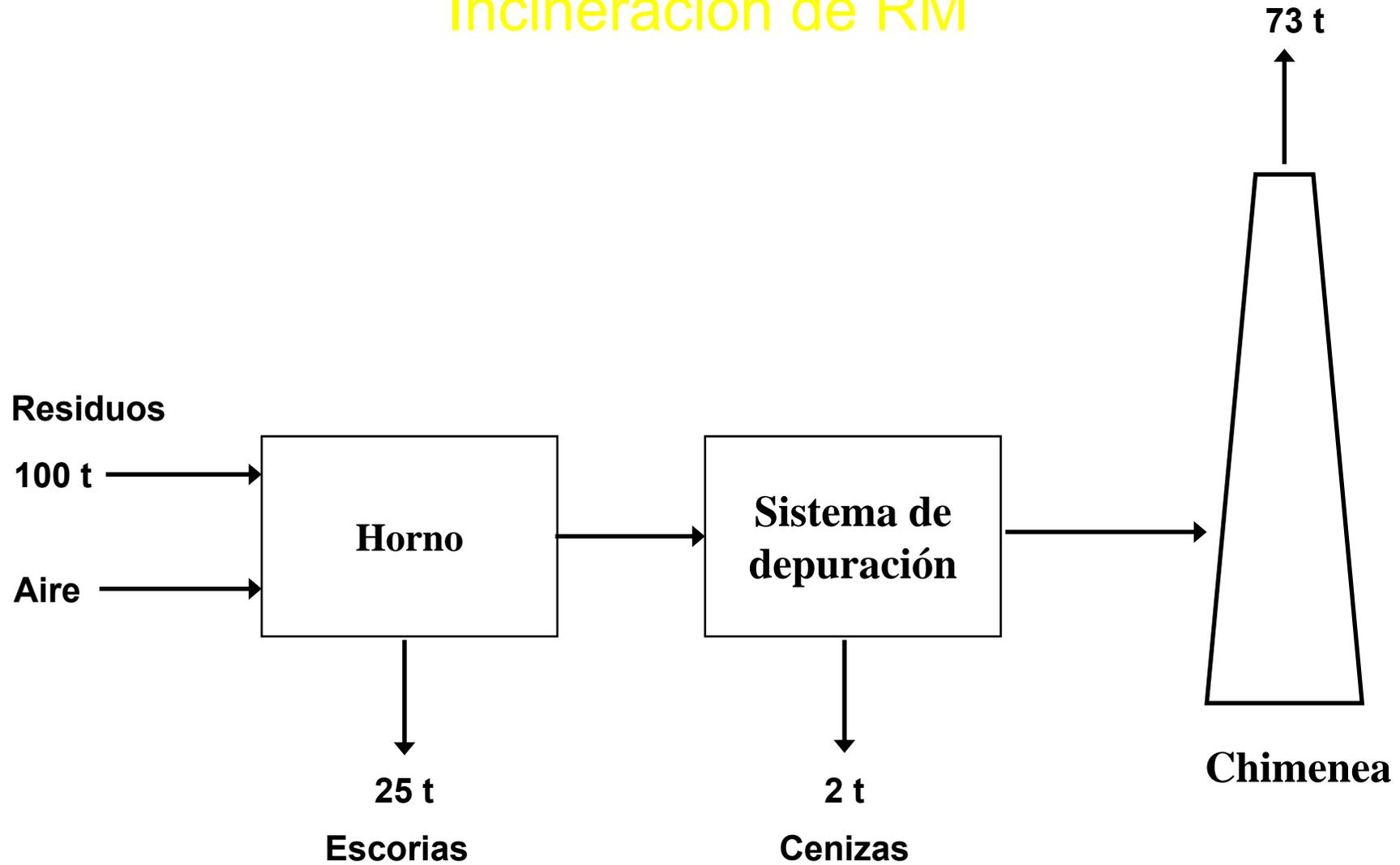
→ Nueva DIRECTIVA

*La cuestión no es solo ¿Qué quemamos?
Sino especialmente ¿Cómo lo quemamos?*

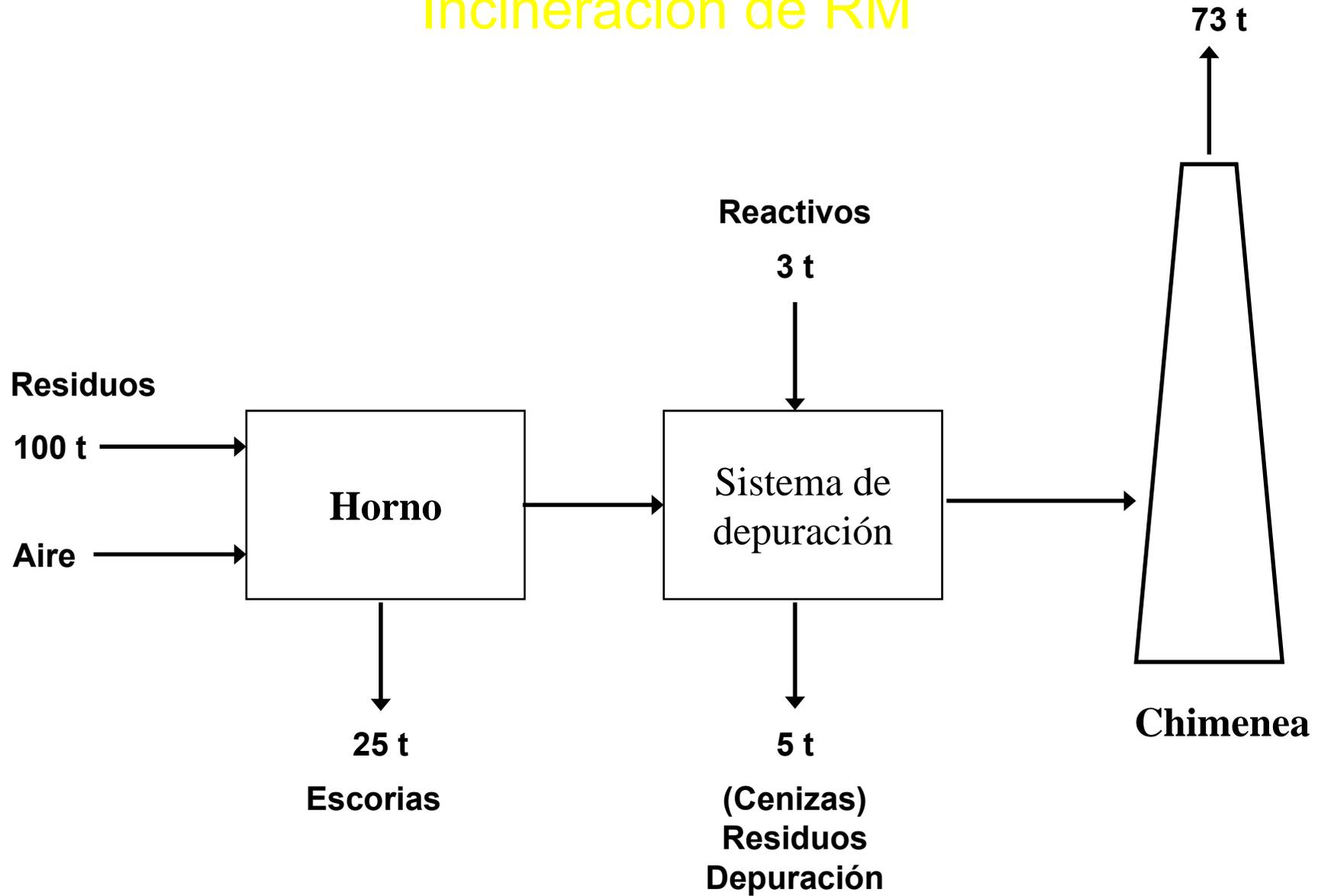
ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS. SON REUS



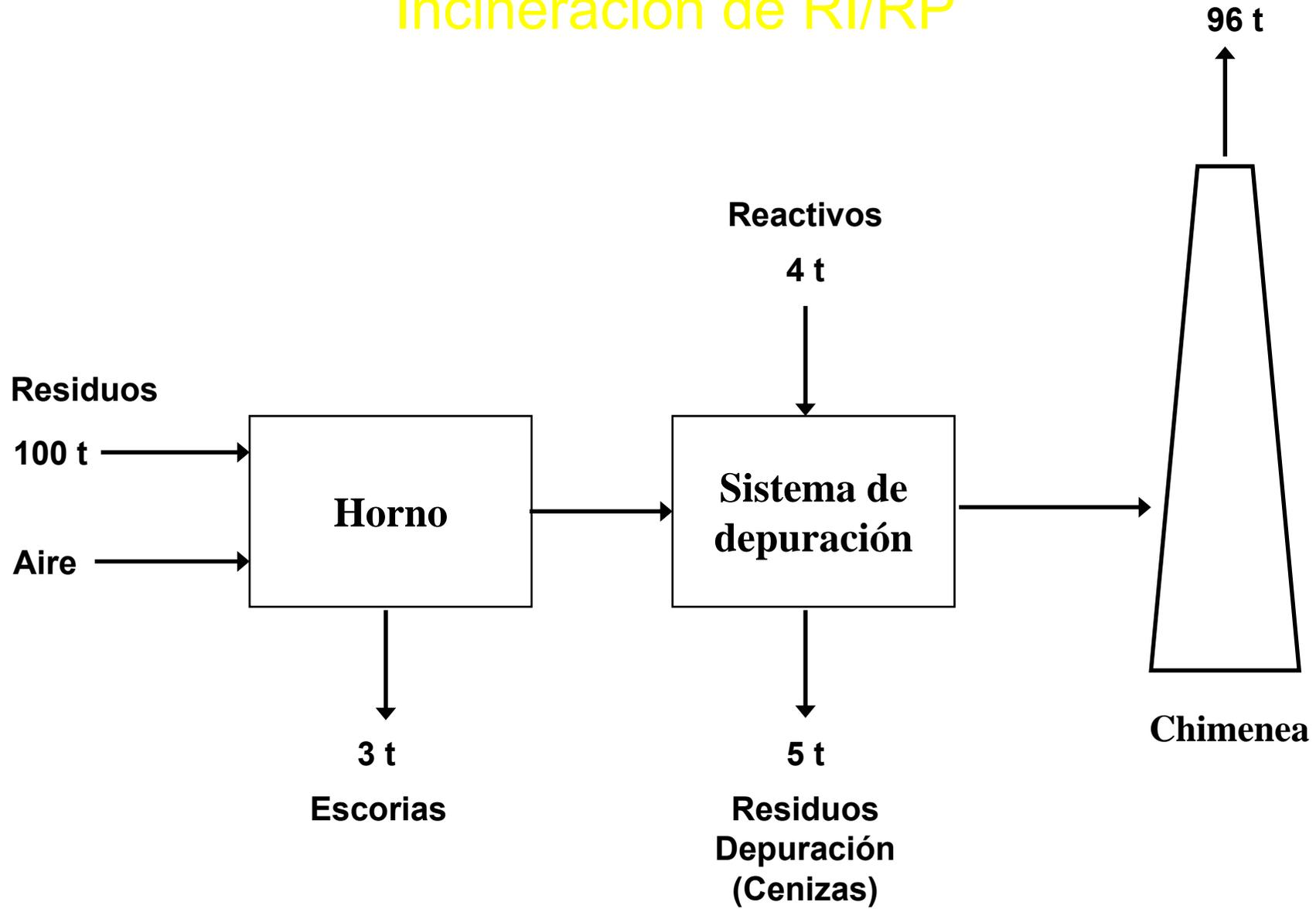
Incineración de RM



Incineración de RM



Incineración de RI/RP



Introducción – Objetivo y alcance – Metodología – Resultados – Conclusiones

Gestión de los residuos municipales en la Unión Europea

País	Reciclado, Compost y otros (% del total)	Vertedero (% del total)	Incineración (% del total)	kg/hab/día
Países Bajos	65	3	32	1,71
Austria	59	31	10	1,72
Alemania	58	20	22	1,64
Bélgica	52	13	35	1,28
Suiza	41	14	45	1,27
Dinamarca	41	5	54	1,91
Luxemburgo	36	23	41	1,83
España	35	59	6	1,81
Irlanda	31	69	0	2,38
Italia	29	62	9	1,25
Finlandia	28	63	9	1,25
Francia	28	38	34	1,55
Reino Unido	18	74	8	1,64
Grecia	8	92	0	1,19
Portugal	3	75	22	1,19

Fuente: IPPR, 2006

- 1874, Nottingham. Primer “destructor” de residuos municipales
- 1921, EE.UU: 200 unidades de incineración instaladas
- A finales de 1980 se desarrollan mejores sistemas de combustión, de control y tratamiento de los gases de combustión:
 - Sistema ambientalmente seguro.
 - Mejores rendimientos energéticos de funcionamiento
- En la actualidad, la incineración es ampliamente utilizada en Europa
- 2006, España: el 6% de los RM fueron incinerados.

Incidencia de la recogida selectiva en los sistema de tratamientos de RM

	<i>Compostaje/ Metanización</i>	<i>Incineración</i>	<i>Vertedero</i>
<i>Materia Fermentable</i>	Su razón de ser	+	+
<i>Vidrio</i>	+	+	+
<i>Plásticos</i>	+	-	+
<i>Papeles</i>	+	-	+
<i>Metales</i>	+	+	+
<i>Otros (medicinas, etc.)</i>	+	+	+

Legislación sobre incineración de residuos

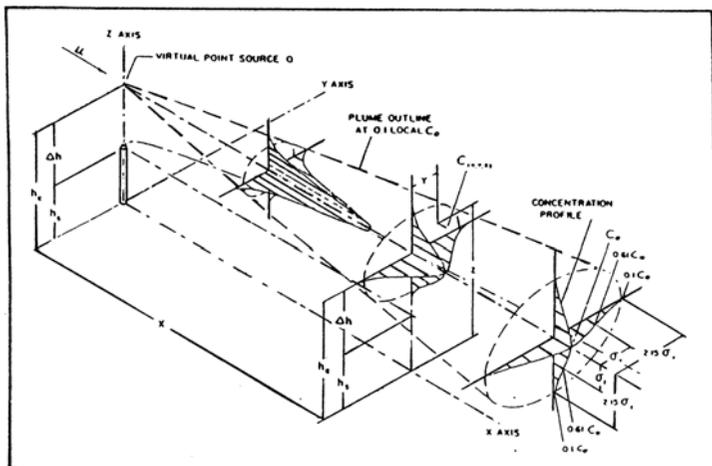
	75	//	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08		
Alemania			Ley 1987			Rev.1991						Rev. 1997														
UE					Dir 89/363 RM (6'89)					Dir 94/67 RP (12'94)						Dir 2000/76 RM + RP (28.12.00) '02 nuevas → '05 existentes										
España	D 833/75 (RS)						RD 1088/92 (9'92) RM					RD 1217/97 RP (+RM)					RD 653/2003 (RM+RP)									

Introducción – Objetivo y alcance – Metodología – Resultados – Conclusiones

Tabla comparativa de las emisiones (mg Nm^{-3}) de una incineradora representativa del año 2004 y 2006 frente a los valores límite establecidos por la legislación vigente (AEVERSU, 2004; 2006; Baldasano y Passola, 2006).

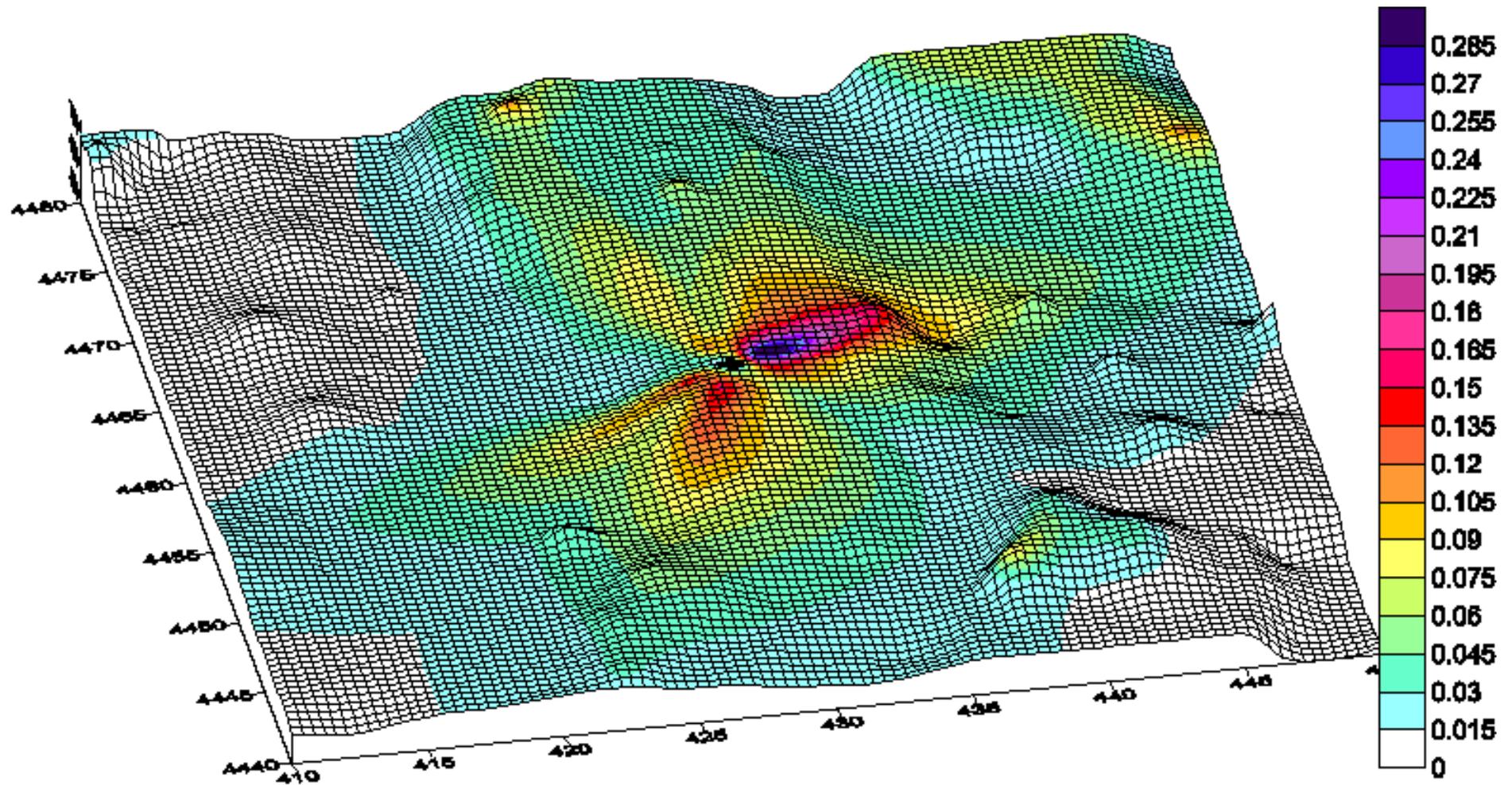
mg Nm^{-3}	PST	SO ₂	NO _x	CO	HCl	COVNM
Emisión límite según Real Decreto 1088/92 (89/369/CE)	30	300	-	100	50	-
Emisión representativa de las incineradoras en 2004	10	15	150	20	16	5
Emisión límite según Real Decreto 653/2003 (2000/76/CE)	10	50	200	50	10	-
Emisión representativa de incineradoras en 2006	5	20	140	20	8	5

Estudio teórico de dispersión atmosférica

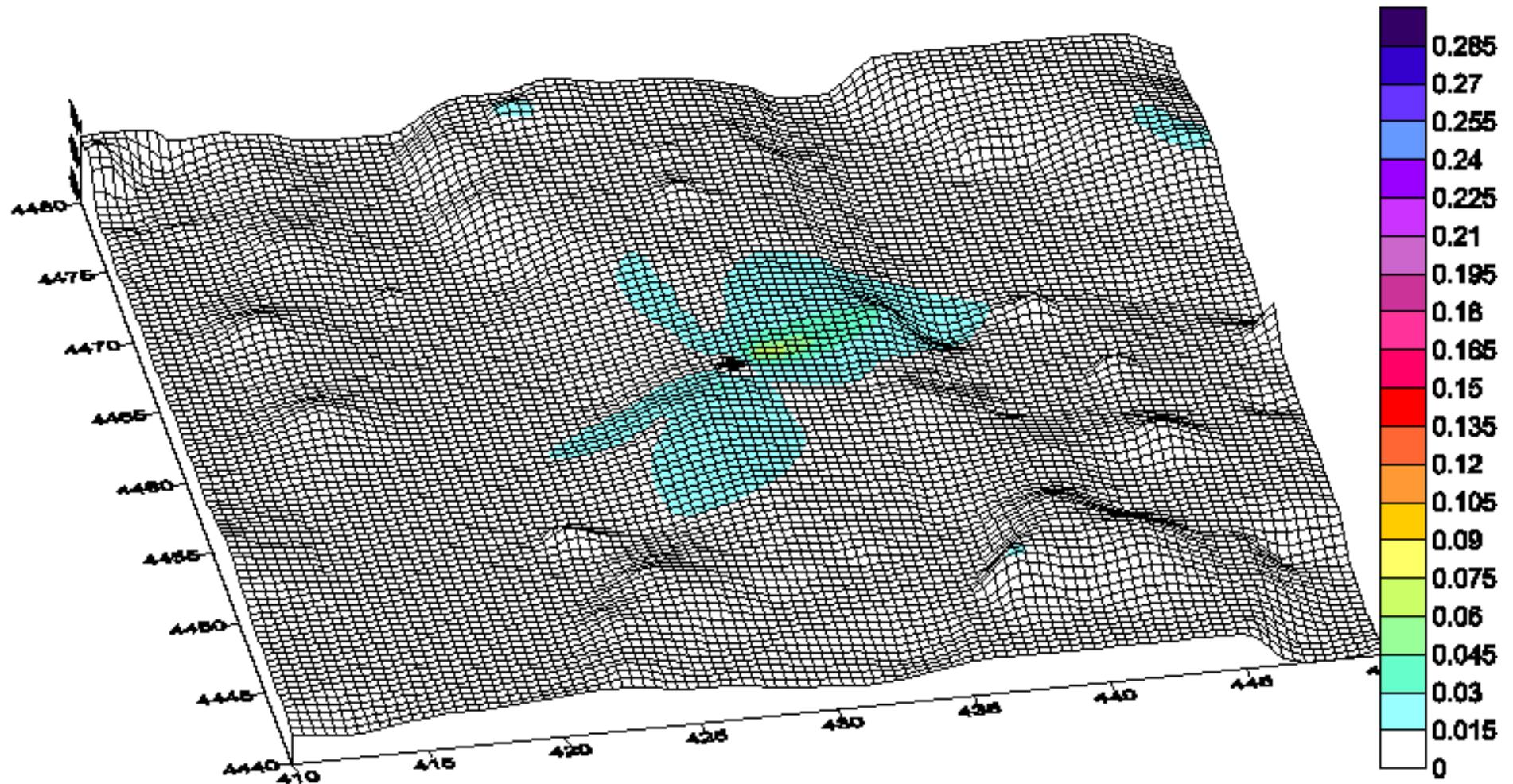


Capacidad	1000	t/día
Caudal	208300	Nm ³ /h
Temp. Emisión	157	°C
Caudal	328000	m ³ /h
Velocidad emisión	12	m/s
Altura chimenea	40	m
Diámetro	3.1	m

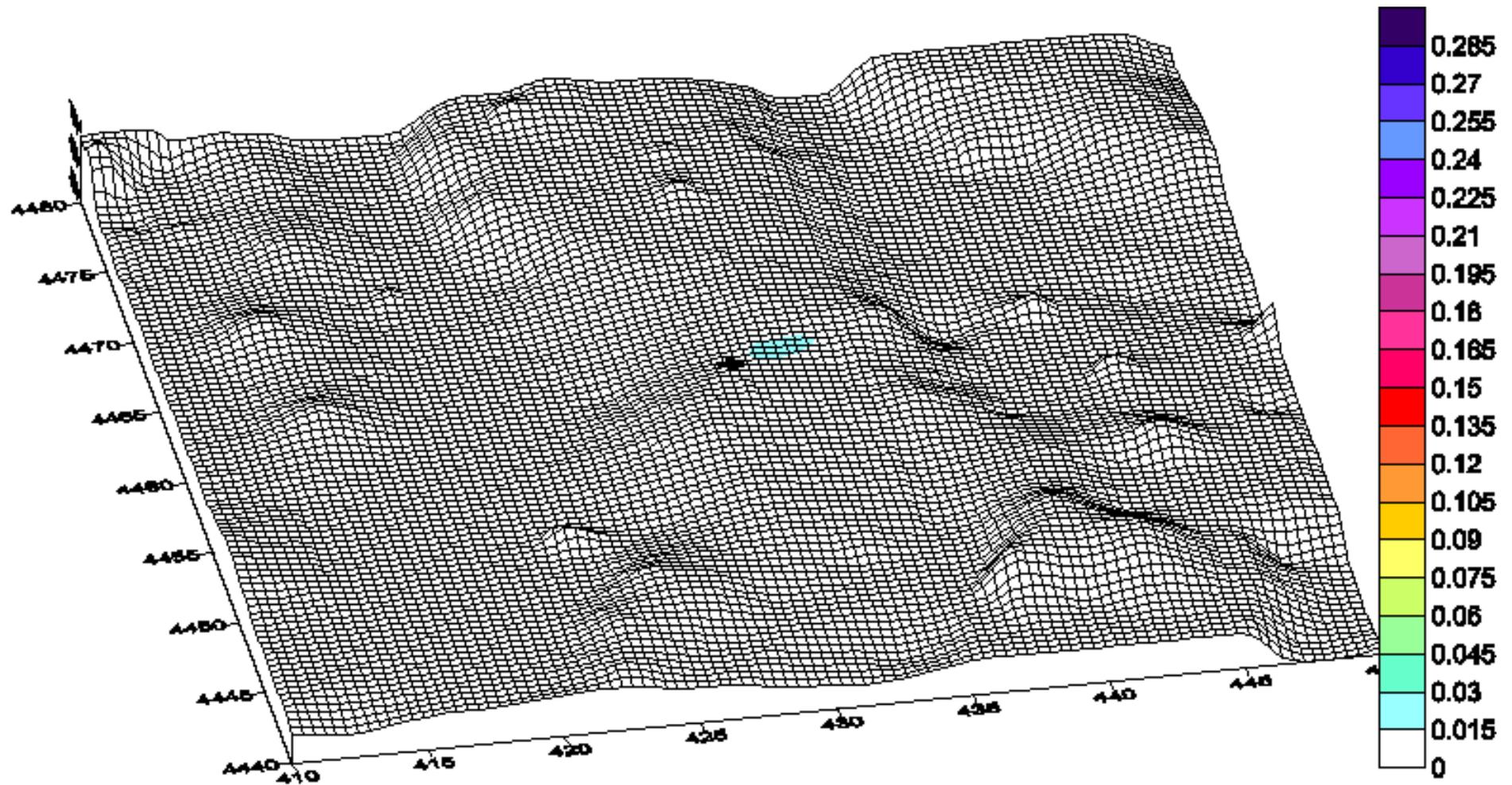
Legislación Española 1975: límite de emisión PST 150 mg/m³



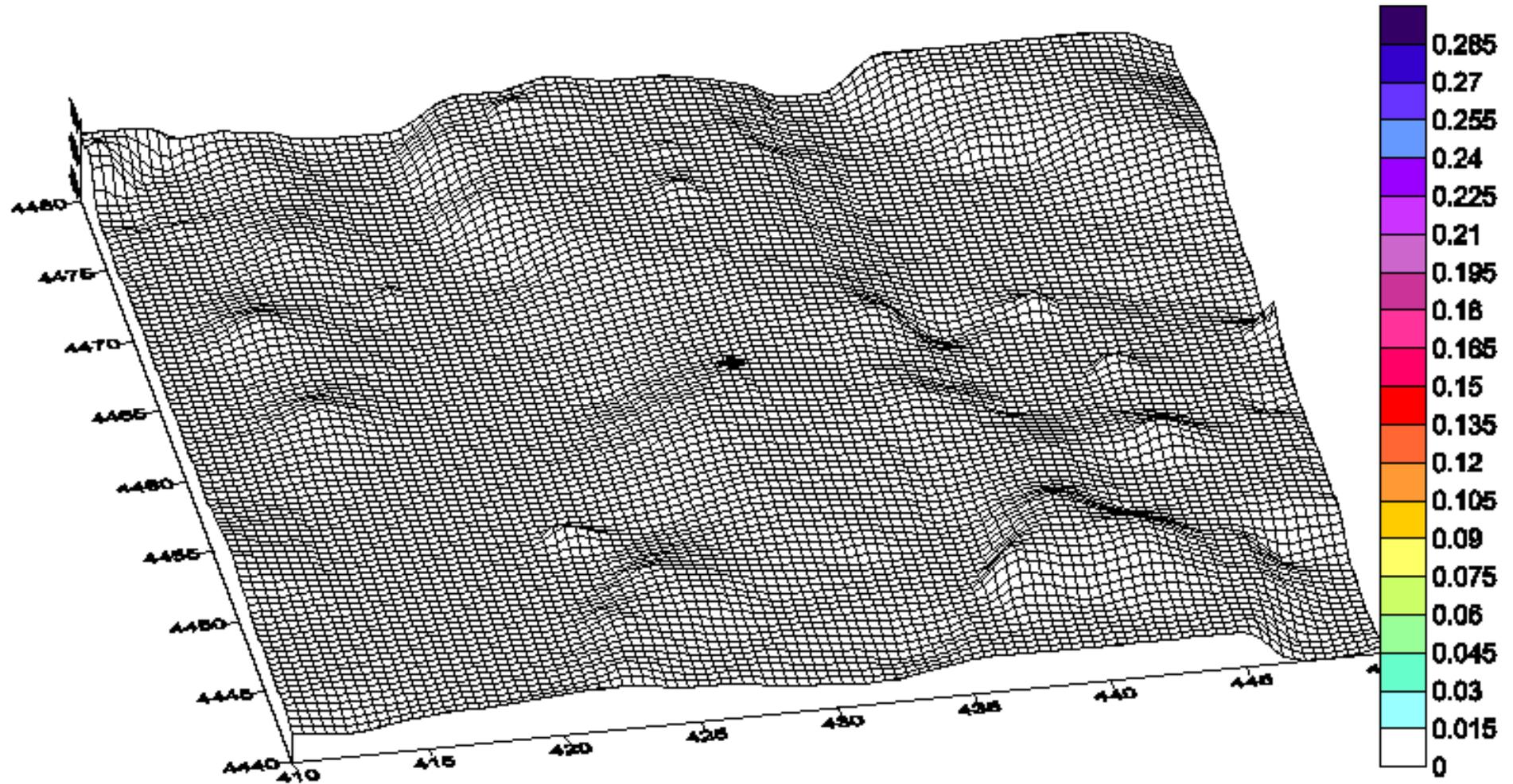
Legislación de la Unión Europea 1989: límite de emisión PST 30 mg/m³



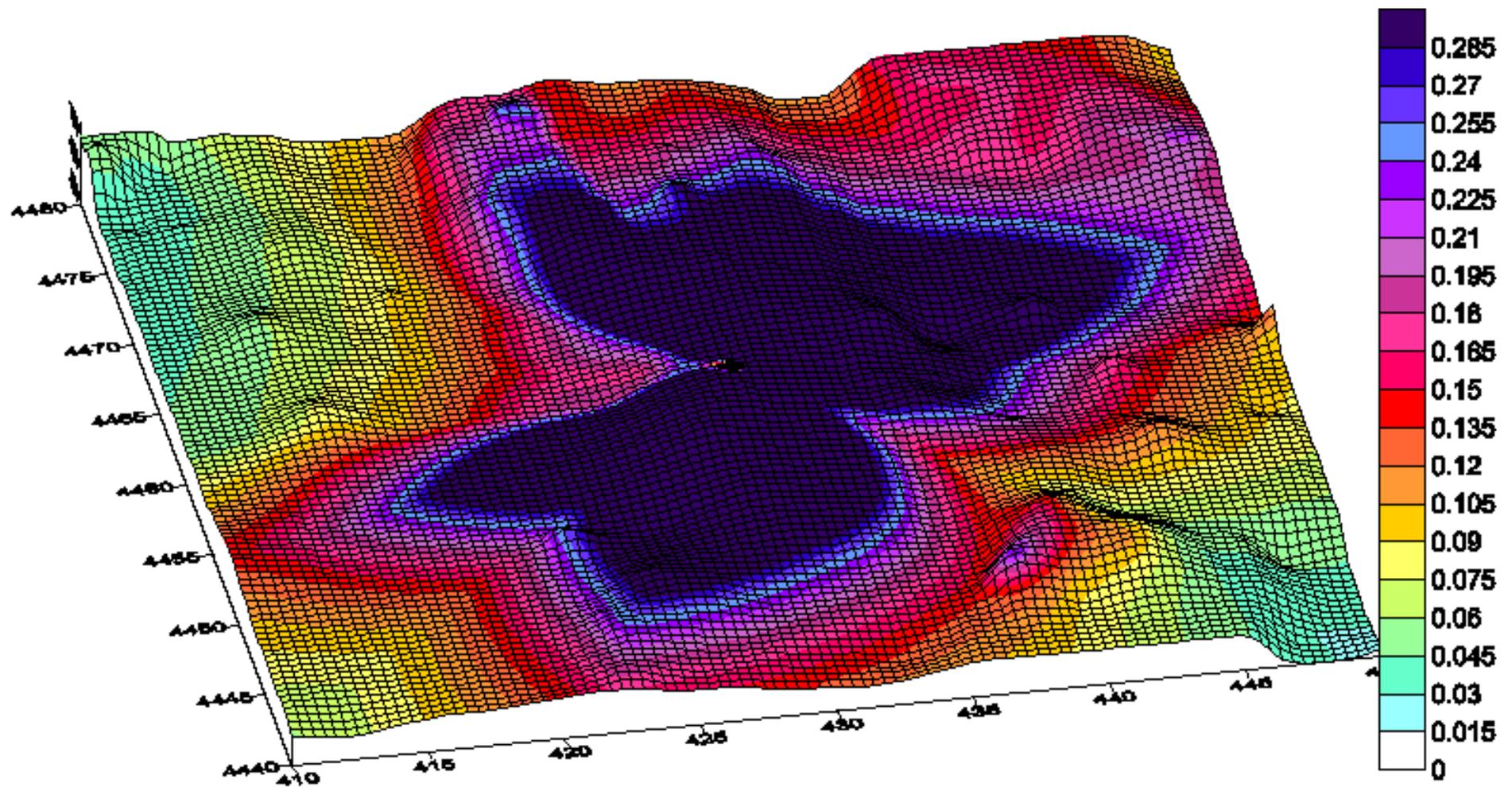
Legislación de la Unión Europea 2000: límite de emisión PST 10 mg/m³



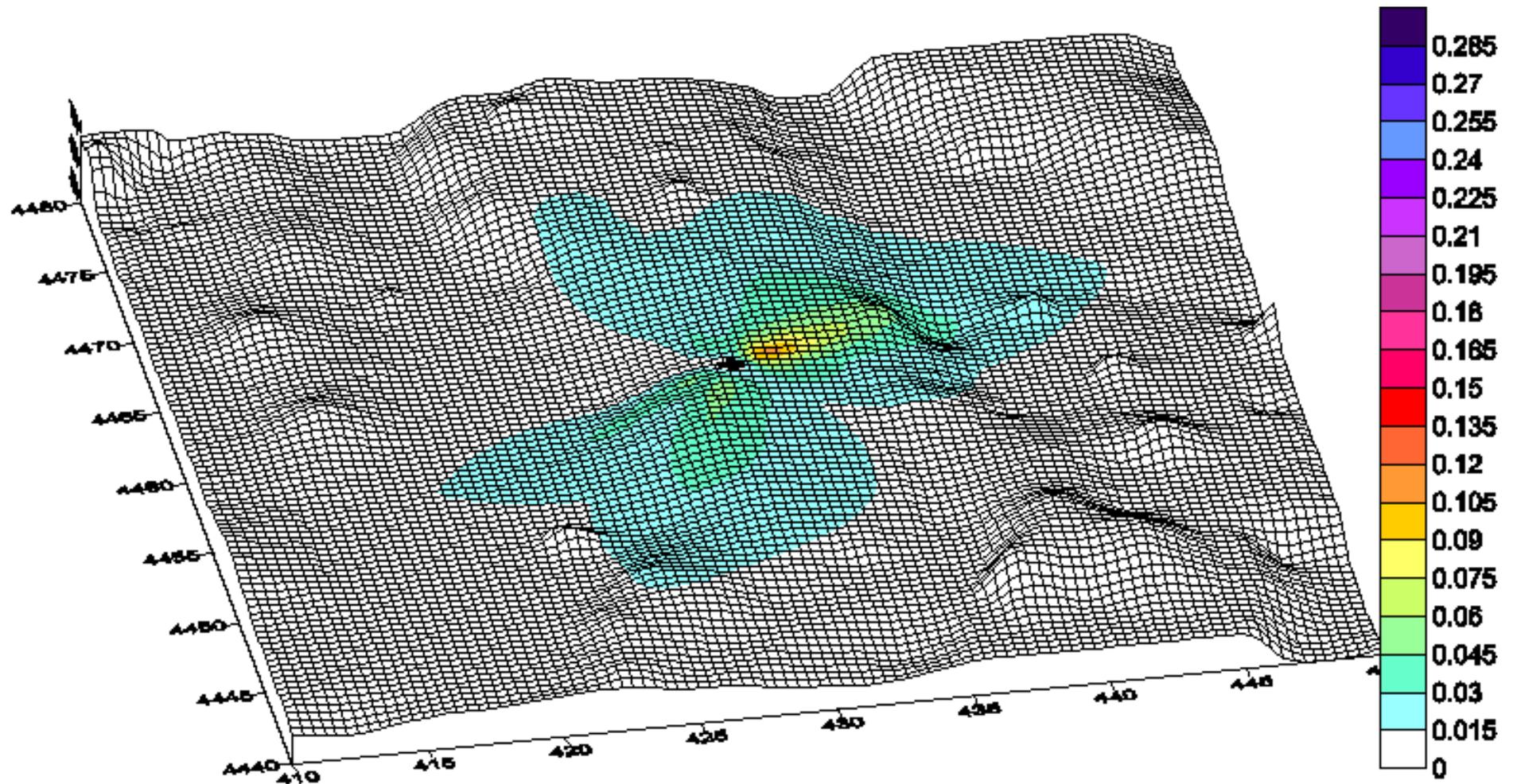
Tecnología actual: emisión PST 5 mg/m³



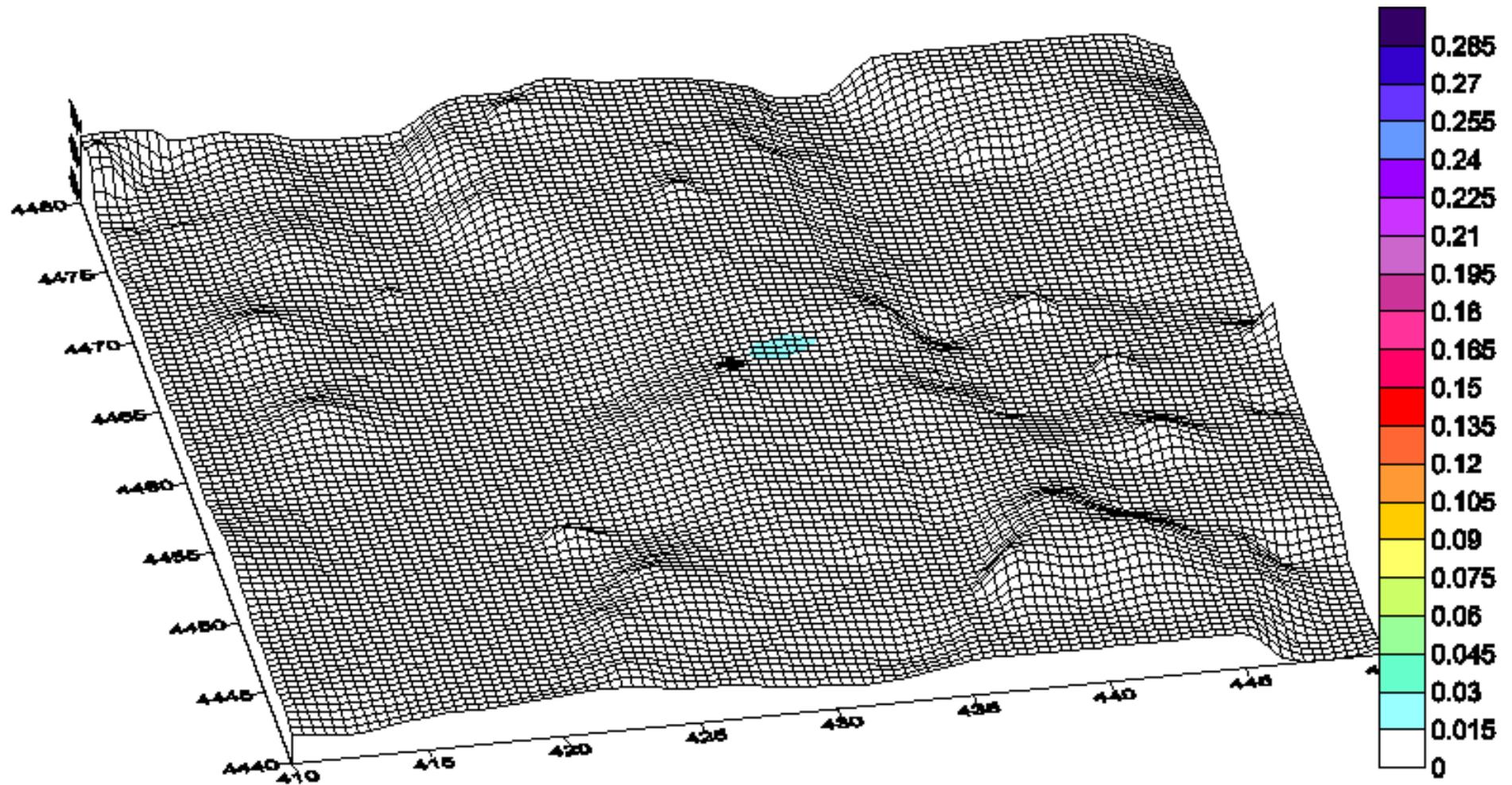
Legislación Española 1975: emisión HCl 1000 mg/m³



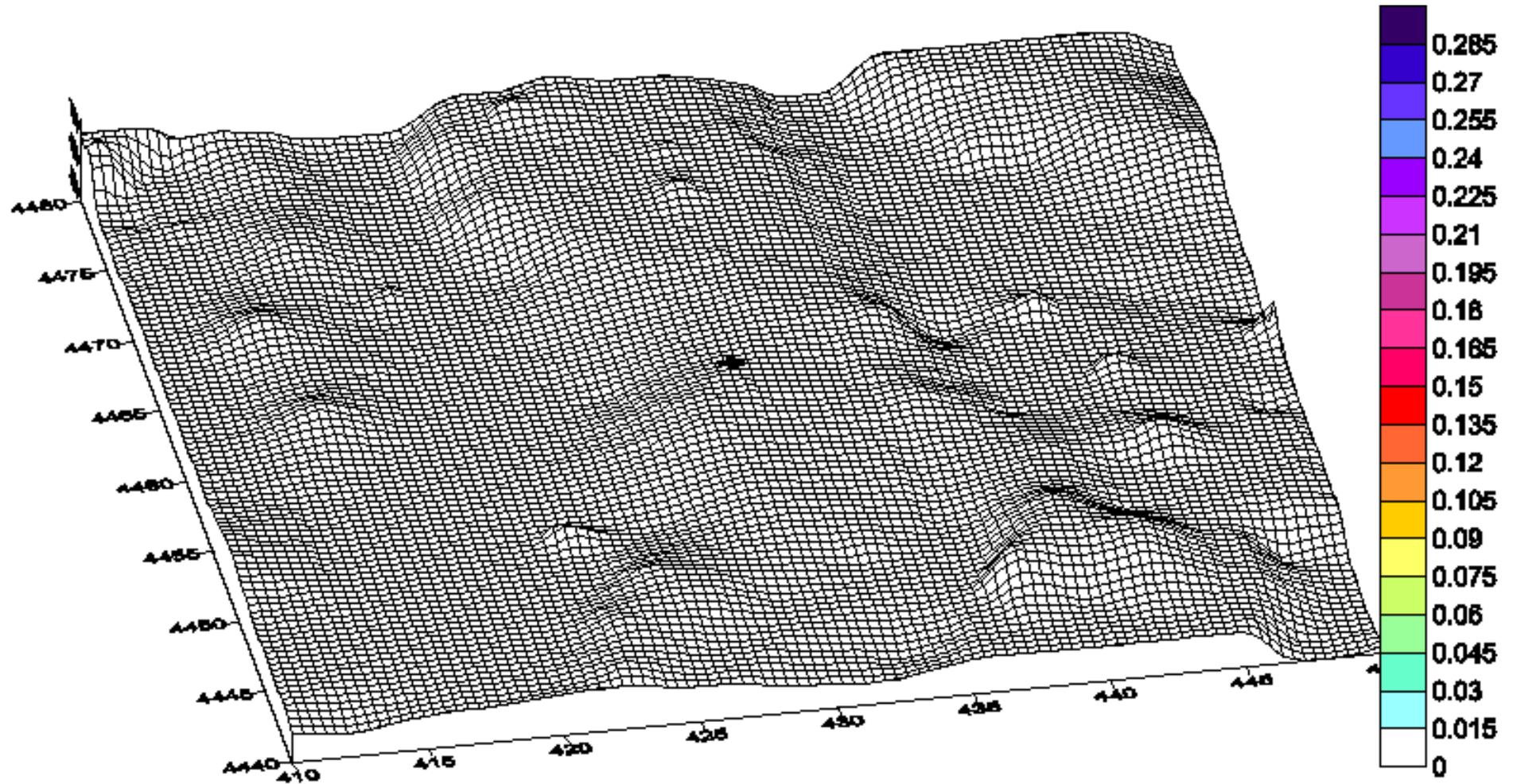
Legislación de la Unión Europea 1989: límite de emisión HCl 50 mg/m³



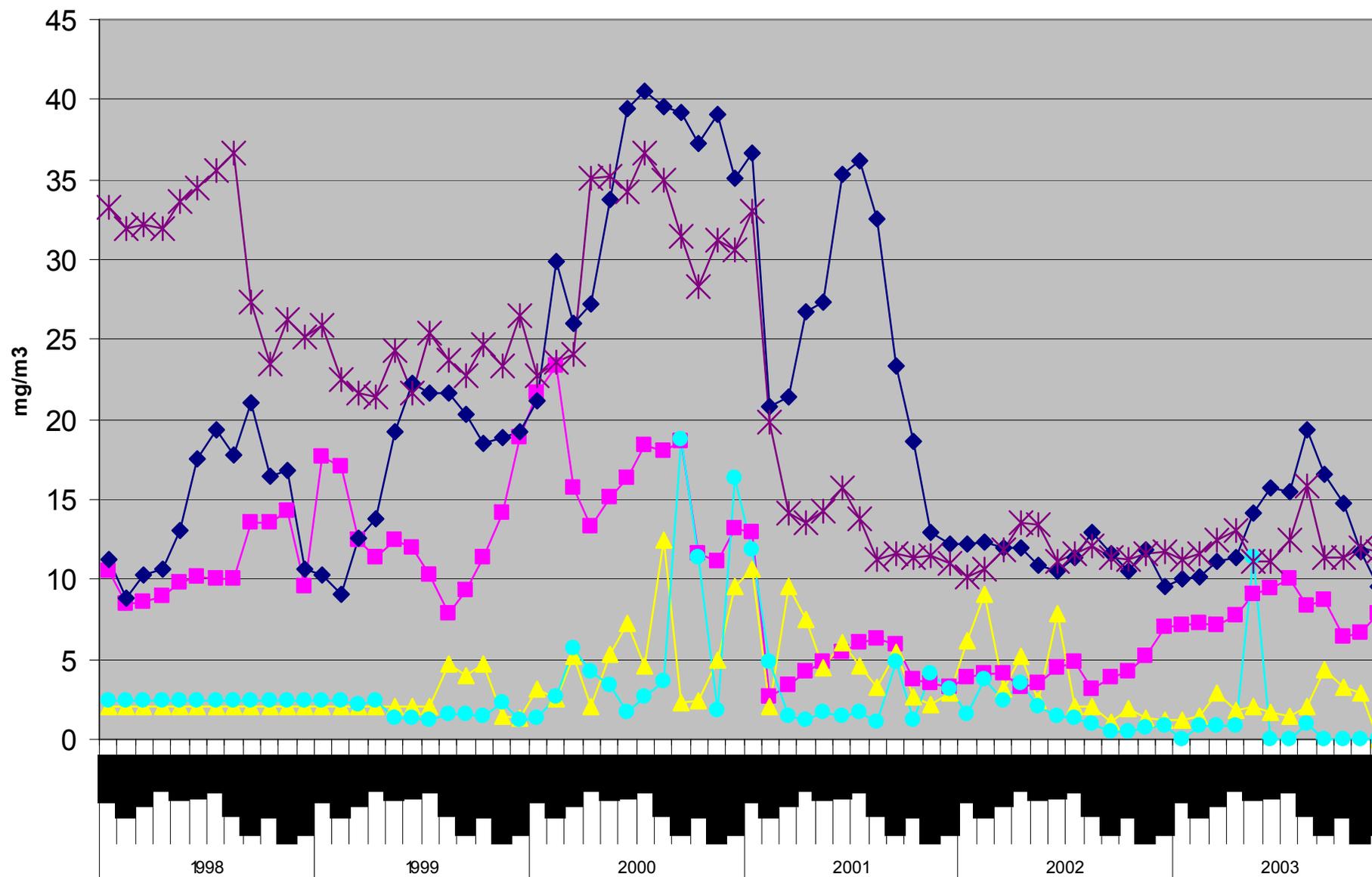
Legislación de la Unión Europea 2000: límite de emisión HCl 10 mg/m³



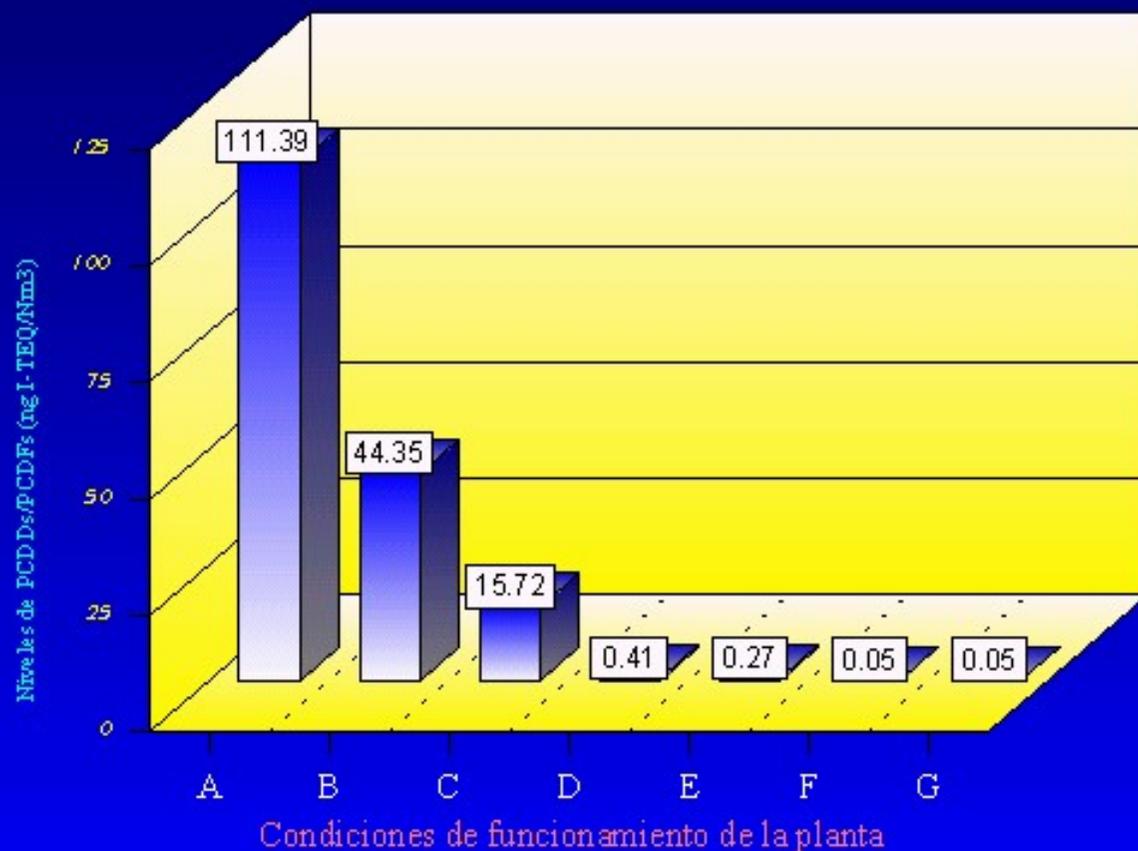
Tecnología actual: emisión HCl 5 mg/m³



EMISIONES MENSUALES (1998, 1999, 2000, 2001, 2002 y 2003)

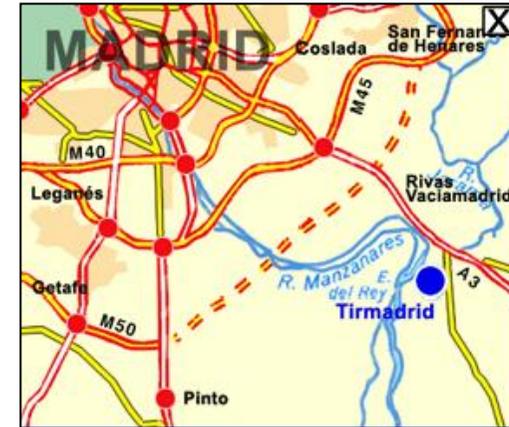


Adaptación de sistemas de depuración de gases adecuados en plantas incineradoras en funcionamiento



- A. Precipitador electrostático.
- B. Salida del precipitador electrostático.
- C. Precipitador electrostático, absorbentes y filtros de mangas (sin adición de carbón)
- D. Absorbentes, filtros de mangas en funcionamiento (sin carbón ni precipitador)
- E. Repetición de D.
- F. Absorbentes, filtros de mangas e inyección de carbón activo (sin precipitador electrost.)
- G. Repetición de acuerdo con condiciones F

Ficha Técnica	
Datos de la Instalación	
Nombre:	TIRMADRID
Municipio/Provincia/CC.AA:	Madrid/Madrid/Madrid
Longitud:	-3.60087057
Latitud:	40.33539939
Web:	
Puesta en marcha:	1997
Cierre:	
Características de la instalación	
Capacidad (t/día):	660,24
Nº Hornos:	3
Capacidad por horno (t/h):	9,17
Sistema de depuración:	
Ciclones, abasorbentes, filtro de mangas, inyecciones de carbón activo y catalizadores	
Características de la chimenea	
Altura de la chimenea (m):	60
AyD_R/E:	
Cte Comb Nm ³ /h RSU :	5,500
Q _{CN} Nm ³ /h :	183,129
T emisión (°C) :	145
Q Temisión (m ³ /h) :	280,396
Velocidad emisión (m/s):	13,4
Diámetro equivalente (m) :	2,7
Diámetro real (m) :	

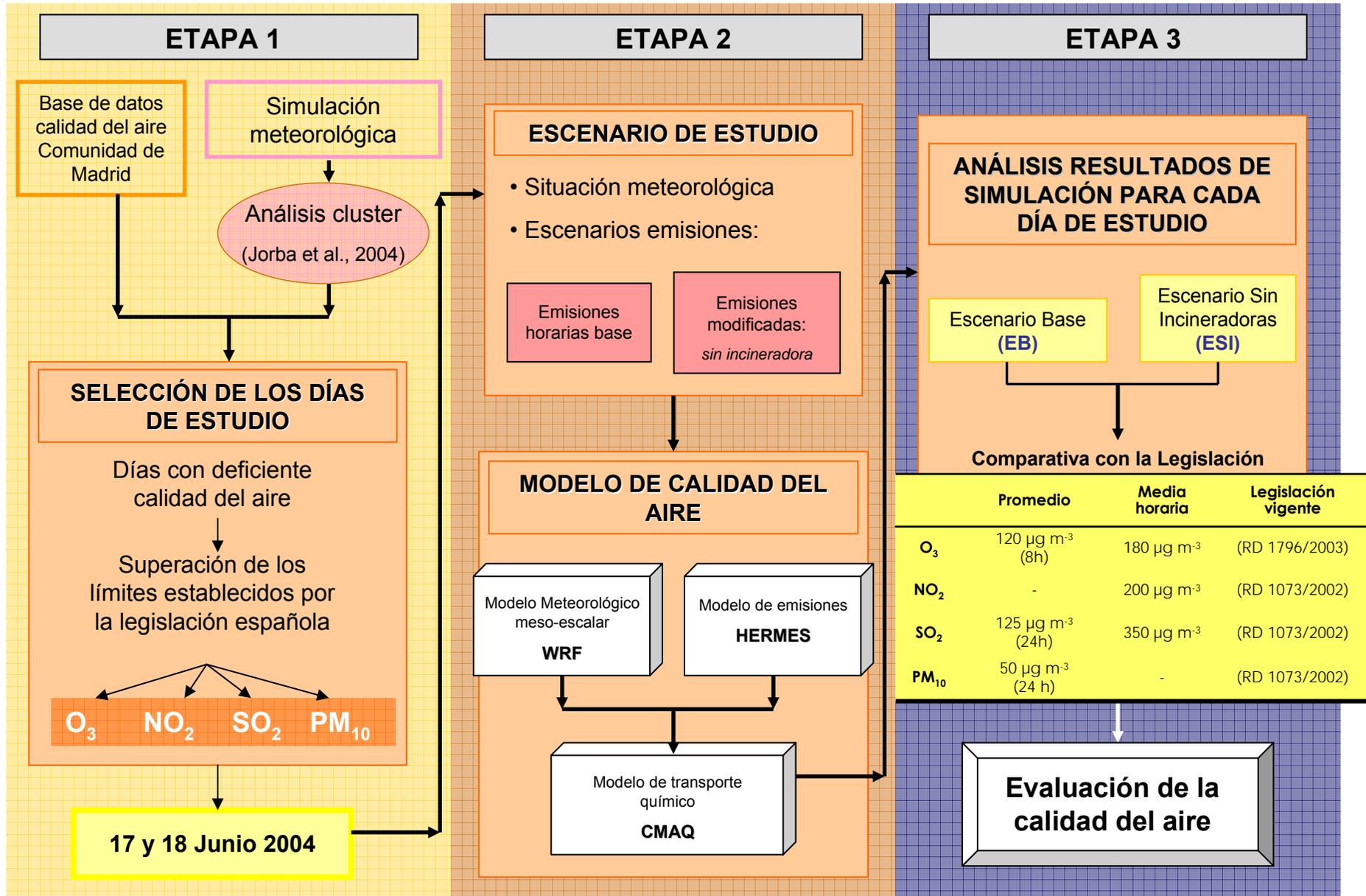


Residuos incinerados (t)		
2004	2005	2006
291,675	285,035	284,335

Emisiones a la atmósfera						
	V.L. 89/369/CE Real Decreto 1088/92	Emisión-04'	V.L. 89/369/CE Real Decreto 1088/92	Emisión-05'	V.L.-06' 2000/76/CE Real Decreto 653/2003	Emisión-06'
HCl (mg/Nm ³)	50	11.2	50	12.6	10	4.3
Partículas (mg/Nm ³)	30	8.8	30	5.3	10	1.6
CO (mg/Nm ³)	100	14.9	100	18.6	50	17.9
HF (mg/Nm ³)	2	0.03	2	0.02	1	0.02
SO ₂ (mg/Nm ³)	300	<0.5	300	<0.5	50	0.05
Pb+Cr+Cu+Mn (mg/Nm ³)	5	0.1	5	0.047		
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V					0.5	<0.0137
Ni+As (mg/Nm ³)	1	0.002	1	0.004		
Cd+Hg (mg/Nm ³)	0.2	0.004	0.2	0.001		
Cd+Tl					0.05	<0.0116
COT (mg/Nm ³)	20		20		10	
COV (mg/Nm ³)	20	1.8	20	2	10	0.5
Hg					0.05	0.001
Dioxinas y Furanos (mg/Nm ³)	0.1	0.005	0.1	0.06		0.008
NOx (mg/Nm ³)					400	127.2

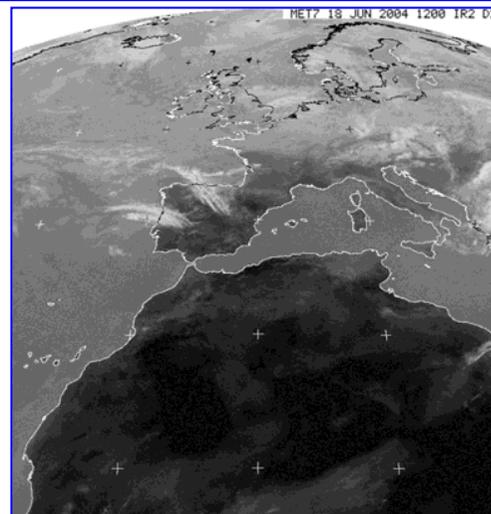
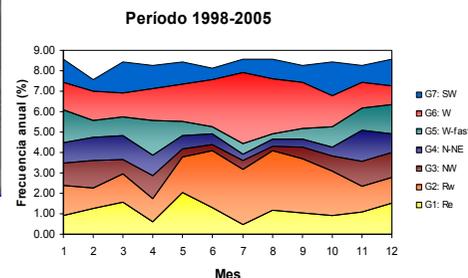
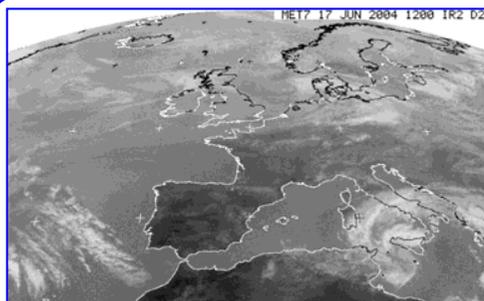
Objetivos

- Evaluar el impacto sobre la calidad del aire de la incineradora de Tirmadrid utilizando técnicas avanzadas y actuales “estado del conocimiento” de modelización atmosférica.
 - Determinar cuál es la contribución de dicha incineradora a los valores de inmisión de calidad del aire y evaluar sus efectos.
-



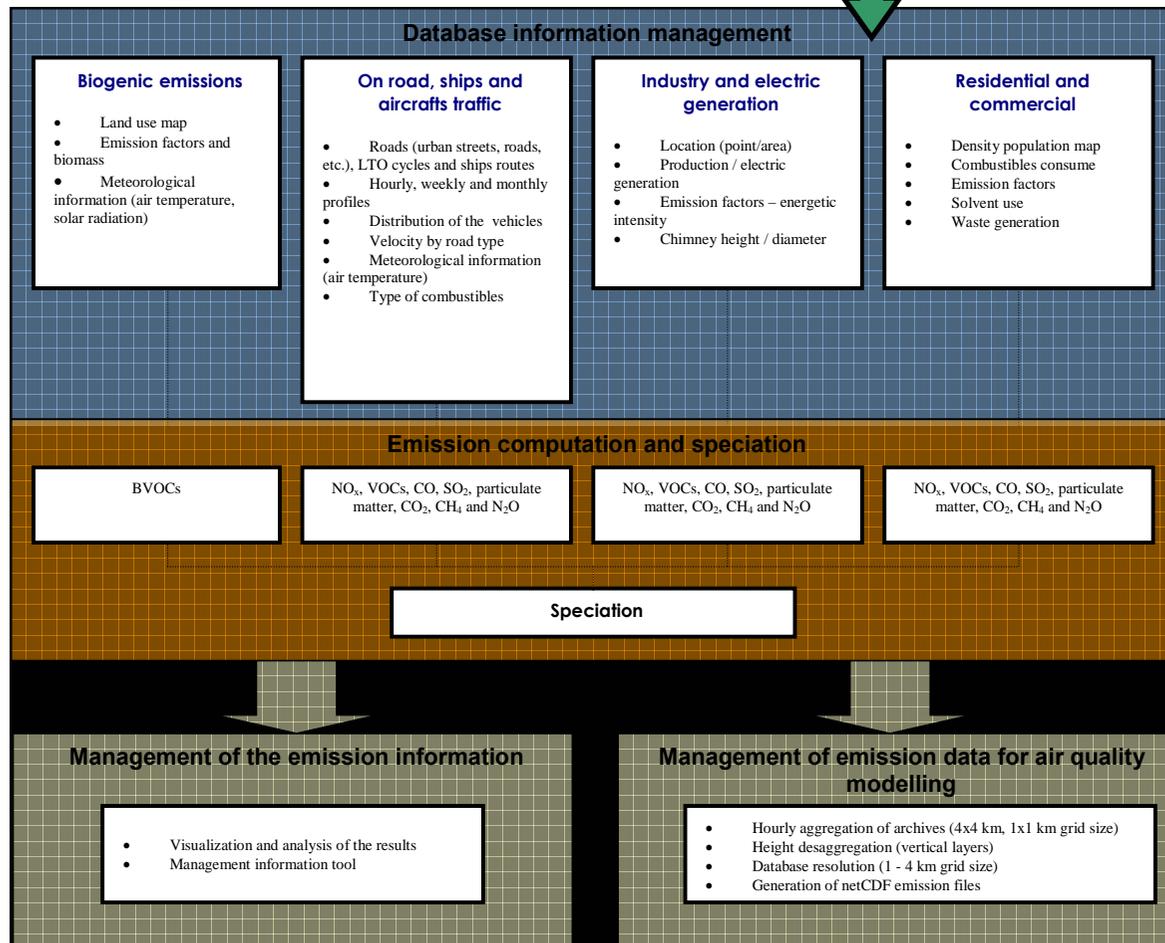
SELECCIÓN DE LOS DÍAS DE ESTUDIO

- Año de referencia **2004**.
- **Base de datos de calidad del aire:** Red de calidad del aire de la Comunidad de Madrid
- **Simulación meteorológica:** *Análisis cluster* (Jorba et al., 2004): selección objetiva del escenario meteorológico representativo de la zona de estudio.
- **Criterio de selección:** superación de los valores límites de calidad del aire establecidos por RD 1073/2002 y RD 1796/2003 .



17 y 18 de junio de 2004

- Bajo gradiente bórico con dominio de fenómenos mesoescalares
- Situación meteorológica representativa del 78% de los días de verano en costa Mediterráneo
- Superaciones en una o varias estaciones del “Umbral de Información a la Población (UIP)” de O_3 (RD 1796/2003)



HERMES2004: High-Elective Resolution Modelling Emission System

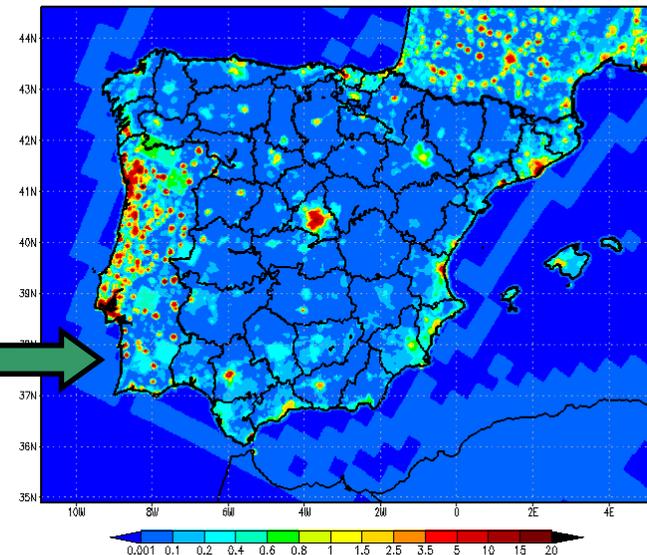


Development of a high-resolution (1 km × 1 km, 1 h) emission model for Spain: The High-Elective Resolution Modelling Emission System (HERMES)

José María Baldasano^{a,b,*}, Leonor Patricia Güereca^a, Eugeni López^a, Santiago Gassó^{a,b}, Pedro Jimenez-Guerrero^a

^a Earth Sciences Department, Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS), Barcelona, Spain
^b Project Engineering Department, Technical University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain

BSC-ES/HERMES Emissions VOCs (kmoles/h)
 Emissions for 00z 31 MAR 08 – Iberian Peninsula Res:4x4km



ESCENARIOS DE ESTUDIO: Modificación del escenario de emisiones (resolución 1 km², 1hr)

- **Escenario Base (EB):**

emisiones del 2004 contabilizadas en **HERMES** existentes en el entorno del dominio de trabajo

- **Escenario Sin Incineradora (ESI):**

emisiones del EB – emisiones de TIRMADRID

Estimación de las emisiones de incineradoras

Fijar Factor de Emisión (FE)

Estimar/Determinar Factor de Actividad (FA)

Emisiones por foco

$$E = FA \times FE$$

Factores de emisión

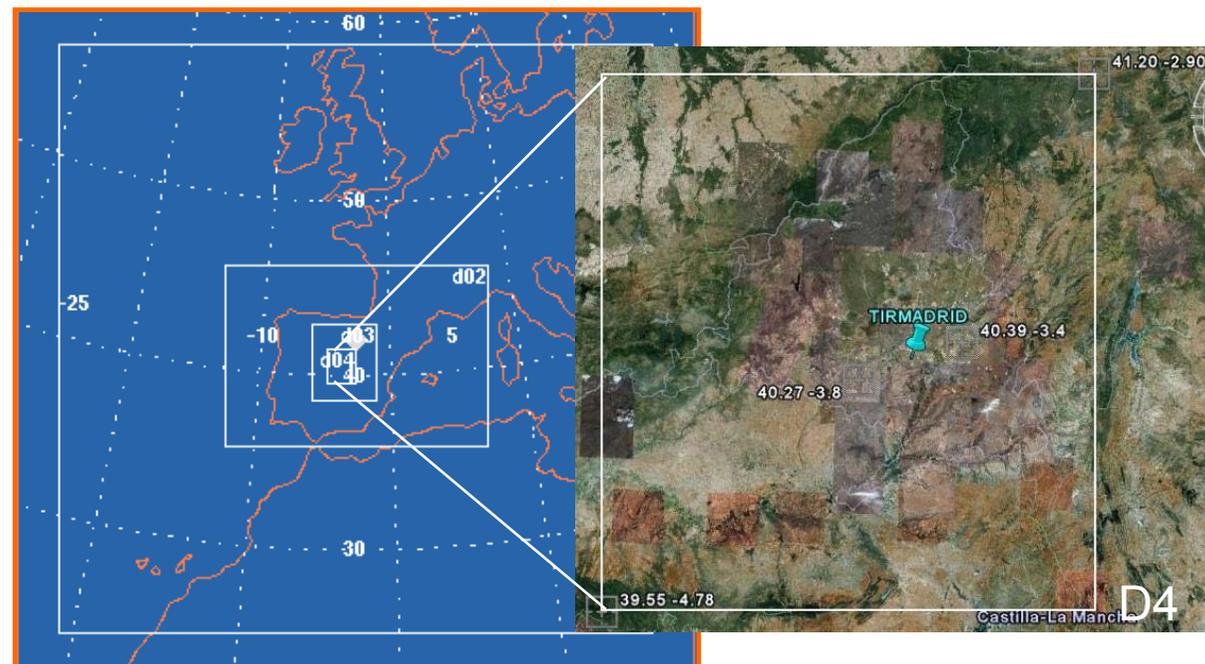
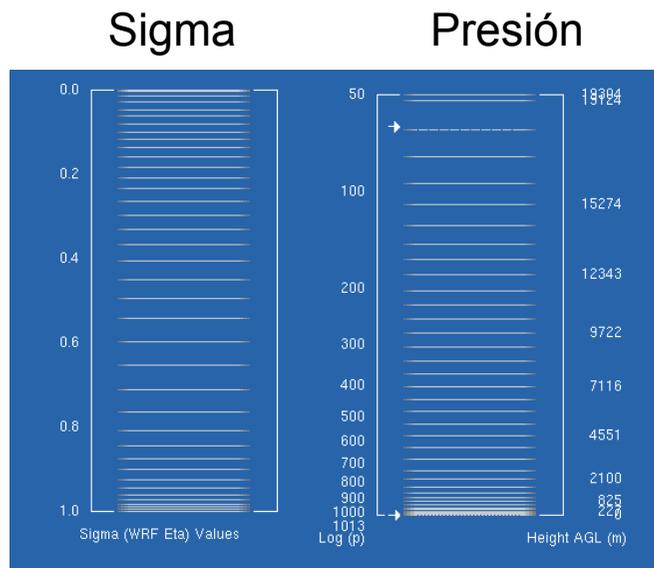
	FE	Unidades
NO _x	0.750	kg/t RSU
SO ₂	0.075	kg/t RSU
PTS	0.050	kg/t RSU

Emisiones para Tirmadrid en 2004

Residuos incinerados en 2004 (t)	Capacidad (t día ⁻¹)	NO _x (kg a ⁻¹)	SO ₂ (kg a ⁻¹)	PST (kg a ⁻¹)
291,675	660,24	218,756	21,876	14,584

CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE ALTA RESOLUCIÓN: WRF-HERMES-CMAQ

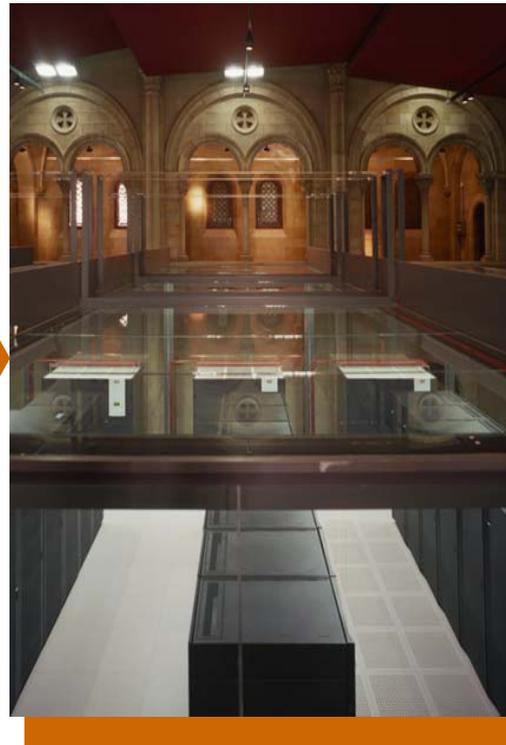
- Dominios de trabajo para Madrid: 4 dominios con anidamiento one-way:
 - **D4**: 181 x 214 a 1 km.
- Configuración vertical:
 - 38 niveles verticales **sigma**, atmósfera en **50 hPa**.
- Inicialización NCEP/GFS GRIB2 0.5°



“Mare Nostrum”

WRF-HERMES-CMAQ

- Simulación EB
- Simulación ESI



Análisis de
resultados

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

1. Validación de la simulación para el **EB**.
 2. Descripción de la dinámica de contaminantes
(**CICLO DIARIO: 17-18 Junio 2004**)
 3. Análisis **cualitativo** de los escenarios **EB** y **ESI**:
comparación de mapas (valores máximos horarios, medios diarios y medios octo-horarios para O₃)
 4. Análisis **cuantitativo** de los escenarios **EB** y **ESI** :
resultados numéricos (valores máximos horarios, medios diarios y medios octo-horarios para O₃)
-

VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN

- **Dominio de validación:** Madrid
- **Datos de calidad del aire de las estaciones:** Getafe, Coslada, Majadahonda.
- **Criterios de validación:**
 - Directrices de la **US EPA** (1991, 2005):

Mean Normalized Bias Error (tendencia)

MNBE ±10-15%

$$MNBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\{C_p(x_i, t) - C_o(x_i, t)\}}{C_o(x_i, t)}$$

Mean Normalized Gross Error

MNGE +30-35%

$$MNGE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|C_p(x_i, t) - C_o(x_i, t)|}{C_o(x_i, t)}$$

Unpaired Peak Accuracy

UPA ±15-20%

$$UPA = \frac{C_p(x, t)_{\max} - C_o(x', t')_{\max}}{C_o(x', t')_{\max}} \times 100$$

- Guías establecidas en el **RD 1796/2003** (2002/3/CE) y **RD 1073/2002** (1999/30/CE)

Incertidumbre (%)	SO ₂ , NO ₂ y NO _x	PM	O ₃
	(1999/30/CE)	(1999/30/CE)	(2002/3/CE)
Media horaria	50-60		50
Máximo octo-horario			50
Media diaria	50		
Media anual	30	50	



Tabla resumen de los resultados de la validación del sistema de modelización WRF-HERMES -CMAQ en Madrid

	MNBE (%)	MNGE (%)	UPA (%)
Getafe			
Ozono (O ₃)	-3,96%	12,70%	-6,30%
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	-14,58%	26,75%	-5,88%
Dióxido de Azufre (SO ₂)	-20,02%	29,20%	-20,00%
Material particulado (PM ₁₀)	-10,33%	22,86%	-16,67%
Coslada			
Ozono (O ₃)	7,26%	13,95%	6,51%
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	-12,00%	33,41%	6,80%
Dióxido de Azufre (SO ₂)	-7,38%	27,67%	-18,18%
Material particulado (PM ₁₀)	19,56%	33,66%	15,42%
Majadahonda			
Ozono (O ₃)	-10,75%	12,74%	-10,32%
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	-14,56%	29,04%	-15,51%
Dióxido de Azufre (SO ₂)	-0,09%	33,61%	-17,39%
Material particulado (PM ₁₀)	-7,26%	9,72%	-13,54%

Se comprueba que el modelo cumple los criterios de validación fijados

Ciclo diario
 (17-18 junio)

EB

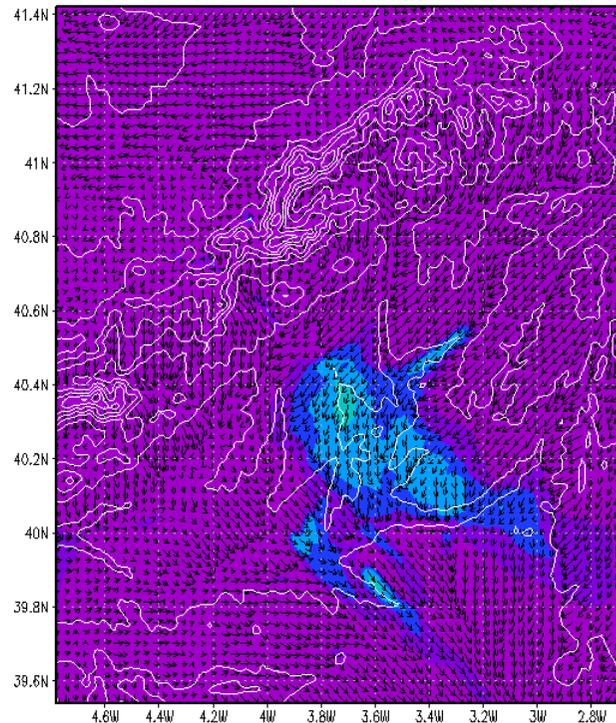
NO₂



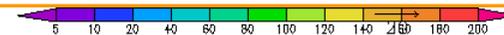
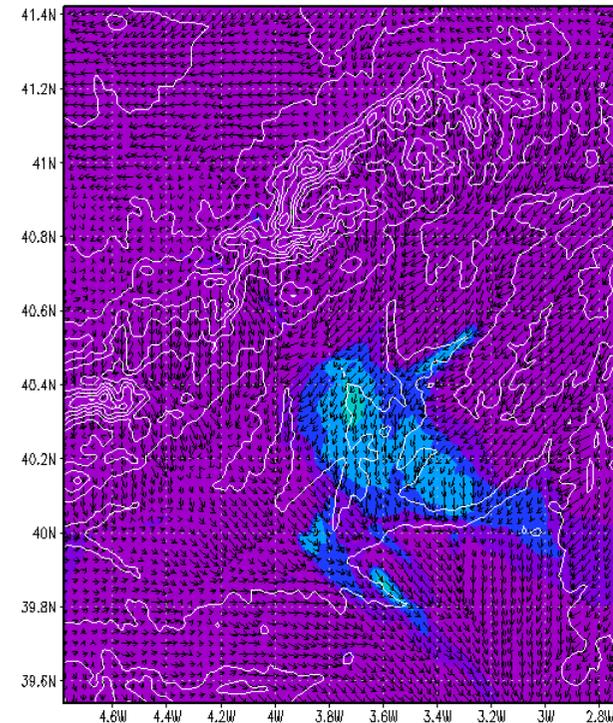
Madrid
 (181 x 214 km²)

ESI

BSC-CT Dioxido de nitrogeno (ug/m³)
 0h 17/06/2004 Escenario EB – Madrid 1x1km



BSC-CT Dioxido de nitrogeno (ug/m³)
 0h 17/06/2004 Escenario ESI – Madrid 1x1km



Ciclo diario
 (17-18 junio)

PM₁₀

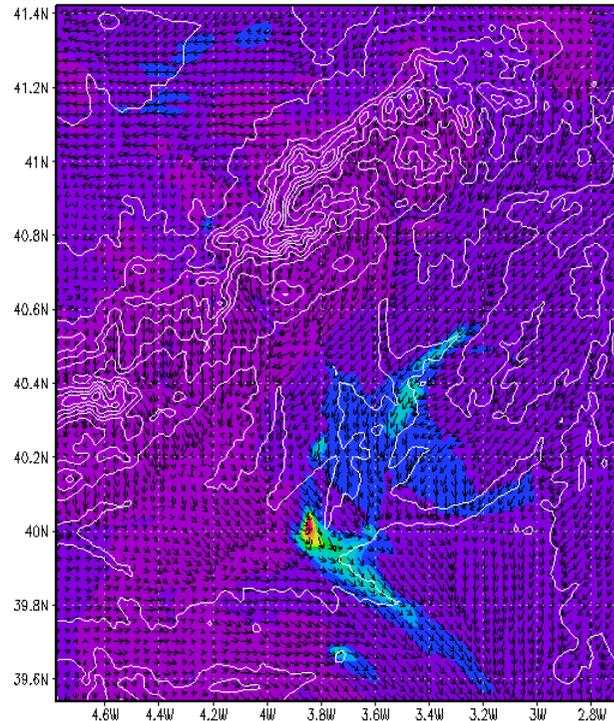
EB



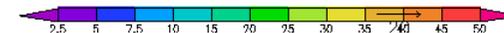
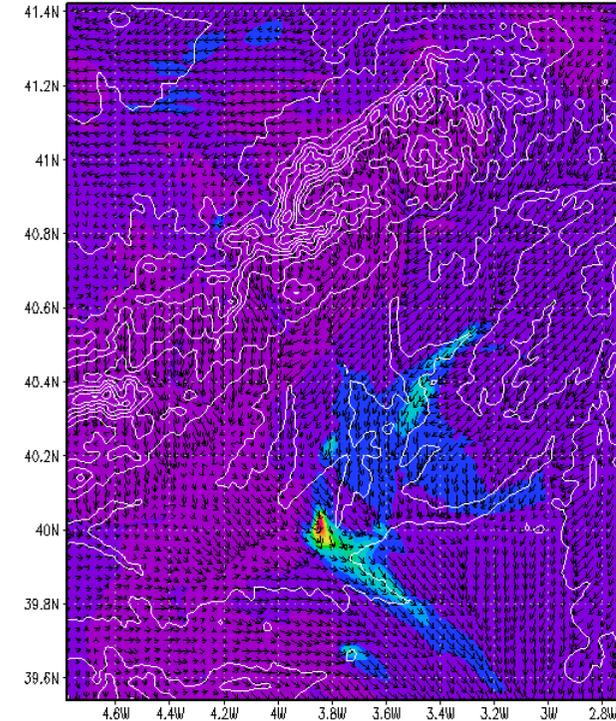
Madrid
 (181 x 214 km²)

ESI

BSC-CT Material particulado PM10 (ug/m³)
 0h 17/06/2004 Escenario EB – Madrid 1x1km



BSC-CT Material particulado PM10 (ug/m³)
 0h 17/06/2004 Escenario ESI – Madrid 1x1km



Ciclo diario
 (17-18 junio)
SO₂

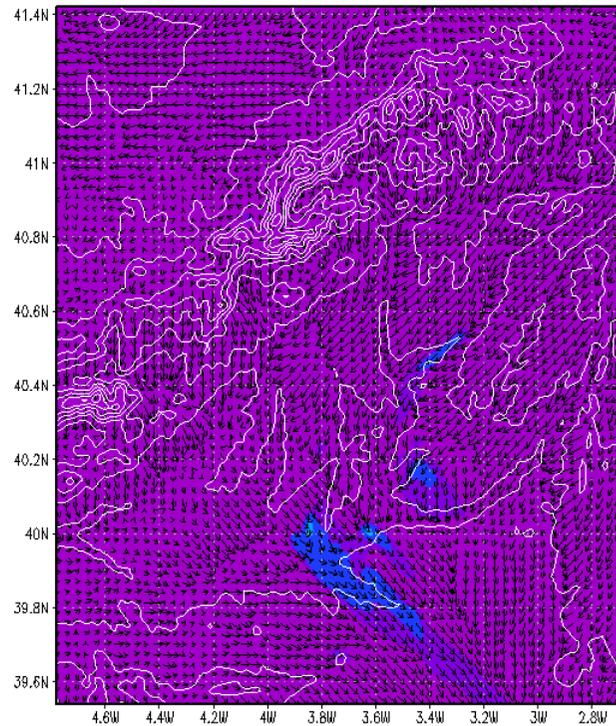
EB



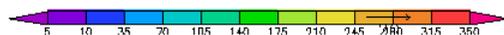
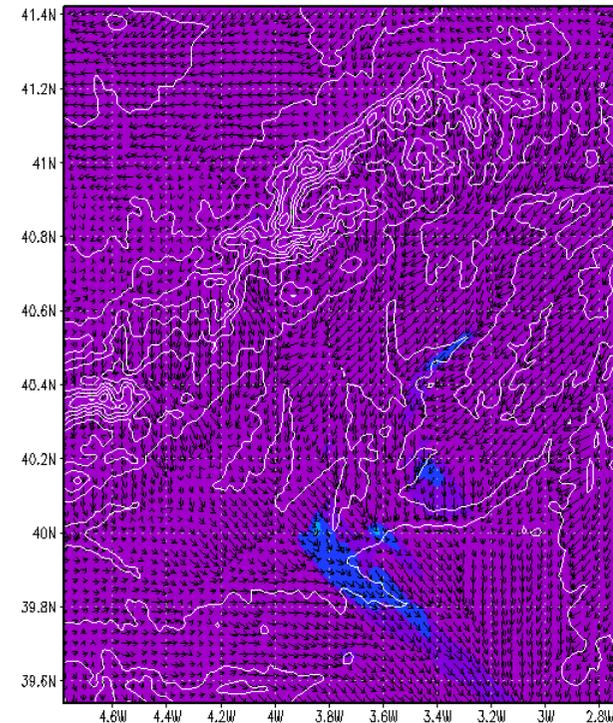
Madrid
 (181 x 214 km²)

ESI

BSC-CT Dioxido de azufre (ug/m3)
 0h 17/06/2004 Escenario EB – Madrid 1x1km



BSC-CT Dioxido de azufre (ug/m3)
 0h 17/06/2004 Escenario ESI – Madrid 1x1km



Ciclo diario
 (17-18 junio)

O₃

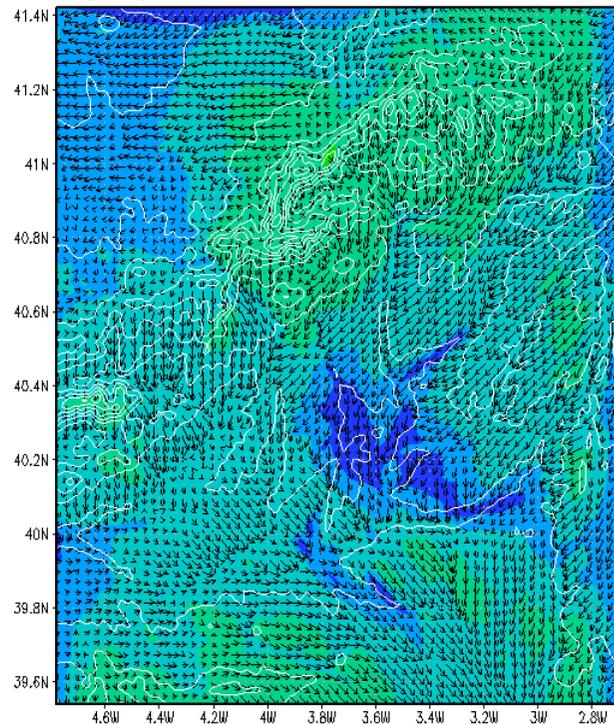
EB



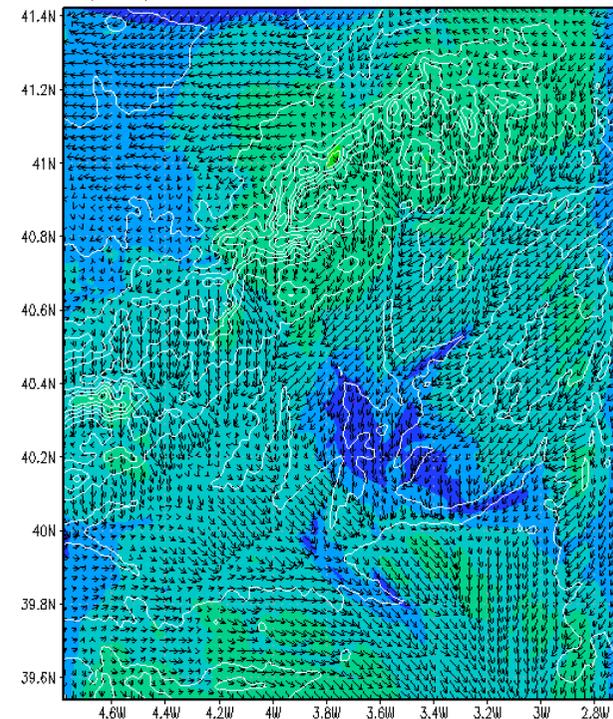
Madrid
 (181 x 214 km²)

ESI

BSC-CT Ozono superficial (ug/m3)
 0h 17/06/2004 Escenario EB – Madrid 1x1km

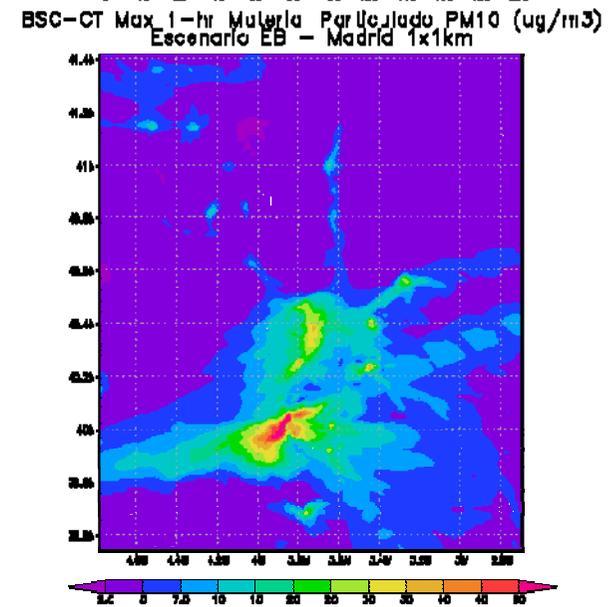
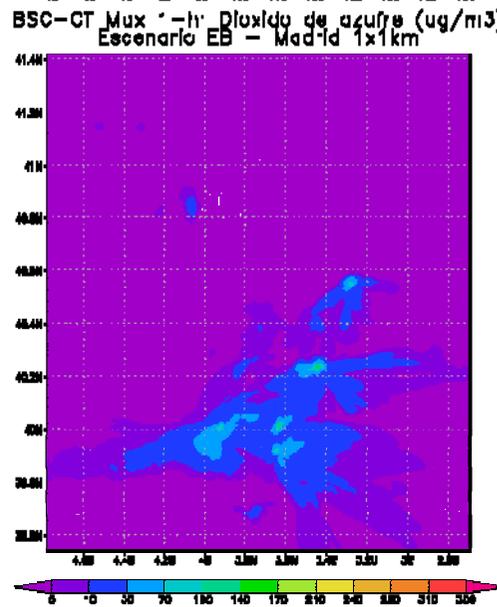
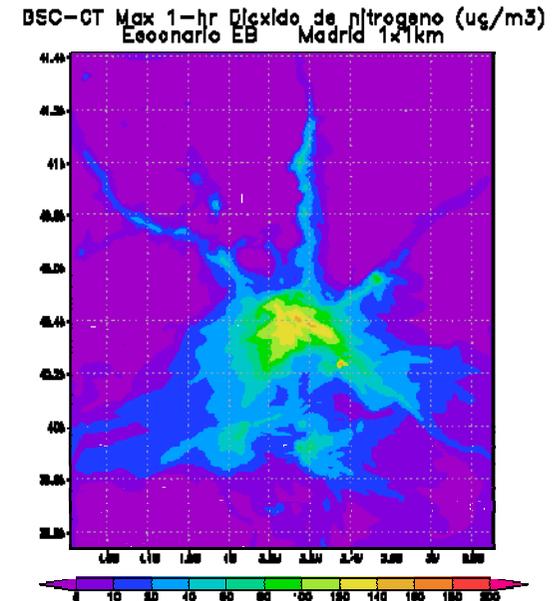
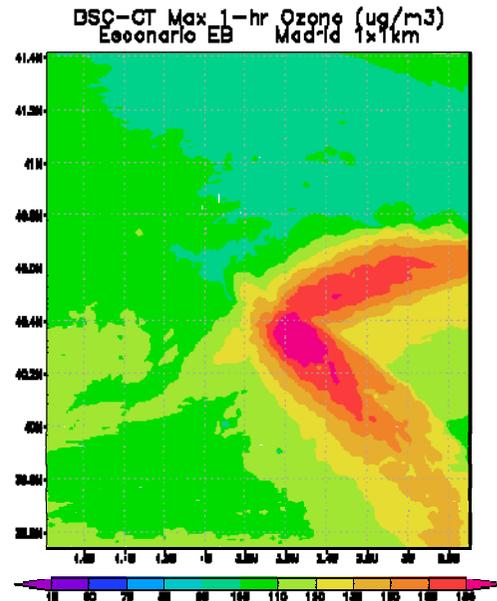


BSC-CT Ozono superficial (ug/m3)
 0h 17/06/2004 Escenario ESI – Madrid 1x1km



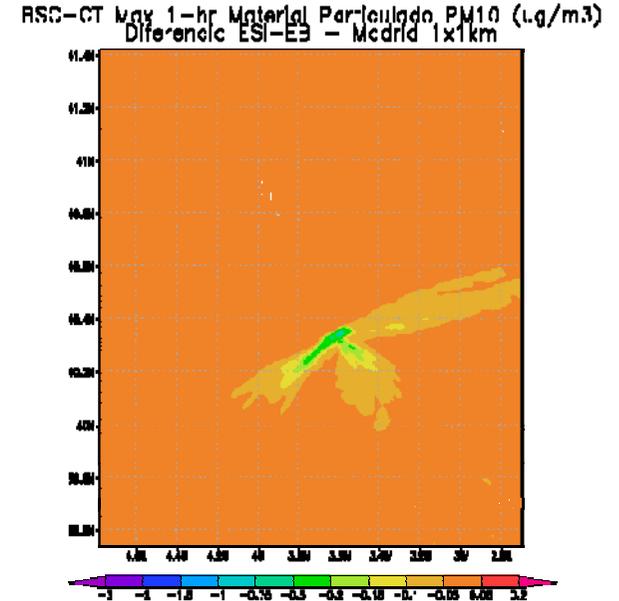
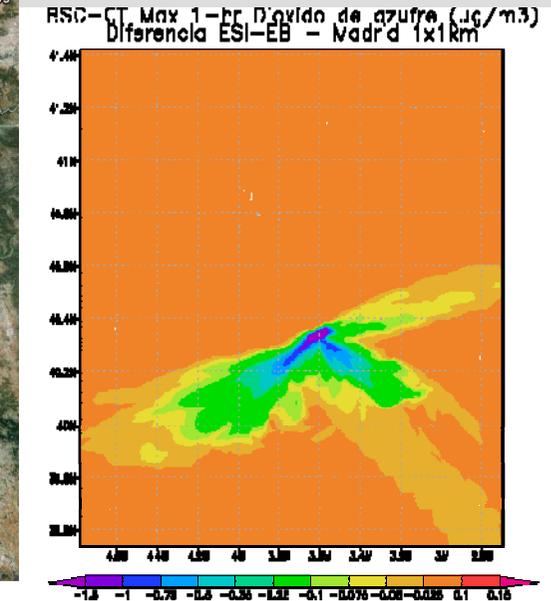
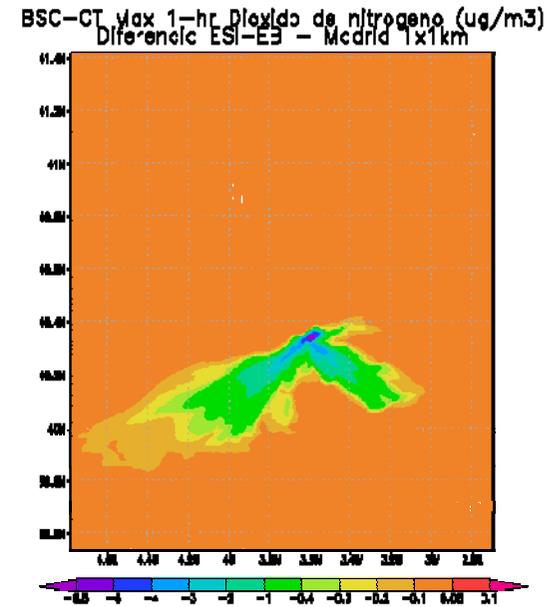
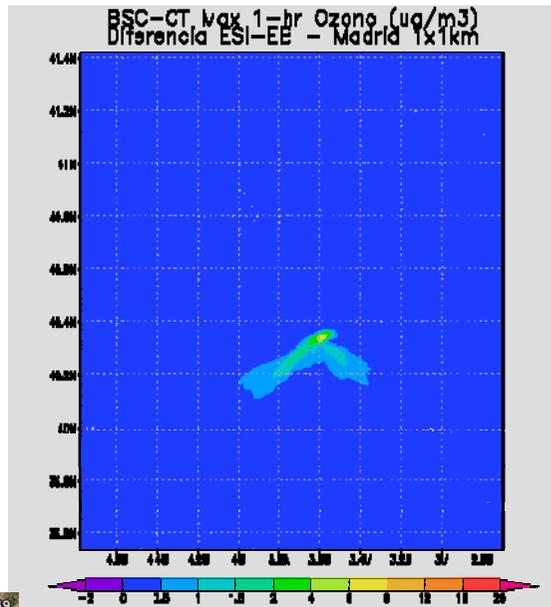
Valores máximos
 horarios

EB



Valores máximos
 horarios: diferencias
 entre escenarios

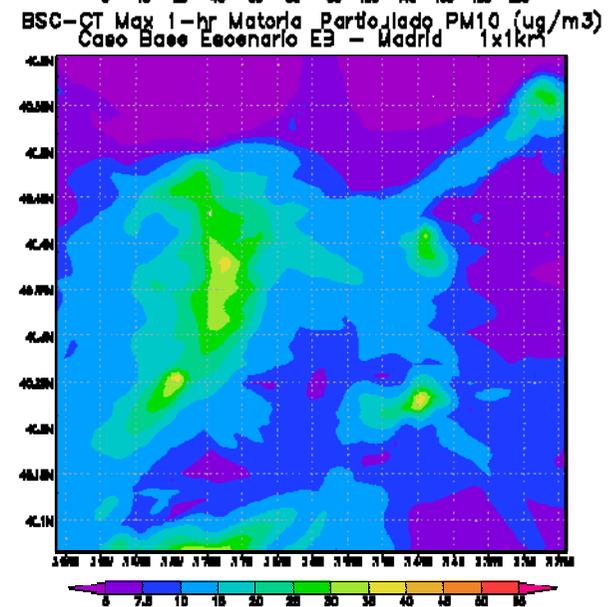
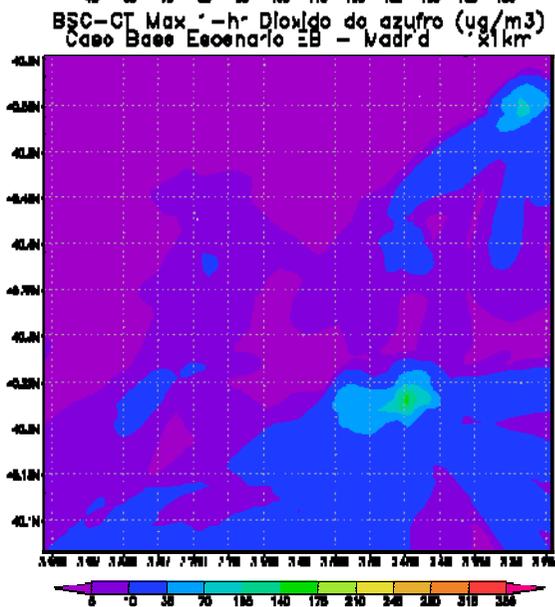
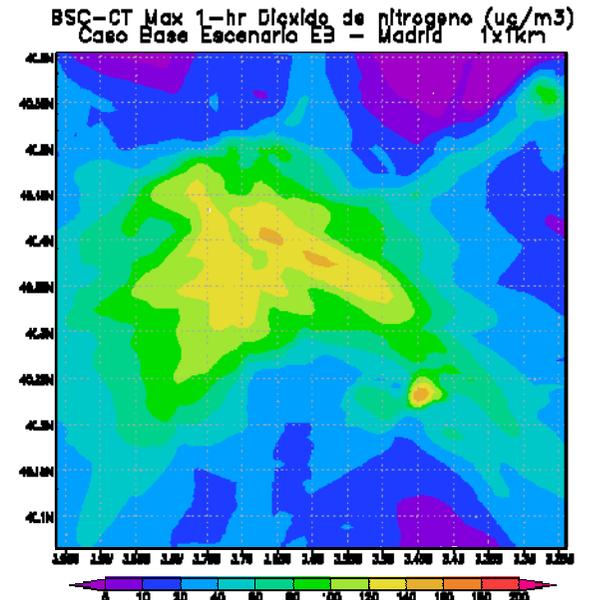
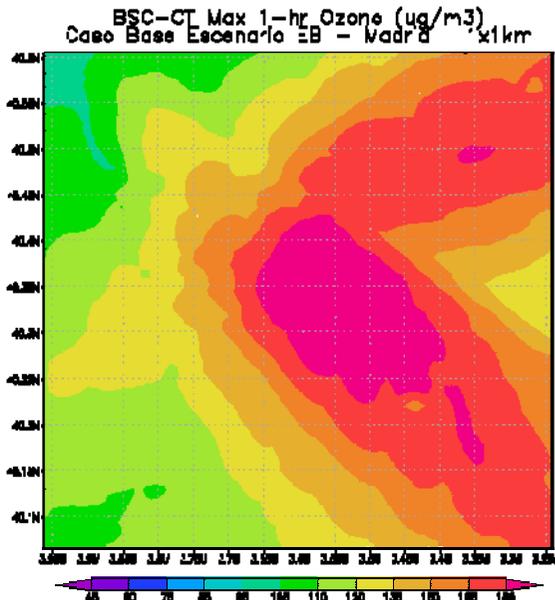
ESI-EB



Valores máximos
 horarios

EB

Zoom



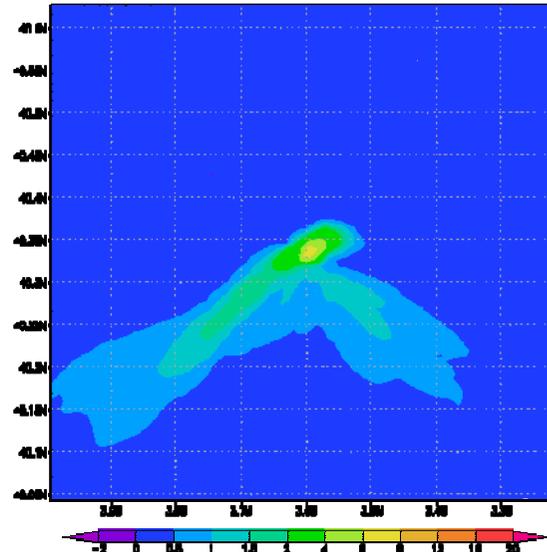
Valores máximos
horarios: diferencias
entre escenarios

ESI-EB

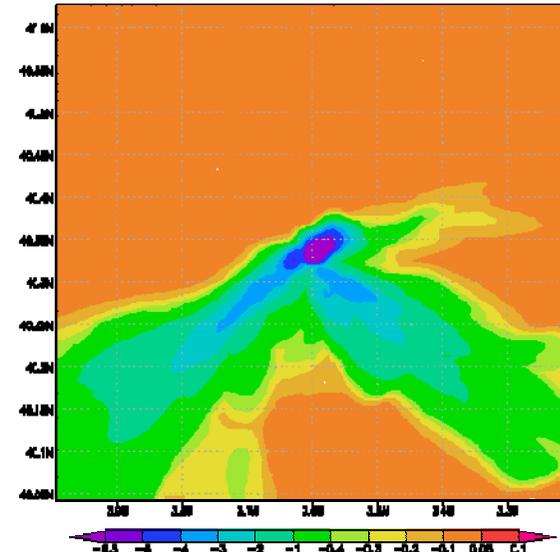
Zoom



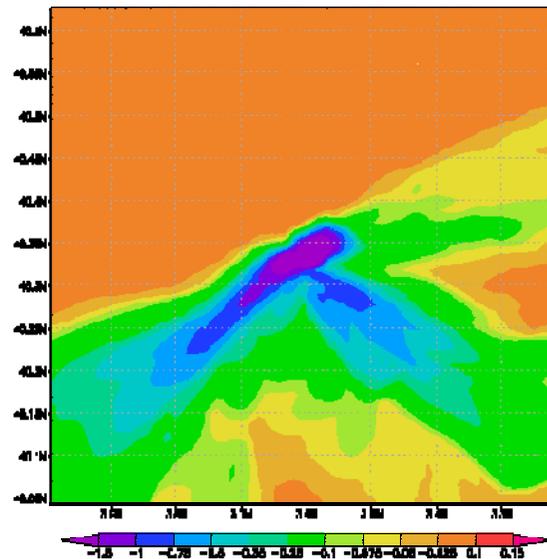
BSC-CT Max 1-hr Ozone (ug/m3)
Diferencia ESI-EB - Madrid 1x1km



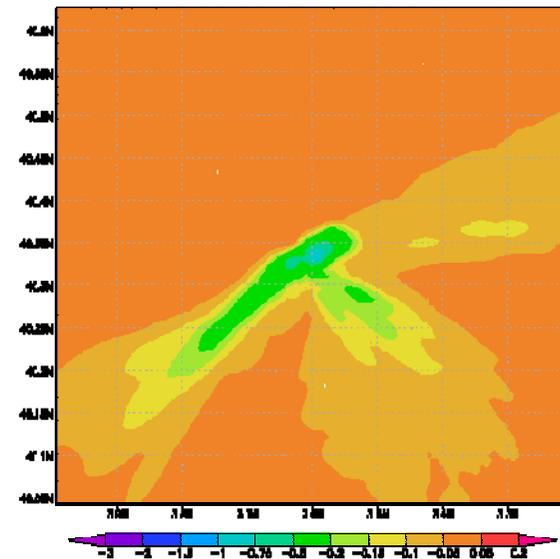
BSC-CT Max 1-hr Dioxido de nitrógeno (ug/m3)
Diferencia ESI-EB - Madrid 1x1km



BSC-CT Max 1-hr Dioxido de azufre (ug/m3)
Diferencia ESI-EB - Madrid 1x1km



BSC-CT Max 1-hr Materia Particulado PM10 (ug/m3)
Diferencia ESI-EB - Madrid 1x1km

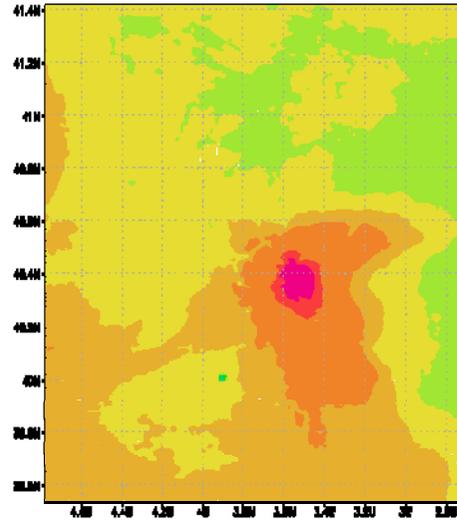


Valores medios diarios
 (O₃ octo-horarios)

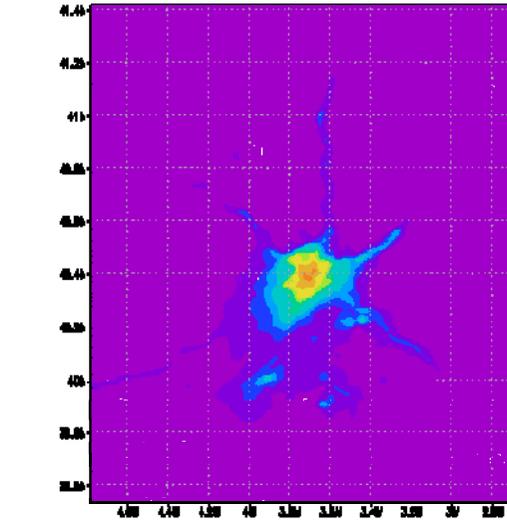
EB



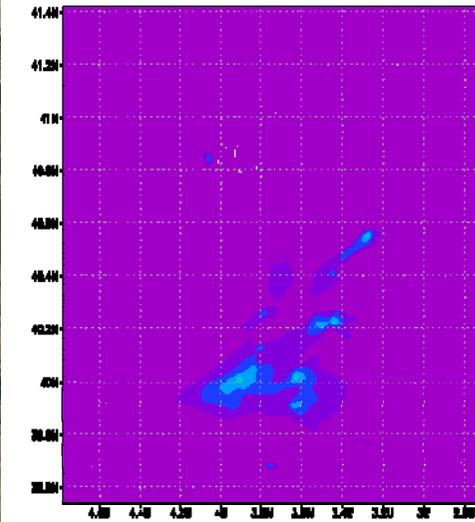
BSC-CT Media 8-hr Ozono (ug/m3)
 Escenario EB - Madrid 1x1km



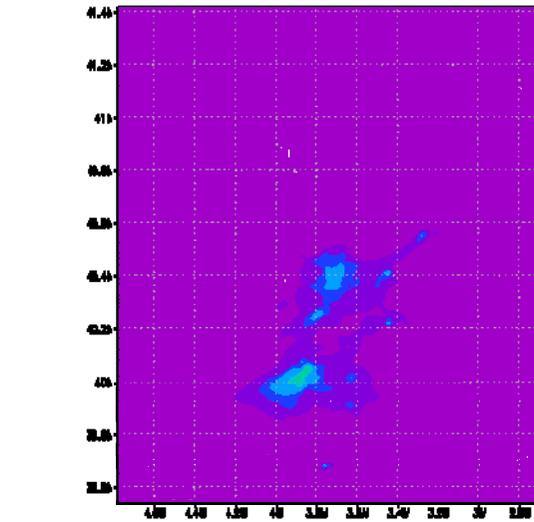
BSC-CT Media 24-hr Dioxido de nitrógeno (ug/m3)
 Escenario EB - Madrid 1x1km



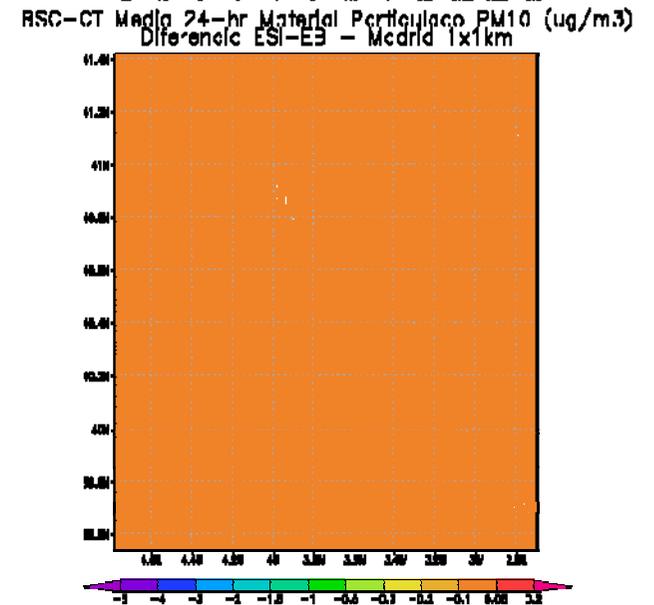
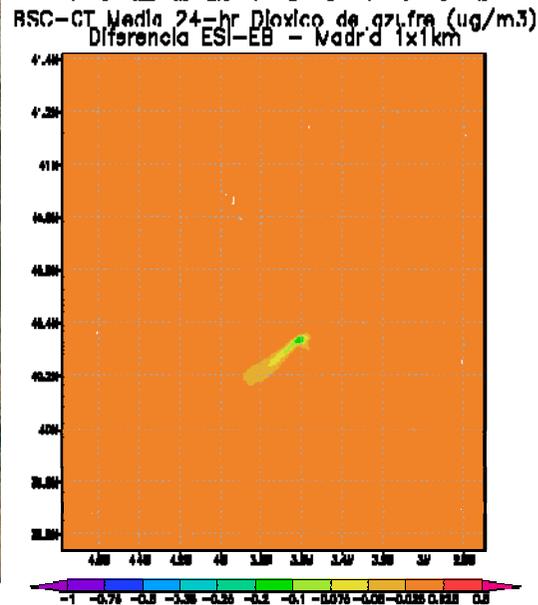
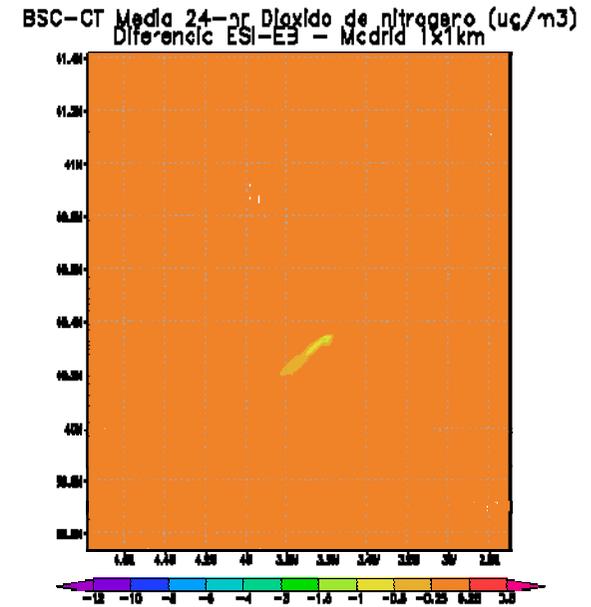
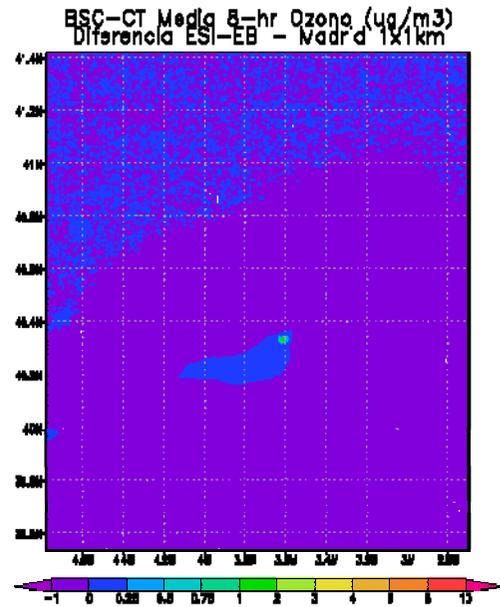
BSC-CT Media 24-hr Dioxido de azufre (ug/m3)
 Escenario EB - Madrid 1x1km



BSC-CT Media 24-hr Material Particulado PM10 (ug/m3)
 Escenario EB - Madrid 1x1km



Valores medios diarios
 (O₃ octo-horarios):
 diferencias entre
 escenarios
ESI-EB

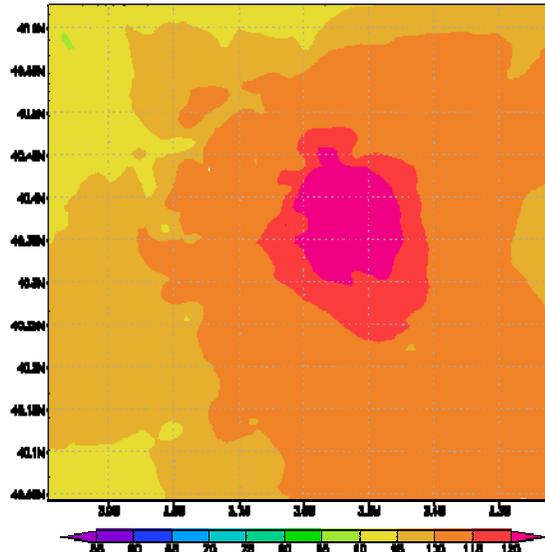


Valores medios diarios
 (O₃ octo-horarios)

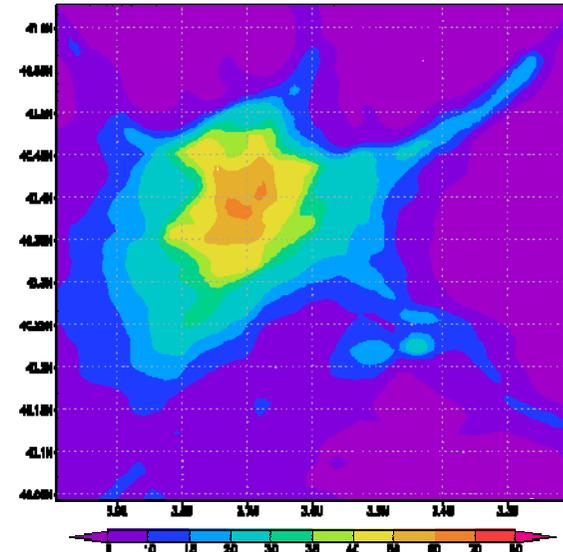
EB



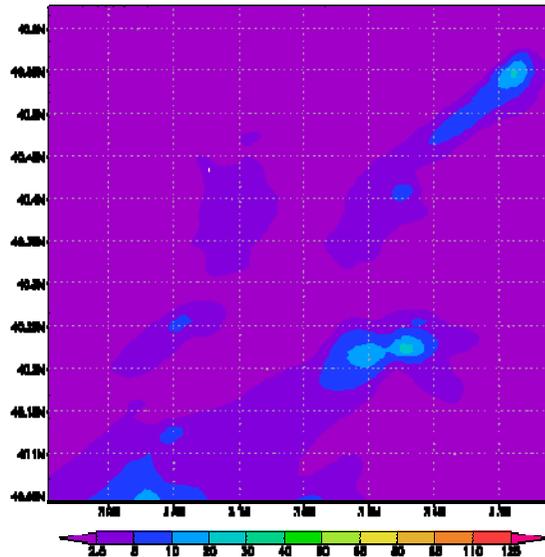
BSC-CT Media 8-hr Ozono (ug/m3)
 Caso Base Escenario EB - Madrid 1x1km



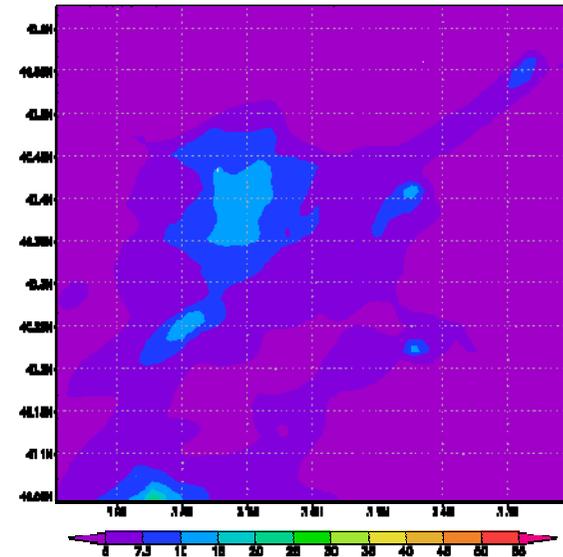
BSC-CT Media 24-hr Dioxido de nitrógeno (ug/m3)
 Caso Base Escenario EB - Madrid 1x1km



BSC-CT Media 24-hr Dioxido de azufre (ug/m3)
 Caso Base Escenario EB - Madrid 1x1km

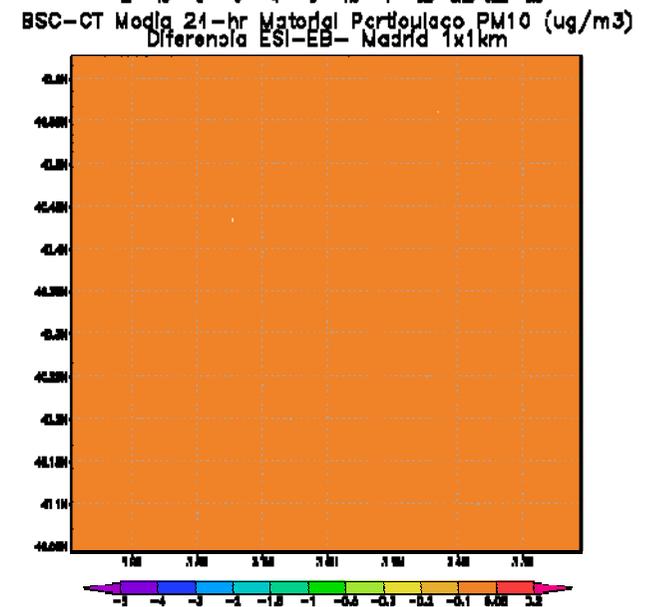
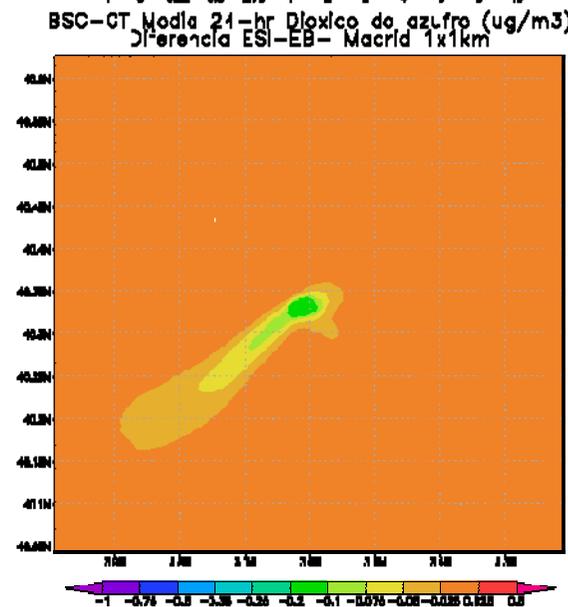
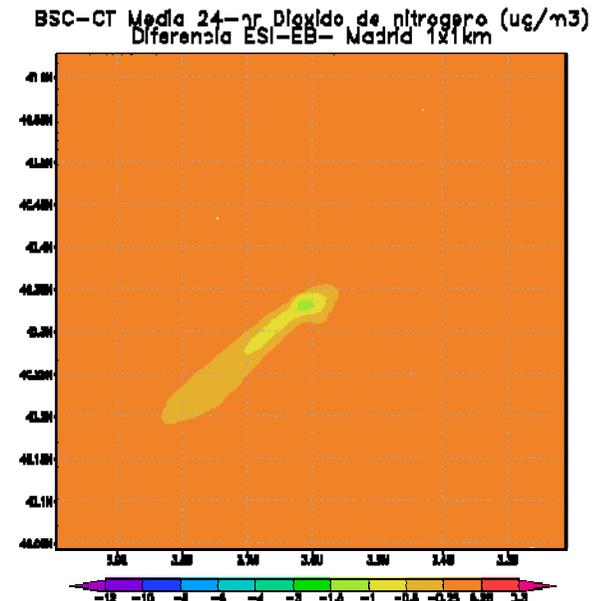
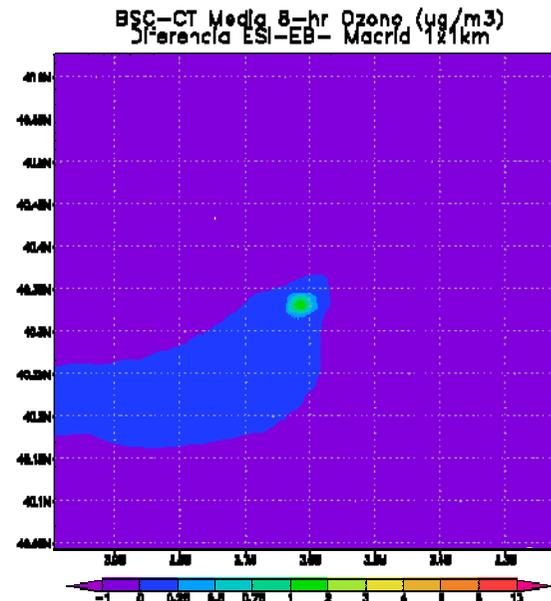


BSC-CT Media 24-hr Material Particulado PM10 (ug/m3)
 Caso Base Escenario EB - Madrid 1x1km



Valores medios diarios
 (O_3 octo-horarios):
 diferencias entre
 escenarios

ESI-EB



Resultados numéricos

Valores medios						
	O ₃ Media 8-hr (120 µg m ⁻³ PSH)	NO ₂ Media 24-hr	SO ₂ Media 24-hr 125 µg m ⁻³ (a no superar más de 3 veces al año) PSH	PM ₁₀ Media 24-hr 50 µg m ⁻³ (a no superar más de 7 veces al año) PSH		CO Media 24-hr
Zoom (65 x 65 km²)						
Conc (µg m ⁻³) <i>EB</i>	151.9	56.8	21.4	18.3		0.9
Conc (µg m ⁻³) <i>ESI</i>	152.7	55.8	21.3	18.3		0.9
ΔConc (µg m⁻³)	0.8	-1.1	-0.1	0.0		0.0
Variación (%)	0.5	-1.9	-0.6	0.0		0.0

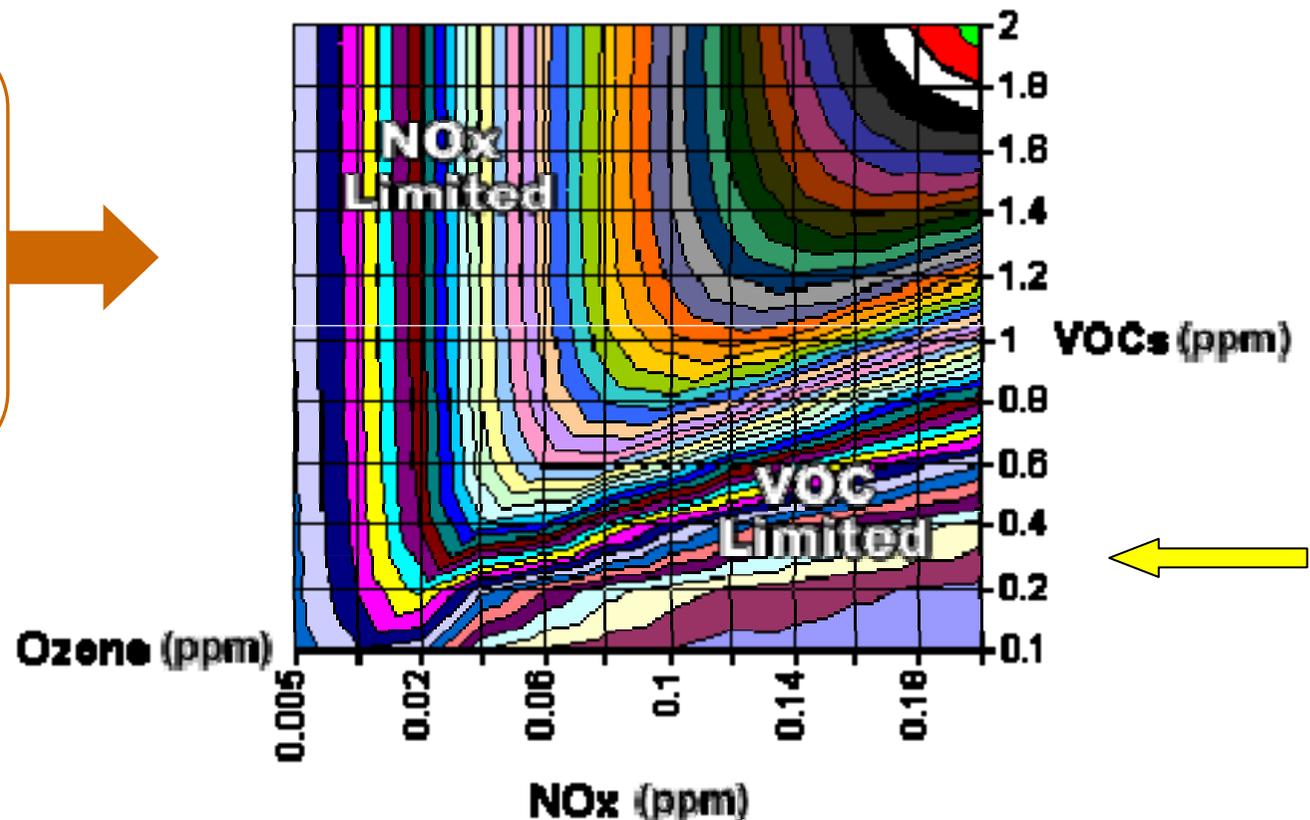
PSH (Protección a la Salud Humana)

Valores máximos						
	O ₃ Máxima 1-hr (180 µg m ⁻³ UIP 240 µg m ⁻³ UAP)	NO ₂ Máxima 1-hr 200 µg m ⁻³ (a no superar más de 18 veces al año) PSH 400 µg m ⁻³ (a no superar más de 3 horas consecutivas) UAP	SO ₂ Máxima 1-hr 350 µg m ⁻³ (a no superar más de 24 veces al año) PSH		PM ₁₀ Máxima 1-hr	CO Máxima 1-hr
Zoom (65 x 65 km²)						
Conc (µg m ⁻³) <i>EB</i>	195.8	130.5	103.2		44.3	1.9
Conc (µg m ⁻³) <i>ESI</i>	202.5	120.5	102.0		44.0	1.9
ΔConc (µg m⁻³)	6.6	-10.0	-1.1		-0.3	0.0
Variación (%)	3.4	-7.6	0.0		-0.7	0.0

UAP (Umbral de Alerta a la Población), UIP (Umbral de Información a la Población)

Ozone Isopleth Curve

El aumento de O_3 se debe a la disminución de los niveles de NO_x en zonas urbanas donde predomina un régimen limitado por VOCs.



CONCLUSIONES

Al implementar el escenario sin la incineradora Tirmadrid los resultados obtenidos en un dominio de 30 km x 30 km centrado en dicho punto muestran que:

- Las concentraciones de **NO_x disminuyen**: 1.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ para los valores medios diarios y 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ para los valores máximos horarios.
- Las concentraciones de **PM₁₀ no varían para** los valores medios diarios ni para los valores máximos horarios.
- Las concentraciones de **SO₂ disminuyen**: 0.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ para los valores medios diarios y 1.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ para los valores máximos horarios.
- Las concentraciones **O₃ aumentan**: 0.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ para los valores medios octo-horarios y 6.6 $\mu\text{g m}^{-3}$ para los valores máximos horarios.

Se puede indicar que la presencia de la actual incineradora de RU de Madrid no tiene efectos significativos en la calidad del aire.

CONCLUSIONES

En general la presencia de la incineradora Tirmadrid no tiene efectos significativos en la calidad del aire.

Al eliminar la incineradora:

- No hay variación de las concentraciones de material particulado.
 - Las variaciones en valores medios (diarios y octo-horarios para O_3) son menores de $2 \mu\text{g m}^{-3}$.
 - Las mayores variaciones se dan en los valores máximos horarios:
 - El O_3 aumenta $7 \mu\text{g m}^{-3}$
 - El NO_2 disminuye $10 \mu\text{g m}^{-3}$
-