

RECEIVED
OCT 02 1996
OST

enresa
empresa nacional de residuos radiactivos, s.a.

ENRESA--01/96

**DESARROLLO
DE UN PROGRAMA INFORMATICO
PARA EL ASESORAMIENTO
DE LA OPERACION
DE FOCOS EMISORES
DE CONTAMINANTES GASEOSOS**

MASTER

PUBLICACION TECNICA NUM. 01/96

ENRESA--01/96

**DESARROLLO
DE UN PROGRAMA INFORMATICO
PARA EL ASESORAMIENTO
DE LA OPERACION
DE FOCOS EMISORES
DE CONTAMINANTES GASEOSOS**

Eloy Piernagorda
M^a Dolores Olivé

IBERSAIC

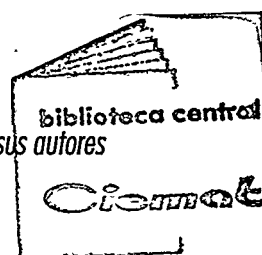
DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED

MASTER

enresa

**DESARROLLO
DE UN PROGRAMA INFORMATICO
PARA EL ASESORAMIENTO
DE LA OPERACION
DE FOCOS EMISORES
DE CONTAMINANTES GASEOSOS**

*Este trabajo ha sido realizado bajo contrato con ENRESA.
Las conclusiones y puntos de vista expresados en él corresponden a sus autores
y pueden no coincidir necesariamente con los de ENRESA*



DISCLAIMER

**Portions of this document may be illegible
in electronic image products. Images are
produced from the best available original
document.**

INDICE

1. INTRODUCCION	1
2. ANTECEDENTES	5
3. BASES CONCEPTUALES DE LA APLICACION PANDORA.....	9
3.1 Definición de la aplicación Pandora.....	11
3.2 Entorno conceptual de operación de la aplicación	11
3.2.1 Entorno lógico de la aplicación.....	11
3.2.2 Entorno físico y condiciones de operación previstas.....	12
3.3. Funcionamiento global de la aplicación. Módulos gestores	14
3.4 Acceso a la aplicación.....	15
3.5 Inicialización y arranque del sistema.....	15
3.5.1 Comprobación y verificación de la información.....	15
3.5.2 Calidad de la información.....	16
3.5.3 Estadística de los datos	16
3.5.4 Reconstrucción de la información.....	17
3.5.5 Información de escala	18
3.5.6 Generación de campos de viento.....	18
3.6 Interrupciones de la aplicación.....	18
3.7 Tratamiento de errores.....	19
3.8 Registro de incidencias.....	19
3.9 Protección de la aplicación.....	19
4. DESCRIPCION DE ESCENARIOS METEOROLOGICOS.....	21
4.1 Definición de escenarios meteorológicos	23
4.2 Asignación de datos a las variables de escenario.....	23
4.3 Datos de escenario.....	23
5. GENERACION DE CAMPOS DE VIENTOS.....	27
5.1 Introducción	29
5.2 El módulo de diagnóstico TOPWIND	29
5.3 Ajuste topográfico del campo de vientos	30
5.4 Puntos de muestreo y estaciones virtuales.....	30

5.5	<i>Información en las estaciones virtuales. Generación de campos de vientos</i>	31
5.6	<i>Modos de análisis y pronóstico del campo de vientos</i>	31
6.	VIENTOS DE LADERA Y VALLE. MODELO 2DFLOW	35
6.1	<i>Introducción</i>	37
6.2	<i>Bases conceptuales del modelo</i>	37
6.3	<i>Descripción teórica del modelo</i>	37
6.3.1	<i>Ecuaciones del modelo</i>	38
6.4	<i>Principales características del programa 2DFLOW</i>	39
6.4.1	<i>Datos de entrada e inicialización del modelo</i>	39
6.4.2	<i>Estructura del programa</i>	39
6.4.3	<i>Resultados del modelo</i>	40
6.4.4	<i>Consideraciones finales</i>	40
7.	TRABAJANDO CON EL GESTOR DE MODELOS	43
7.1	<i>Introducción</i>	45
7.2	<i>Fases de una sesión de análisis con el Gestor de Modelos</i>	45
7.3	<i>Intervalos de simulación</i>	45
7.4	<i>Modos de análisis del Gestor de Modelos</i>	46
7.5	<i>Descripción de focos emisores. Intervalos de emisión</i>	48
7.6	<i>Puntos de control y ventana de emisión</i>	49
8.	ESTIMACION DE LA ALTURA DE LA CAPA DE MEZCLA	51
8.1	<i>Introducción</i>	53
8.2	<i>Capa de mezcla: concepto y descripción física elemental</i>	53
8.2.1	<i>Definición y estructura</i>	53
8.2.2	<i>Evolución de la capa de mezcla</i>	55
8.2.3	<i>Descripción de los algoritmos seleccionados</i>	59
8.2.4	<i>Ecuaciones de diagnóstico</i>	60
8.2.5	<i>Otros algoritmos. Consideraciones finales</i>	61
9.	EL MODELO DE DISPERSION MESOI V.2.0	63
9.1	<i>Introducción</i>	65
9.2	<i>Modelos lagrangianos</i>	65
9.3	<i>El modelo MESOI V.2.0</i>	66
9.4	<i>Coefficientes de difusión</i>	67
9.4.1	<i>Aproximación de Start y Wendell</i>	67
9.4.2	<i>Curvas de difusión en campo abierto</i>	67

9.4.3	Curvas Sigma-normales	68
9.4.4	Parametrización recomendada por la U.S. Army.	68
9.4.5	Cálculo de los coeficientes de difusión.	68
9.5	Sobreelevación del penacho	69
9.6	Términos de reflexión	70
9.7	Influencia del terreno	71
9.8	Empobrecimiento del puff	71
9.8.1	Deposición seca	71
9.8.2	Deposición húmeda	72
9.8.3	Decaimiento	72
9.9	Transporte del puff	73
9.10	Cálculo de las concentraciones	74
9.11	Resultados del modelo	75
9.11.1	Posición de los puffs	75
9.11.2	Concentraciones integradas a lo largo del tiempo	76
9.11.3	Superaciones de valores límite	76
10.	CARACTERISTICAS DE LA MODELIZACION DE MESOI V.2.0	77
10.1	Introducción	79
10.2	Dominio y resolución espacial del modelo	79
10.2.1	Consideraciones numéricas	79
10.2.2	Consideraciones físicas	80
10.2.3	Representación del terreno	81
10.2.4	Descripción de la dinámica atmosférica	82
10.3	Tratamiento de la capa de mezcla	83
10.4	Características de la modelización en puffs	83
10.4.1	Sobreelevación del penacho	84
10.4.2	Campo de concentraciones	85
10.5	Conclusiones. Limitaciones generales del modelo	86
11.	CONCLUSIONES	89
12.	REFERENCIAS	93
13.	FIGURAS	97
14.	TABLAS	101

15. ANEXO 1. ORGANIZACION Y FICHEROS DE LA APLICACION	115
A1.1 Estructura del directorio de PANDORA	117
A1.2 Datos de entrada a PANDORA	117
A1.3 Datos de configuración de PANDORA	117
A1.3.1 Ficheros de iniciación	117
A1.3.2 Puntos de control	117
A1.3.3 Puntos de medida	118
A1.3.4 Area de estudio	118
A1.3.5 Ficheros de topografía	118
A1.4 Datos de configuración del modelo MESOI	118
A1.4.1 INITIAL.MSI	118
A1.4.2 RELEASES.MSI	118
A1.4.3 Descripción de focos emisores	118
A1.5 Datos de configuración del modelo 2DFLOW	119
A1.6 Informes del control de calidad y de concentraciones	119
A1.6.1 Informes de control de calidad	119
A1.6.2 Informes del modelo	119
A1.7 Tablas	120

1

INTRODUCCION

El presente documento resume los fundamentos metodológicos y los principales algoritmos que han servido de base para el desarrollo del *Programa para el Asesoramiento rutinario de la Dispersión y la Operación de focos emisores mediante Reconocimiento de patrones* (aplicación PANDORA).

La elaboración de dicha aplicación informática ha sido el objetivo principal de la cuarta fase del proyecto "*Caracterización de procesos atmosféricos en terreno complejo*", realizado dentro del marco del Plan de I+D de la Empresa Nacional de Residuos S.A. (ENRESA), durante el periodo 1992-95.

El desarrollo de PANDORA fue planteado con el objeto de sintetizar la información y los conocimientos, adquiridos durante las tres fases anteriores de dicho proyecto, en una herramienta informática que sirviera como instrumento de apoyo para la optimización de la operación de la Planta de Incineración de la Instalación de Almacenamiento de Residuos (IAR) de El Cabil.

Las especificaciones de diseño de la aplicación consideraban que ésta debía ser capaz de ejecutar

el modelo de dispersión MESOI V.2.0, de la U.S. NUREG, utilizando los siguientes datos de entrada:

- ☐ Datos reales de las últimas 48 horas provenientes de las dos torres meteorológicas de la instalación.
- ☐ Datos estimados de la altura de la capa de mezcla.
- ☐ Patrones de campos de vientos definidos en las fases anteriores del proyecto.

Partiendo de dicha información el programa debería suministrar al usuario la siguiente información:

- ☐ Informe meteorológico de las 12 últimas horas y comparación con los tres periodos anteriores de 12 horas.
- ☐ Mapa de concentraciones previsto para un periodo de emisión medio en el área de influencia del emplazamiento.
- ☐ Estimación del intervalo recomendable para efectuar las emisiones dentro de un periodo diurno de 12 horas.

2

ANTECEDENTES

Las tres primeras fases del proyecto "*Caracterización de procesos atmosféricos en terreno complejo*" fueron llevadas a cabo durante el período 1988-91, y su objetivo principal fue la identificación y tipificación de los regímenes locales de circulación atmosférica más frecuentes en el emplazamiento de la IAR "El Cabril", en el norte de la provincia de Córdoba. Dicha instalación contaba con una torre meteorológica instrumentada (Torre Base) en las estribaciones de Sierra Albarrana, próxima a la instalación, cuya información fue utilizada como referencia y registro histórico del emplazamiento.

Con el objeto de identificar y caracterizar los regímenes de flujo, fue realizada una campaña de medidas de dos años de duración en la que fueron instalados un total de siete mástiles instrumentados con sensores de velocidad y dirección del viento y temperatura del aire, cuya localización se resume en la Tabla 2.1. Dicha tabla muestra las coordenadas y alturas sobre el nivel del mar de las estaciones que fueron utilizadas en dicho estudio.

Durante la fase de análisis de los datos de la citada campaña, fueron realizados diversos intentos para conseguir la identificación de pautas o "patrones" de comportamiento del campo de vientos en la zona, así como la definición de indicadores que permitieran su diagnóstico o pronóstico.

A grandes rasgos, los análisis fueron dirigidos según dos grandes líneas de trabajo:

Tipificación sinóptica

Fue definida una clasificación sinóptica de siete situaciones, a cada una de las cuales fue asociada una rosa de vientos típica para cada uno de los puntos de muestreo utilizados en la campaña de medidas. El indicador principal de cada situación es, en esencia, el mapa o conjunto de mapas sinópticos asociados a la situación tipificada.

Tipificación local

Paralelamente, fue realizado un estudio estadístico acerca de la ocurrencia y simultaneidad de la dirección del viento medida en los diferentes puntos de muestreo, para diversos intervalos de velocidad, respecto de uno o dos puntos de referencia fijos. Dichos puntos fueron situados en la torre meteorológica permanente de la instalación y en el mástil ubicado en el cerro de Los Morales. El resultado de este tipo de análisis fue un conjunto de situaciones o "instantáneas" del campo de vientos

en la zona, las cuales se identifican a partir de las combinaciones de dirección y velocidad del viento medido en las proximidades del Cerro de los Morales y en los puntos más altos de Sierra Albarrana.

Desde un punto de vista práctico, el segundo enfoque se adapta mejor a las necesidades del desarrollo de una aplicación informática que debe trabajar con datos horarios y, a ser posible, con información de carácter objetivo y cuantitativo.

Es necesario indicar, que en ambos casos no fue realizado ningún tipo de estudio o estimación acerca de parámetros o variables de gran importancia para el uso de modelos, tal y como ocurre por ejemplo con la evolución de la altura de la capa de mezcla, la estructura vertical del campo de vientos, o la parametrización de flujos locales de diversas variables.

La falta de información acerca de este tipo de formulaciones o algoritmos ha sido una de las principales dificultades a la hora de desarrollar PANDORA. En este sentido, es necesario indicar que la aplicación ha sido construida a partir de la información disponible que mejor se ha podido adaptar a las necesidades encontradas durante el desarrollo informático de la misma. En determinados casos, ha sido necesario desarrollar algoritmos nuevos que consideren la información disponible en las condiciones reales de operación previstas en la IAR "El Cabril". En otros, hubo que formular hipótesis razonables acerca del comportamiento que se espera para la evolución de determinadas variables o regímenes de circulación. Igualmente, se ha realizado una aproximación estrictamente causal y determinista, mediante el uso de modelos específicos, en los casos en que ello ha sido posible.

Por lo anterior, la aplicación PANDORA, debe ser contemplada como un producto experimental, que sintetiza buena parte del conocimiento "intangible" adquirido en las fases previas del proyecto, pero que representa una solución parcial (no completa) del problema de la caracterización atmosférica del emplazamiento en estudio.

Los resultados de la versión actual del sistema deben ser, en buena lógica sometidos a un proceso crítico de pruebas y ajuste. Dicho proceso no debiera ser, por otra parte, ajeno a la realización de un programa de validación que permitiera corregir y ampliar la base de conocimiento del sistema, o al menos determinar las incertidumbres principales que pueden afectar a las estimaciones que en él son realizadas.

3

BASES CONCEPTUALES DE LA APLICACION PANDORA

3.1 Definición de la aplicación PANDORA

El Programa para el Asesoramiento rutinario de la Dispersión y la Operación de focos emisores mediante Reconocimiento de patrones (PANDORA) es una herramienta de cálculo numérico cuya finalidad es el diagnóstico y la predicción de la meteorología y de los niveles de inmisión en el entorno próximo a un foco emisor.

En su versión actual la aplicación ha sido configurada específicamente para la Instalación de Almacenamiento de Residuos (IAR) de El Cabril (Córdoba), propiedad de la Empresa Nacional de Residuos (ENRESA).

Las principales funciones que han sido incorporadas al sistema son:

- ☐ Captura y/o tratamiento de datos meteorológicos, de emisión e inmisión.
- ☐ Gestión, análisis y representación de los datos correspondientes a las últimas 48 horas.
- ☐ Modelización del campo de vientos para dos escalas de representación espacial del terreno.
- ☐ Modelización de la evolución horaria de la altura de la capa de mezcla.
- ☐ Modelización y pronóstico de los niveles de inmisión.
- ☐ Representación gráfica y numérica de los resultados de la modelización efectuada.

3.2 Entorno conceptual de operación de la aplicación

En este apartado se pretende describir conceptualmente el funcionamiento de la aplicación PANDORA, localizando para ello la posición que dicha herramienta ocupa en la cadena del tratamiento de la información. Los detalles específicos de la implementación serán analizados en los apartados siguientes.

3.2.1 Entorno lógico de la aplicación

Como hipótesis de partida se puede suponer que el *tratamiento global de la información* necesaria para el funcionamiento de la aplicación, puede ser

organizado mediante la realización de procesos o tareas estructuradas en tres entornos diferentes. Por *entorno* se entiende el conjunto de elementos (físicos o lógicos) que contribuyen a la consecución de un *objetivo genérico común*.

Dichos entornos son:

Entorno de adquisición de datos

El objetivo del mismo es la obtención de datos fiables para el funcionamiento rutinario de la aplicación.

El diseño de la aplicación considera que la adquisición primaria de la información es realizada en tiempo real por torres meteorológicas o por sistemas de adquisición de datos instalados para tal fin.

Dentro de este entorno pueden ser realizados los siguientes procesos:

- ☐ Adquisición primaria de la información en tiempo real.
- ☐ Decodificación de la misma.
- ☐ Control de calidad primario. Generación de informes.
- ☐ Transformación elemental de la información (promediado, formateado, etc).
- ☐ Transferencia de la información.

Otro proceso que puede ser realizado optativamente en este entorno es el de validación (o verificación) de datos y generación de los informes correspondientes.

Entorno de gestión de la información

El objetivo genérico del mismo es realizar la gestión básica de la información suministrada por los sistemas de adquisición de datos.

Los procesos típicos que pueden ser llevados a cabo dentro de este entorno pueden ser los siguientes:

- ☐ Comunicación principal con el usuario.
- ☐ Tratamiento elemental de la información.
- ☐ Consultas de bases de datos.
- ☐ Generación de informes y salidas gráficas.

Al igual que en el caso anterior, en este entorno podrían ser también realizadas determinadas tareas de validación, verificación, y/o recuperación de datos, junto con la emisión de los informes correspondientes.

Entorno de modelización

El objetivo de este entorno es la obtención de las estimaciones necesarias para asesorar el funcionamiento de la instalación.

Dentro de este entorno pueden ser ejecutados todos los procedimientos relacionados con el diagnóstico y/o pronóstico de la dinámica atmosférica y de los contaminantes en el emplazamiento.

Las principales tareas que pueden ser realizadas son:

- ☐ Análisis y procesamiento de la información.
- ☐ Modelización de escenarios.
- ☐ Ejecución de modelos.
- ☐ Estimación de parámetros de interés.
- ☐ Emisión de informes.

De acuerdo con las especificaciones de la aplicación, las tareas del entorno de adquisición de datos serán realizadas en la práctica de forma individual por los diferentes equipos y sistemas actualmente en funcionamiento en planta, sin que exista un único sistema central de adquisición que centralice o coordine todos o alguno de los servicios y productos disponibles.

Esta configuración ha excluido la posibilidad de concebir la aplicación PANDORA a modo de *sistema gestor central* con capacidad para "monitorear" y controlar en tiempo real la adquisición de datos. El criterio utilizado ha sido, por tanto, la inserción *no intrusiva* de la herramienta en la configuración actual de equipos y sistemas de la IAR "El Cabril".

De acuerdo con dicha disposición de equipos y sistemas, y considerando las especificaciones de la aplicación, existen varias posibilidades para integrar en un único esquema los códigos y algoritmos de modelización, la gestión de la información y la recepción de datos desde los puntos de muestreo.

La opción por la que finalmente se ha optado consiste en configurar el núcleo principal de la aplicación PANDORA como una herramienta integrante de un entorno de Gestión de Datos, situada en un ordenador ubicado posiblemente en la Sala de Control de la IAR.

El diseño de la aplicación ha considerado que, en el futuro, dicho ordenador podría ser dotado de los medios necesarios para realizar una interrogación remota a las estaciones o puntos de muestreo que estén disponibles, de manera que el funcionamiento de la aplicación podría realizarse en *modo desatendido*.

Dado que el objetivo final de la herramienta es asesorar la operación de la planta, se ha considerado como criterio básico de diseño el que la aplicación esté preparada para ofrecer *siempre* una respuesta al usuario, aún incluso en condiciones de gran pérdida de datos o información primaria.

De acuerdo con todo lo anterior, la aplicación PANDORA puede ser contemplada como un interfaz de comunicación con el usuario en el que los servicios de consulta y visualización de datos aparecen en primer plano, en tanto que los servicios de actualización de información, análisis y modelización figuran como procesos en segundo término, en algunos casos, transparentes al usuario.

Este concepto de la aplicación sugirió la posibilidad de que la herramienta fuera desarrollada utilizando técnicas de programación orientada a eventos, como vía para la construcción de un interfaz fácil de aprender y usar, incluido en un ambiente gráfico adecuado.

Las principales características y funciones de este interfaz se encuentran comentadas en la *Guía del Usuario* de PANDORA (ref. 1).

3.2.2 Entorno físico y condiciones de operación previstas

A. Información disponible

PANDORA utiliza como punto de partida la información suministrada de forma rutinaria por los equipos y sistemas de medida actualmente en uso en la instalación de El Cabril.

Cualquier tipo de información adicional necesaria para el funcionamiento de la aplicación es deducida o *estimada* de acuerdo con los métodos, algoritmos o parametrizaciones que se describen en los apartados siguientes de este documento.

El resumen de la *información* disponible es el siguiente:

Datos meteorológicos

Se dispone de dos torres meteorológicas denominadas Torre Primaria (o T1) y Torre Secundaria (o T2), de 60 y 40 m de altura respectivamente, en las que se realizan las medidas de diversas variables meteorológicas.

Igualmente, se dispone de pluviómetro y piranómetro de medida de radiación solar total, ubicados junto a la plataforma de instalación de la Torre Primaria.

La relación de las variables meteorológicas medidas en ambas torres, así como la clave de identificación que se utiliza para identificarlas, figura en las Tablas 3.1 y 3.2.

La adquisición y registro de la información se realiza mediante un sistema informático basado en una plataforma tipo PC, compatible AT, que opera como servidor de una red de área local. El sistema se encuentra provisto de una tarjeta de adquisición de datos que muestrea y digitaliza las señales analógicas provenientes de las torres a intervalos regulares de 2 s. Dichas señales son promediadas cada quince minutos, siendo a continuación registradas en el disco duro del sistema, a modo de ficheros diarios, los cuales son gestionados por el propio programa de adquisición de datos.

Un ordenador similar al anterior y conectado en red con aquel, permite la interrogación manual de los datos, así como la transformación de éstos sobre una base de promedio horaria.

A petición del usuario, este último sistema permite almacenar los promedios horarios de las últimas 48 horas en ficheros ASCII de nombre

CD4-60.DAT

Dichos ficheros constituyen la información básica de inicialización de la aplicación PANDORA en su versión actual. Los contenidos y estructura de los mismos se encuentran descritos en el Anexo 1 ("*Organización y ficheros de la aplicación*") de este documento.

Datos de emisión

En la actualidad no se realiza el muestreo de datos de emisión en la IAR "El Cabril". No obstante, la aplicación PANDORA requiere información acerca de la geometría y características físicas de la emisión del foco emisor para modelizar el comportamiento de los contaminantes vertidos a la atmósfera.

La herramienta, en consecuencia, ha sido diseñada para admitir la introducción manual de dicha información, o bien para trabajar sobre los valores de diseño de la instalación, los cuales pueden figurar como valores prefijados por defecto. Es posible, igualmente trabajar sobre valores de emisión normalizados (χ/Q).

Datos de inmisión

Al igual que en el caso anterior, dicha información no está disponible de forma rutinaria en la instalación.

En primera instancia, este tipo de datos no son fundamentales para el funcionamiento de PANDORA, en el sentido de que se trata de información que es modelizada por la propia aplicación. Sin embargo, es aconsejable disponer de datos de inmisión para poder validar y evaluar la bondad de los resultados que el sistema proporcione en su operación habitual.

B. Condiciones de operación previstas

De acuerdo con lo anteriormente indicado, en su versión actual, PANDORA no realizará periódicamente conexiones con equipos de medida de inmisión o emisión, ni tampoco con el sistema encargado de la adquisición de la información meteorológica, si bien la incorporación de tales capacidades ha sido considerada en el diseño del programa.

La aplicación PANDORA ha sido preparada para trabajar con información que se supone representativa de un periodo de 48 horas (en concreto las últimas 48 horas disponibles en el Sistema de Adquisición de Datos, en adelante SAD). El registro de la información se supone realizado a intervalos regulares de 1 hora, si bien, internamente el sistema puede gestionar información correspondiente a tiempos de promedio inferiores y de hasta 15 minutos.

Dado que no existe conexión directa con el SAD, la información básica para el funcionamiento de PANDORA deberá ser transferida al mismo mediante la lectura de un fichero de datos externo, el cual deberá ser copiado al disco duro del ordenador en que resida la aplicación. Para ello, ésta ha sido dotada de las funciones de lectura y copia necesarias para realizar dicha operación desde una unidad de disco flexible.

Una vez que la información está disponible, el funcionamiento del sistema se realiza de forma automática en su totalidad hasta que las funciones y productos básicos del mismo son puestos a disposición del usuario.

Es necesario indicar que las condiciones de operación previstas para la aplicación, aconsejan que en los procedimientos de operación diaria de la IAR, se incluya la tarea de proporcionar datos actualizados a la aplicación, como paso previo a su ejecución. PANDORA está diseñado, no obstante, para poder soportar en el futuro la transferencia automática de información entre el SAD y el ordenador en que sea definitivamente instalado.

C. Codificación de datos

Dado que la operación de PANDORA estará condicionada en la práctica, por la del SAD, es necesario definir la respuesta de la misma frente a la posible existencia de "lagunas" en el proceso de toma de datos.

Siguiendo los criterios utilizados en la rutina de tratamiento de datos de la IAR "El Cabril", se contempla la existencia de tres posibles tipos de anomalías o contingencias posibles durante la adquisición de la información:

Datos perdidos

Son debidos a la imposibilidad de registro de la información. Los datos son codificados rellenando el campo correspondiente con '8', (ej. 888.8).

Datos no válidos

Se producen por la falta de fiabilidad durante la adquisición. Los datos son codificados rellenando el campo correspondiente con '9', (ej. 999.9).

Calmas

Este tipo de contingencia, afecta sólo a las datos de viento, cuando la velocidad del mismo es inferior al umbral de medida de los sensores instalados. El valor utilizado como umbral por la aplicación es en la actualidad 0.22 m/s. Los datos son codificados rellenando el campo correspondiente con '7', (ej. 777.7).

D. Asignación de datos a variables y parámetros

Para prevenir la ausencia de información imprescindible para su funcionamiento, la aplicación dispondrá de tres tipos básicos de valores para asignar a las variables de la aplicación:

Valor fundamental

Corresponde a la asignación que la aplicación intentará realizar en primera instancia. En principio, deberá ser el valor más adecuado y deseable en cada situación.

Valor alternativo

Será asignado en segundo lugar, si la asignación del valor fundamental no es posible.

Valor por defecto

Valor definido para garantizar la respuesta de la aplicación cuando no ha sido posible la asignación de ninguno de los valores anteriores. Los valores por defecto son definidos, sobre todo, partiendo de un conjunto de estimaciones estadísticas realizadas sobre la base de datos histórica del emplazamiento.

La clasificación de tipos de asignación anterior también aplicará a las diversas opciones de configuración que sean incluidas en la aplicación (asignación de parámetros de dispersión, dimensiones de las rejillas de datos, etc.).

3.3 Funcionamiento global de la aplicación. Módulos gestores

Los procesos que son desarrollados por PANDORA una vez que se ha iniciado una sesión de trabajo son:

- ☐ Acceso a la aplicación.
- ☐ Inicialización y arranque del sistema.
- ☐ Accionamiento del Gestor de Datos.
- ☐ Accionamiento del Gestor de Modelos.
- ☐ Actualización/Reinicialización del sistema.

El funcionamiento del sistema gira en torno al Gestor de Datos, o interfaz principal del Entorno de Gestión de Datos. Desde el punto de vista del usuario, el objetivo de dicho interfaz es doble: por una parte, permite acceder a diversas funciones de revisión, comparación, representación o análisis de los datos de 48 horas, las cuales son muy útiles para realizar la supervisión diaria del funcionamiento del SAD, y, por otra parte, permite que el usuario pueda sintetizar la información necesaria para modelizar situaciones atmosféricas y las condiciones de operación previstas para la planta de incineración.

Una vez que el usuario ha supervisado la información de los datos, puede acceder al Gestor de Modelos, o interfaz principal del Entorno de Modelización. Dicho gestor pone a disposición del usuario una serie de herramientas que le permiten establecer un diagnóstico o un pronóstico del estado de calidad del aire en el emplazamiento. Este módulo se concibe como una herramienta de análisis a la que el usuario accede sólo de forma opcional.

Por todo lo anterior y, dado que la configuración actual de equipos impide la actualización automá-

tica de la información, el sistema se configura como una aplicación de ciclo abierto, *orientada hacia el análisis de la información*, en la que el usuario juega un papel fundamental, siendo además el responsable último de la operación del sistema. Este tipo de funcionamiento contrasta con la configuración típica de una aplicación de consola, en la que el sistema funciona de manera autónoma, en modo desatendido, actualizando de forma automática y periódica la información, y desencadenando la ejecución de modelos de dispersión que establecen el diagnóstico o pronóstico de la calidad del aire.

Las características y funciones del *Gestor de Datos* y del *Gestor de Modelos*, así como las indicaciones acerca de su uso se encuentran descritas en la *Guía del Usuario* de la aplicación.

Debido a su interés, algunas cuestiones relativas al funcionamiento del *Gestor de Modelos* serán objeto de atención en capítulos posteriores de este documento.

A continuación se resumen los aspectos más importantes del funcionamiento global de la aplicación.

3.4 Acceso a la aplicación

Tras el inicio del programa, el sistema solicita al usuario una clave de acceso, sin la cual no es posible acceder al mismo. El usuario dispone de tres intentos para introducir correctamente la clave. Si transcurridos tres minutos no hay respuesta por parte del usuario, o si el número de intentos excede un total de tres, el sistema procede a la finalización de la sesión de trabajo, tras advertir previamente de ello al usuario.

En el caso de que la clave de acceso sea correcta el programa desencadena la inicialización y arranque del sistema.

3.5 Inicialización y arranque del sistema

Es el proceso que conduce al establecimiento de una sesión de trabajo de PANDORA. El objetivo del mismo es la realización de determinadas tareas o cálculos sobre los datos, de manera que se simplifiquen en la medida de lo posible los tiempos de respuesta del *Gestor de Datos*, frente a las peticiones del usuario. Así por ejemplo, durante esta etapa, el sistema realiza la estimación numérica de

los campos de vientos que más tarde serán representados por el *Gestor de Datos*. La estimación en tiempo real de dichos campos ralentizaría considerablemente la representación gráfica de los mismos, en detrimento del tiempo de espera para el usuario.

En la versión actual de la aplicación, el proceso de arranque se inicia con el chequeo del estado de finalización de la última sesión de la aplicación, activándose el inicio de una nueva a partir de los valores de configuración existentes en aquella.

Las tareas que son realizadas por el sistema durante el proceso de arranque son las siguientes:

- ☐ Comprobación y verificación de la información.
- ☐ Control de calidad de los datos.
- ☐ Elaboración de estadísticas elementales y obtención de distribuciones de frecuencias.
- ☐ Reconstrucción de la información, si procede.
- ☐ Actualización de la información que es dependiente de la escala de trabajo.
- ☐ Generación de los campos de vientos correspondientes a las últimas 48 horas.

Algunos de los aspectos más interesantes relacionados con dichos procesos son tratados a continuación.

3.5.1 Comprobación y verificación de la información

Como paso previo al inicio de una sesión de trabajo, el sistema analiza la última sesión mantenida por el usuario y configura las opciones y aspecto del sistema de acuerdo con los mismos. A continuación, analiza el fichero de datos primarios residente en el disco duro del ordenador (fichero CD4_60.DAT) y comprueba el estado de la información, así como el periodo de datos disponible para el usuario. Dicho periodo se muestra al usuario en la línea o panel de información de la ventana que esté en ese momento activada. En el caso de que sea detectada falta de secuencialidad en los registros de datos, el sistema procederá a reordenar los periodos afectados, rellenando con códigos de "dato perdido", las posibles "lagunas" generadas.

Dado que no se realiza la actualización automática de la información, la situación más probable que puede encontrar el usuario es que el periodo de datos disponible en el momento de arranque

del sistema, no se corresponda con el periodo de estudio deseado, por lo cual deberá hacer uso de las opciones de *Actualización de datos*, disponibles a través del *Gestor de Datos*, una vez que éste último esté disponible.

En el caso de que el programa no encuentre ningún archivo de datos primarios en el disco duro del ordenador, el sistema no podrá proseguir el proceso de arranque, por lo cual solicitará al usuario la introducción de un fichero de dichas características. Si dicho fichero no es suministrado, el programa procederá al cierre de la aplicación. Sobre este punto es necesario indicar que PANDORA nunca trabaja con los datos originales suministrados por el usuario, sino con una copia de los mismos que es transferida al disco duro del ordenador.

Las tareas que, en resumen, son realizadas en este proceso son:

- ☐ Identificación de la configuración de la última sesión.
- ☐ Identificación de la información residente en el sistema (fichero CD4-60.DAT).
- ☐ Análisis de secuencialidad de la información primaria.
- ☐ Identificación de "lagunas" en los datos y codificación de los registros perdidos.

3.5.2 Calidad de la información

El sistema está preparado para operar de acuerdo con un único filtro o nivel de control de calidad de la información proveniente de los puntos de muestreo. Dicho filtro consiste en la aplicación de un conjunto de criterios de consistencia y plausibilidad, coherentes con los que actualmente son utilizados en la validación de datos de la IAR "El Cabil".

En su versión actual, PANDORA no ofrece al usuario opciones de validación o marcado de los datos anómalos o sospechosos, puesto que el sistema procesa una información "volátil", de la cual no se realiza ningún registro histórico. No obstante, los usuarios autorizados de la misma tienen a su disposición los elementos de control necesarios para validar o modificar parcial o totalmente los ficheros de información primaria, a partir de los cuales funciona la aplicación.

Los resultados del control de calidad por variables se guardan en ficheros que quedan a disposición del usuario (ver Anexo 1).

3.5.3 Estadística de los datos

PANDORA proporciona una serie de estadísticas elementales acerca de todas las variables medidas por la instrumentación meteorológica. La estadística que se elabora es común para todas las variables, si bien la aplicación podría acomodar fácilmente la elaboración de nuevos cálculos específicos para cada variable (los cuales serían identificados como "Estadística complementaria" por la aplicación).

Para todos los periodos disponibles y para cada variable, el sistema proporciona:

- ☐ Estadística básica
Cómputo de datos perdidos, anómalos, válidos y calmas.
- ☐ Estadística resumen
Valores medios, máximos y mínimos y desviación estándar.
- ☐ Distribución de frecuencias absolutas y relativas
La relación de intervalos y rangos de variación que se utilizan se muestran en la Tabla 3.3.

Para las magnitudes escalares los valores medios y las desviaciones estándar son calculadas a partir de N valores horarios como:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\sigma = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

En el caso de la dirección del viento, se realiza el promedio vectorial como:

$$v = \arctg(V_x/V_y) + F$$

donde:

$$V_x = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin(D_i)$$

$$V_y = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos(D_i)$$

$$F = \begin{cases} +180^\circ & \text{si } \arctg(V_x/V_y) < 180^\circ \\ -180^\circ & \text{si } \arctg(V_x/V_y) > 180^\circ \end{cases}$$

D_i = promedio de la dirección del viento en el instante i .

El valor medio de la desviación estándar del viento es calculado, a partir de los valores horarios, σ_i , como:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}$$

3.5.4 Reconstrucción de la información

Uno de los criterios básicos de diseño de PANDORA es que el sistema debe estar preparado para ofrecer asesoría al usuario de forma permanente. Para evitar aquellas situaciones en que el programa no pudiera dar respuestas debido a pérdidas de información primaria en las torres meteorológicas (cortes de red, fallos en los sensores, etc), el sistema ha sido dotado de capacidades de reconstrucción de datos perdidos siguiendo un procedimiento elemental de análisis y generación de nuevos datos.

Durante el proceso de arranque, tras la elaboración de los partes de control de calidad y la elaboración de la estadística elemental de los datos, el sistema analiza los intervalos de pérdida de información e intenta rellenar las lagunas detectadas recurriendo para ello a una estadística histórica o *patrón*, previamente definida para cada una de las variables consideradas imprescindibles para el funcionamiento del sistema. Dichas variables son WV11, DV11, WV21, DV21, WV22, DV22, T11, AT121 (ver Tablas 3.1 y 3.2)

Los patrones históricos de las variables han sido calculados a partir del registro histórico más extenso disponible para las torres meteorológicas de la IAR "El Cabril" en el momento de cierre del desarrollo de la aplicación (1992-94 para T1 y 1987-92 para T2). Dichos patrones son estimaciones horarias mensuales de las diferentes variables, aprovechando el buen comportamiento estadístico observado en la mayoría de ellas. Es necesario indicar que los patrones actuales pueden ser sustituidos por otras estimaciones, siempre y cuando se respete la estructura de los ficheros que contienen esta información en la versión actual de la aplicación.

A efectos prácticos, durante el proceso de reconstrucción de datos, el sistema identifica tres categorías fundamentales de intervalos de pérdida de información:

Tipo 1

Corresponde a la pérdida de un intervalo de datos sin que ninguno de sus extremos coincida con el principio o final del periodo de estudio (los datos perdidos están en medio del intervalo de estudio).

En este caso, la aplicación calcula las diferencias, d_1 y d_2 , entre los valores de la variable en estudio y los valores correspondientes del patrón, en los dos extremos del intervalo de pérdida de los datos.

Suponiendo linealidad en la variación de las desviaciones horarias de las variables respecto del patrón, el sistema rellena los datos perdidos asignando a cada variable un valor horario igual a la suma del correspondiente valor del patrón más la desviación resultante de la interpolación lineal entre d_1 y d_2 .

Tipo 2

Corresponde al caso de que el inicio del intervalo de pérdida de datos coincida con el de inicio del periodo de estudio de los datos.

En este caso el sistema asigna al primer registro perdido el correspondiente valor horario del patrón, y asigna a d_1 un valor nulo. El procedimiento continúa entonces de forma similar al Tipo 1, anteriormente comentado.

Tipo 3

Corresponde al caso de que el final del intervalo de pérdida de datos coincida con el del final del periodo de estudio.

En este caso el sistema asigna al último registro perdido el correspondiente valor horario del patrón, y asigna a d_2 un valor nulo. El procedimiento continúa entonces de forma similar al Tipo 1.

Es necesario indicar, no obstante, que todas las estadísticas y representaciones gráficas que proporcionan el Gestor de Datos (exceptuando los campos de vientos), vienen referidas, como es lógico, a los datos originales. La información que proporcionan los datos reconstruidos es utilizada en exclusiva para la generación de campos de vientos y para su posible uso por parte del Gestor de Modelos, en las condiciones que se indicarán en apartados siguientes de este documento.

3.5.5 Información de escala

Tal y como se describe en capítulos siguientes de este documento, PANDORA puede trabajar sobre dos escalas espaciales diferentes, las cuales son seleccionables por el usuario.

De acuerdo con el valor que se encuentre seleccionado para la escala de trabajo, así se modificará la extensión del dominio espacial sobre el que puede trabajar el sistema, y sobre el que son referidas todas las modelizaciones y representaciones espaciales que efectúa la aplicación. El área de trabajo se define en términos de una rejilla cartesiana cuadrada, cuyo centro se sitúa siempre sobre el punto de emisión de la IAR "El Cabril". Dependiendo del tipo de cálculos que efectúe el programa, el sistema de referencia utilizado por la aplicación se situará en el centro de la rejilla, o en el extremo inferior izquierdo. Las dimensiones del dominio de simulación del sistema son:

- ☐ Escala 1: área de 15x15 Km.
- ☐ Escala 2: área de 60x60 Km.

Las Tablas 3.4 y 3.5 indican las coordenadas UTM de las esquinas de las áreas de estudio, en función de la escala seleccionada.

Durante el proceso de arranque, el sistema analiza la escala utilizada durante la última sesión de trabajo, y configura toda la aplicación de acuerdo con los parámetros adecuados a la misma.

PANDORA almacena la información que es dependiente de la escala en determinados ficheros de la aplicación. Cuando se produce un cambio de escala dicha información es copiada sobre ciertos ficheros temporales, o se almacena en determinadas variables del sistema. A continuación el programa se reinicializa, de manera que son calculadas todas las variables y campos dependientes de la escala, con lo cual la aplicación se adapta a las nuevas dimensiones espaciales.

La información dependiente de escala es la siguiente:

- ☐ Coordenadas, dimensiones y resolución del área de estudio.
- ☐ Información topográfica.
- ☐ Puntos de muestreo utilizados para la generación de campos de vientos.
- ☐ Puntos testigo para el control de la contaminación.
- ☐ Campos de vientos.

- ☐ Ficheros de configuración de modelos y códigos de cálculo.

La descripción de los contenidos y estructura de los ficheros que contienen dicha información se encuentra resumida en el Anexo 1 ("Organización y ficheros de la aplicación") de este documento.

3.5.6 Generación de campos de viento

Durante el proceso de arranque, y tras la reconstrucción de datos, la aplicación PANDORA genera un conjunto de 48 campos de vientos, los cuales se construyen a partir de la información que se deduce de los datos de las torres. Dichos campos de vientos forman parte fundamental de la información que el sistema muestra de forma permanente al usuario dentro del *Gestor de Datos*. Esta información, igualmente, es utilizada como punto de partida por el *Gestor de Modelos* para la generación de datos de entrada a los diferentes códigos de dispersión y cálculo.

El proceso de generación de campos de vientos, así como la descripción de los diferentes algoritmos que en él intervienen, se describe en secciones posteriores de este documento.

3.6 Interrupciones de la aplicación

La interrupción del funcionamiento de la aplicación podrá estar motivada por alguna de las siguientes causas:

- ☐ Caída del sistema por corte de red
Incluye las interrupciones manuales accidentales de la aplicación.

El sistema no puede controlar tales situaciones. PANDORA sólo puede identificar los periodos de falta de suministro eléctrico que previamente hayan sido identificados por el SAD, para lo cual éste último asigna a los datos primarios el correspondiente código de dato perdido.

Dichos intervalos son identificados por la aplicación, procediéndose a cubrir las "lagunas" originadas mediante las técnicas de reconstrucción de datos indicadas en apartados anteriores de éste capítulo.

- ☐ Salida controlada por el usuario
Se producirá bien mediante el abandono voluntario por parte del usuario, bien tras la de-

tección por parte del mismo de problemas en la ejecución de alguno de los módulos de cálculo, gestión o transferencia de información.

La primera opción producirá un cierre ordenado de la aplicación. La segunda, puede permitir al usuario el intento de reactivación de la operación en la que han sido detectados problemas, mediante el cambio en la configuración de los parámetros de cálculo o representación.

- ❑ Interrupción abrupta motivada por errores severos de la aplicación

Si el error es capturable, provocará la salida inmediata de la actividad en curso y se comunicará al usuario la existencia del problema. Dependiendo de las características del mismo, se optará por el intento de reconfiguración y repetición del proceso en curso, o por la espera hasta el próximo ciclo de operación, en el caso de existir una conexión remota operativa con el SAD.

Si el error no es capturable, el sistema deberá ser reinicializado a bajo nivel.

La aplicación tendrá una finalización normal cuando ésta se haya producido a petición voluntaria del usuario o tras la finalización de un ciclo completo de operación sin errores. Por el contrario, la finalización será abrupta cuando se haya producido tras un error severo de la aplicación, tras una salida accidental o tras una reinicialización a bajo nivel del sistema.

3.7 Tratamiento de errores

La aplicación ha sido dotada de un sistema elemental de identificación y codificación de errores que no está basado en la existencia de un gestor central de errores.

A efectos prácticos, los errores de ejecución son clasificados en tres categorías básicas:

- ❑ Errores del sistema

Son identificables en tiempo de ejecución por la aplicación.

- ❑ Errores en la introducción manual de los datos

Los valores introducidos de esta forma son analizados y chequeados en tiempo real por la aplicación. Un vez identificado el error, el usuario es avisado de la situación procediéndose a la petición de nueva información.

- ❑ Errores de cálculo o de asignación

Los módulos de cálculo, asignación o análisis se encuentran dotados de un sistema de codificación de errores que permite detectar determinados problemas, de manera que las funciones en que se producen devuelven un código de error que permite identificar y registrar el punto en que se produce el problema y obrar en consecuencia.

3.8 Registro de incidencias

Durante su funcionamiento normal, algunos módulos de la aplicación PANDORA registran en un fichero de incidencias, el estado de finalización de determinadas tareas o procesos, de manera que en caso de caída del sistema, error o falta de consistencia de las estimaciones realizadas, sea posible seguir la traza del funcionamiento del sistema. Por lo general, tales ficheros son actualizados cada vez que se realiza una ejecución del módulo en cuestión.

3.9 Protección de la aplicación

Dado que la aplicación será instalada en un entorno compartido de ventanas, en el que deberá coexistir con otras aplicaciones, es necesario limitar el acceso a la misma para evitar la posibilidad de una manipulación accidental por parte de usuarios no autorizados.

Para ello, la aplicación tiene un acceso limitado mediante un sistema de protección simple basado en la utilización de una Clave de acceso.

Dicha palabra clave podrá ser modificada desde el menú de "Configuración" del sistema. Como medida de seguridad, para poder realizar esta operación, el usuario deberá introducir una nueva palabra clave o *Clave de Sistema*.

La *Clave de Sistema* es también necesaria para poder acceder a las opciones de edición de datos primarios, ya que una modificación indebida de los mismos podría afectar al normal funcionamiento de algunas opciones del sistema.

En el futuro, la *Clave de Sistema* podría servir para limitar el acceso a las partes más sensibles de la aplicación (tales como comunicaciones, acceso a datos históricos, etc.).

4

DESCRIPCION DE ESCENARIOS METEOROLOGICOS

4.1 Definición de escenarios meteorológicos

Dentro del contexto de este proyecto por *escenario meteorológico* se entiende cada una de las situaciones ambientales que pueden ser parametrizadas en los términos requeridos por los modelos de dispersión y algoritmos de cálculo incluidos dentro de la aplicación PANDORA. Como puede apreciarse dicha definición no se corresponde exactamente con la acepción más general de dicho concepto, por la cual el término de *escenario meteorológico* se encuentra asociado a un proceso físico determinado, de dinámica por lo general cíclica o muy frecuente.

De acuerdo con la anterior definición, y considerando las características y requisitos de los códigos de cálculo y dispersión de PANDORA, un escenario queda definido por la descripción temporal, hora a hora, de los siguientes parámetros o variables de escenario:

a. Condiciones ambientales

- ☐ Identificación temporal (año, mes, día, hora, día juliano).
- ☐ Clase de estabilidad, según la clasificación de Pasquill.
- ☐ Tasa de precipitación, en mm, o código de precipitación equivalente.
- ☐ Temperatura ambiente, en °C.
- ☐ Altura estimada de la capa de mezcla, en m.

b. Dinámica atmosférica

- ☐ Valor del viento en altura, en m/s.
- ☐ Viento medido en varias estaciones de medida, o campo de vientos en superficie.

Debe comprenderse que la descripción de los escenarios mediante la anterior relación de variables viene impuesta por los requisitos mínimos de funcionamiento de los modelos incluidos en la aplicación, más que por la conveniencia o idoneidad del uso de tales variables. Dicha descripción, sin embargo, es suficiente para los objetivos de diseño propuestos para la primera versión de la aplicación.

No obstante, la representación interna de los escenarios actualmente utilizada por PANDORA permite acomodar sin dificultad, además de los anteriores, un total de 10 variables o descriptores más.

4.2 Asignación de datos a las variables de escenario

Tal y como ha sido comentado en secciones anteriores de este documento, para prevenir la ausencia de información imprescindible para su funcionamiento, la aplicación dispone de tres tipos básicos de valores para asignar a las variables de escenario:

☐ Valor fundamental

Corresponde a la asignación que la aplicación intentará realizar en primera instancia. En principio, deberá ser el valor más adecuado y deseable para cada variable.

☐ Valor alternativo

Será asignado en segundo lugar, si la asignación del valor fundamental no es posible.

☐ Valor por defecto

Valor definido para garantizar la respuesta de la aplicación cuando no ha sido posible la asignación de ninguno de los valores anteriores. Los valores por defecto han sido definidos, sobre todo, partiendo de un conjunto de estimaciones estadísticas realizadas sobre la base de datos histórica del emplazamiento, a partir de los valores de diseño de determinado equipamiento de la instalación, o a partir de valores razonables basados en la experiencia en el uso de modelos de dispersión.

4.3 Datos de escenario

Las previsiones de diseño de la aplicación PANDORA suponen que su funcionamiento estará coordinado con la adquisición de datos en las dos torres ubicadas en la IAR "El Cabril".

El origen de la información necesaria para la definición de las variables descriptoras de las condiciones ambientales para cada escenario es el siguiente:

A. Condiciones ambientales

La selección de variables se realiza de acuerdo con la siguiente tabla de asignaciones:

Variable	Valor fundamental	Valor alternativo	Valor por defecto
Temperatura	Temperatura T11	Temperatura T21	A partir del patrón horario mensual
Clase de estabilidad	A partir de $\Delta TR121$	A partir de $\Delta TR121$	A partir del patrón horario mensual
Precipitación	Precipitación PR10	—	—
Altura de la capa de la mezcla	A partir de los datos de la T1	—	—

Tal y como se indica en la tabla anterior, para definir los valores de las variables indicadas, la aplicación considerará los datos cuyo origen se muestra en la primera columna (valores fundamentales). Si dicha información no existiera o no estuviera disponible, la aplicación intentará utilizar los datos cuyo origen se indica en la segunda columna (valores alternativos). En el caso de que no estuviera disponible o no fuera válida la información proveniente de cualquiera de las fuentes de información anteriores, PANDORA deberá recurrir a una estadística basada en los datos históricos del emplazamiento, la cual está incluida en los *patrones horarios mensuales* (tal y como fue indicado en apartados anteriores de este documento).

La clase de estabilidad es establecida a partir de la información disponible acerca del gradiente térmico, de acuerdo con los criterios de Pasquill (clases de estabilidad de 1 a 7, ver Tabla 4.1). En el caso de que los valores de gradiente térmico no estuvieran disponibles, el sistema procedería a realizar las estimaciones oportunas partiendo del patrón horario mensual adecuado.

Cuando el dato de precipitación no exista o no esté disponible, la aplicación, a efectos de cálculo, asumirá un valor de precipitación igual a cero. Los datos de precipitación son usados por PANDORA únicamente para modelizar los procesos de 'lavado' de contaminantes debido al efecto de la lluvia durante las etapas de transporte y dispersión. Para ello, la aplicación realiza una clasificación de la precipitación de acuerdo con las categorías indicadas en la Tabla 4.2. El programa asigna entonces un código de 0 a 6, en función de la intensidad y tipo de precipitación; el valor de dicho código es la información que finalmente se suministra a los módulos de cálculo.

El valor de la altura de la capa de mezcla que será utilizado en los cálculos de dispersión, se establece de acuerdo con los algoritmos que en ese momento se encuentren seleccionados en la configuración del sistema.

Dado que no existe información histórica acerca de esta variable, en la versión actual de PANDORA, la estimación de la altura de la capa de mezcla es "única", en el sentido de que no existen valores alternativos ni por defecto. La estimación se realiza a partir de los ficheros de datos reconstruidos, con lo cual se descarta la posibilidad de que dicho valor no pueda ser estimado. El usuario dispone de la posibilidad de introducir manualmente un valor que permanecerá constante a lo largo de la simulación en curso.

La descripción de los algoritmos y métodos que han sido incluidos en la aplicación serán comentados en secciones posteriores de este documento.

B. Dinámica atmosférica

Selección del valor del viento en altura

A efectos de modelización de la dispersión de contaminantes, es necesaria la estimación del valor del viento existente por encima del límite superior de la capa de mezcla. Dicho dato es utilizado para generar un campo de vientos, homogéneo en todo el dominio de simulación, cuyos valores en todos los puntos son iguales al del dato suministrado, tal y como se verá más adelante.

Una estimación rutinaria del viento en altura podría ser obtenida a partir de la información sinóptica reflejada en los mapas que periódicamente emiten diversos centros meteorológicos, entre ellos el INM (Instituto Nacional de Meteorología) español o el ECMWF (European Centre For Medium Range Weather Forecast), en Reading (Gran Bretaña). Esta información es accesible por radio-facsimil, o vía Internet.

La posibilidad de uso de la citada información, o la de incorporar un módulo de digitalización y análisis de la misma, no ha sido contemplada para desarrollar la primera versión de PANDORA.

En su lugar, de acuerdo con los resultados de las anteriores fases del proyecto, el valor del viento en altura es obtenido a partir de las torres meteorológicas instaladas en las cercanías de la instalación.

El orden de asignación previsto para el valor del viento en altura es el siguiente:

- ❑ Valores fundamentales:
VV22, DV22 (T2, nivel 40 m).
- ❑ Valores alternativos:
VV21, DV21 (T2, nivel 10 m).
VV11, DV11 (T1, nivel 10 m).
VVR11, DVR11 (T1, nivel 10 m sensor redundante).

El orden de asignación anterior ha sido establecido teniendo en cuenta los análisis efectuados durante las fases anteriores del proyecto, considerando que el viento medido en T2 presentaba un comportamiento similar al de una estación situada en las cotas superiores de Sierra Albarrana. El viento medido en dicha estación, a su vez, mostró un comportamiento parecido al del viento estimado a partir de los mapas sinópticos.

Selección del campo de vientos en superficie

Al igual que las variables definidas anteriormente, la descripción del campo de vientos en superficie se encuentra condicionada por las características de los modelos y algoritmos de estimación incluidos en la aplicación.

PANDORA incorpora módulos tanto de diagnóstico como de pronóstico del campo de vientos en la zona de estudio, los cuales pueden ser calculados con o sin ajuste de topografía. Igualmente, la aplicación ha sido preparada para poder aceptar en el futuro nuevos modelos o algoritmos de estimación, o salidas provenientes de los mismos.

Por su importancia, los procedimientos seguidos para la generación del campo de vientos en la zona serán comentados en los siguientes capítulos de este documento.

5

GENERACION DE CAMPOS DE VIENTOS

5.1 Introducción

Para la generación de campos de vientos, *PANDORA*, dispone de un módulo de diagnóstico, *TOPWIND*, y de un modelo de pronóstico denominado *2DFLOW*. Este último está específicamente diseñado para la simulación de vientos de ladera y valle, los cuales son de gran interés para el estudio de la dispersión de contaminantes en la IAR "El Cabril".

TOPWIND es utilizado para:

- Generación de los campos de vientos asociados a las 48 horas del periodo de estudio, los cuales son usados para las representaciones gráficas del *Gestor de Datos*.
- Generación de campos de vientos como datos de entrada al modelo de dispersión integrado en el *Gestor de Modelos*.

2DFLOW es utilizado únicamente como parte integrante de los procedimientos de análisis del *Gestor de Modelos*, tal y como se describirá más adelante.

5.2 El módulo de diagnóstico *TOPWIND*

El módulo de generación de campos de vientos *TOPWIND* está compuesto por un conjunto de funciones cuyo objetivo es obtener una estimación de los valores de velocidad y dirección del viento en los puntos de una rejilla cartesiana cuadrada de $N_x \times N_y$ puntos, equi-espaciados a distancias $\Delta x = \Delta y$, según las direcciones X e Y, respectivamente.

El sistema de referencia de dicha rejilla de valores tiene su origen de coordenadas en el extremo inferior izquierdo del área de estudio, la cual se supone igualmente cuadrada y de dimensiones $N_{\Delta x} \times N_{\Delta y}$. La dirección X se toma según la línea Oeste-Este, en tanto que la dirección Y se toma según la línea Sur-Norte.

En la configuración actual de *PANDORA*, la rejilla de valores utilizada para las representaciones gráficas y cálculos de dispersión de contaminantes es de 16×16 nodos. El espaciado de la red varía en función de la escala de trabajo que haya sido seleccionada en el menú de "Configuración" del *Gestor de Datos*. Los nodos son numerados desde 1 a 16, desde el origen del sistema de referencia hacia el E, para la dirección X, y de forma similar, hacia el N, para la dirección Y.

TOPWIND estima los valores del campo de vientos en los nodos de la rejilla de trabajo (o *rejilla de vientos*) a partir de la interpolación de los datos medidos o estimados en un total de hasta 30 puntos de muestreo.

Conocidos los valores del viento en dichos puntos, el programa obtiene por interpolación o extrapolación los valores correspondientes del viento en los nodos de la rejilla. Para ello, el programa usa los datos de los N_p puntos de muestreo más próximos al nodo en cuestión, pesados de acuerdo con el inverso del cuadrado de la distancia entre ambos.

TOPWIND lee los datos de viento de los puntos de muestreo, y transforma los valores de velocidad y dirección en componentes cartesianas de transporte U y V, descartando los datos perdidos o no válidos, las calmas y los datos pertenecientes a puntos de muestreo que hayan sido marcados como "no activos" por el usuario o por el código.

A continuación, el programa calcula las distancias de los puntos de muestreo a todos los nodos de la red. Para cada nodo, el sistema identifica las estaciones más cercanas al mismo, hasta un número máximo de N_p estaciones. Dicha información, así como las distancias correspondientes a las estaciones así identificadas, es almacenada y utilizada para obtener las componentes U y V del viento en cada nodo a partir de la expresión:

$$U_{ij} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \frac{u_k}{d_{ijk}^2}$$

$$V_{ij} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \frac{v_k}{d_{ijk}^2}$$

donde:

d_{ij} = Distancia desde el nodo (i,j) a la estación k.

$i, j = 1 \dots N$

$L = 1 \dots N_p$

En la configuración actual de *TOPWIND*, N_p es igual a 5.

Cuando el número de estaciones disponible para realizar la interpolación es inferior a tres, *TOPWIND*, avisa al usuario acerca de la falta de fiabilidad de las estimaciones. Si dicho número es inferior a 2, el código detiene el proceso de cálculo.

5.3 Ajuste topográfico del campo de vientos

Tal y como se ha explicado anteriormente, *TOPWIND*, realiza un tratamiento estrictamente matemático. El campo de vientos obtenido, por tanto, no conserva la masa, ni tampoco refleja explícitamente los accidentes o interacciones del terreno (si bien éstos se encuentran implícitamente representados en los valores de viento medidos en los puntos de muestreo). A cambio el algoritmo es muy eficiente desde el punto de vista computacional.

Para solucionar en parte este problema, el programa permite realizar un ajuste elemental del campo de vientos interpolado al terreno, de manera que el campo refleje, al menos de una forma sencilla, las principales características orográficas del área de estudio.

TOPWIND utiliza una descripción muy simple del terreno. En cada nodo, los principales accidentes del terreno son contemplados como un segmento (que puede simular una cresta o un valle) orientado de acuerdo con la dirección principal del accidente en cuestión. Dicho segmento se utiliza entonces para modificar la dirección del viento calculado en cada nodo, en función de la posición relativa del viento respecto del mismo. Para ello, cada segmento se define en términos de su ángulo de orientación respecto de la horizontal (línea W-E), y en términos de dos coeficientes que se asignan a cada uno de las vertientes (lados) definidos por el mismo. Los coeficientes, cuyos valores se definen entre 0 y 1, deben ser asignados *a priori* por el usuario, de manera que sean inversamente proporcionales a la pendiente del terreno a ambos lados del segmento. De tal forma, una pendiente grande a un lado del segmento, debe traducirse en una mayor modificación del viento y, por tanto, en un coeficiente menor.

Las componentes del viento en cada nodo de la rejilla se modifican según el siguiente procedimiento:

- ☐ Se identifica la vertiente respecto del segmento de la que procede el viento.
- ☐ Se obtiene la posición relativa del vector viento respecto del obstáculo.
- ☐ El ángulo de posición relativa se utiliza para obtener las componentes perpendicular y paralela del viento respecto del segmento que representa el accidente topográfico.
- ☐ La componente perpendicular del viento se reduce en intensidad según la magnitud indi-

cada por el coeficiente de pendiente correspondiente.

- ☐ La componente paralela del viento se aumenta en función de la disminución efectuada sobre la componente perpendicular, imponiendo la restricción de que se conserve la intensidad del viento.

El efecto neto de la anterior transformación se traduce en una ligera modificación de la dirección del viento en el nodo en cuestión, la cual tiende a alinearse con la dirección del obstáculo, manteniéndose constante la intensidad del viento.

5.4 Puntos de muestreo y estaciones virtuales

En los apartados anteriores ha sido descrita a grandes rasgos la metodología que sigue el módulo *TOPWIND* para crear la rejilla de vientos a partir de un conjunto de valores medidos o estimados en determinados puntos de muestreo. El número mínimo de puntos necesario para que el programa pueda ofrecer resultados es de tres.

En principio, *TOPWIND* es un módulo de propósito general, capaz de leer los datos de hasta un total de 30 estaciones o puntos de medida para realizar la interpolación del campo de vientos. Dado que, en el caso que nos ocupa, solamente existen dos puntos de medida reales en los que se está realizando de manera continua la medida de variables meteorológicas, no sería posible, en principio, proceder a la generación del campo de vientos en la zona.

Para solucionar tal problema, han sido considerados los resultados de las anteriores fases del proyecto, en las que fueron relacionadas las medidas de velocidad y dirección del viento en los puntos de muestreo utilizados durante las campañas de medida, con los valores registrados en la antigua Torre Base de la instalación (actualmente T2), y con los datos medidos en la estación que fue ubicada en el Cerro de los Morales (en un lugar próximo al que hoy en día ocupa la torre T1).

De tal forma, conocidas las combinaciones de velocidad y dirección del viento registrados en T1 y T2 (o torres de referencia) es posible conocer con cierta aproximación los valores que podrían estar siendo medidos en los puntos de muestreo que fueron utilizados en las campañas de medida, como si en ellos existiera en la actualidad instru-

mentación. Dichos puntos han recibido el nombre de estaciones virtuales, y a todos los efectos son utilizados por la aplicación como si en ellos existiera instrumentación real que suministrara información, hora a hora, del viento en los mismos.

Una estación virtual se define en términos de los siguientes parámetros:

- ☐ Posición geográfica (coordenadas UTM).
- ☐ Altura sobre el nivel del mar, en m.
- ☐ Estado (activa o no activa).
- ☐ Clave de identificación (ocho caracteres).
- ☐ Descriptor (comentario a incluir por el usuario).

Es posible descartar o incluir estaciones del proceso de generación de campos de vientos, activando o desactivando la variable de estado asociada a cada estación. *TOPWIND* desactiva de forma automática aquellas estaciones cuyas coordenadas excedan los límites del área de estudio que en ese momento esté definida (de acuerdo con la escala de trabajo seleccionada), descartándolas de todo el proceso de cálculo.

La asignación de datos a las estaciones virtuales se realiza de acuerdo con los patrones de viento y relaciones establecidas en las fases anteriores del proyecto.

La relación de puntos utilizados como estaciones virtuales para la generación de campos de vientos, se muestra en las Tablas 5.1 y 5.2. Los puntos de muestreo (torres de referencia más estaciones virtuales) que se utilizan para la generación de los campos de vientos para la Escala 1 (15x15 km.) coinciden exactamente con los que fueron utilizados durante las campañas de medida (7 puntos en total). Dado que dichos puntos están muy concentrados espacialmente, para la Escala 2 (60x60 km.) han sido añadidos dos puntos adicionales, ubicados en las cotas más altas del área de estudio correspondiente. Para tales puntos, se ha supuesto un comportamiento similar al de los niveles más altos de medida de las torres de referencia (por semejanza con el comportamiento entre la estación de Sierra Albarrana y el nivel 2 de la T2).

5.5 Información en las estaciones virtuales. Generación de campos de vientos

El procedimiento que sigue *TOPWIND* para construir un campo de vientos para cada hora de registro, sigue los siguientes pasos:

1. El programa lee los datos de las torres de referencia y analiza si existe o no un patrón de vientos asociado a los datos medidos en las mismas. Para ello, el código evalúa los valores de velocidad y dirección en los niveles de 10 m de ambas torres y analiza la ocurrencia de determinadas combinaciones, de acuerdo con los patrones establecidos en las Tablas 5.3 a 5.5.
2. Si se ha identificado la ocurrencia de un patrón determinado, el código asigna inicialmente un rumbo y un rango de variación de velocidad probable a cada una de las estaciones virtuales.
3. Se asigna un valor de velocidad y dirección a cada estación, corrigiendo el rumbo asignado de acuerdo con el valor de dirección medido en las torres, y asignando una velocidad dentro del rango de variación establecido, de forma proporcional a la velocidad medida en la T1.
4. Si no se ha identificado ningún patrón, el programa asigna valores de velocidad y dirección estableciendo las correspondencias entre estaciones indicadas en la Tabla 5.6, y procediendo de forma similar a la señalada en el paso 3.
5. Finalmente, los datos asignados, junto con la información de escenario de la hora correspondiente, es almacenada y utilizada para la generación del campo de vientos mediante los procedimientos de interpolación y ajuste indicados anteriormente.

5.6 Modos de análisis y pronóstico del campo de vientos

Por tratarse de una labor de análisis, formalmente, el pronóstico del campo de vientos es una estimación que sólo está disponible para el usuario a través del Gestor de Modelos de la aplicación.

En su versión actual dispone de dos procedimientos diferentes, pero complementarios, para realizar una estimación predictiva del campo de vientos.

En la versión actual de *PANDORA*, el pronóstico del campo de vientos se realiza mediante la aplicación del módulo de diagnóstico *TOPWIND*, o mediante la ejecución de un modelo específico, en

aquellos casos en que sea posible identificar la existencia de una situación o proceso físico determinado.

En el momento actual, la aplicación únicamente incorpora un modelo de pronóstico específico (modelo 2DFLOW) para vientos de ladera, si bien su estructura puede permitir la incorporación de otros modelos en el futuro.

El procedimiento seguido para la generación del pronóstico del campo de vientos es seleccionado por el usuario, mediante la elección de un "Modo de Análisis", desde el menú correspondiente del Gestor de Modelos, tal y como se indica en apartados posteriores de este documento.

En resumen, la aplicación puede ejecutar uno de los dos procedimientos siguientes:

Procedimiento 1: Aplicación de TOPWIND

En este caso, la aplicación genera una base de datos de pronóstico para ciertas variables de las torres de referencia. Dichas variables incluyen todos los datos de viento y todas las variables necesarias para definir un escenario horario de simulación para el uso de modelos de dispersión.

Una vez que ha sido definida la base de datos de pronóstico para las torres de referencia, el sistema aplica los criterios ya establecidos para deducir el viento esperado en las estaciones virtuales. A continuación, el campo de vientos de pronóstico es generado mediante la aplicación del módulo de interpolación de vientos de TOPWIND.

Procedimiento 2: Aplicación de 2DFLOW

Tras analizar el intervalo de simulación propuesto por el usuario, el sistema comprueba si incluye algún periodo en el que se pueda desarrollar un flujo anabático o catabático. Si ello es así, la aplicación chequea la consistencia de los campos de vientos generados mediante diagnóstico sobre datos observados, con los campos de vientos que pueden ser generados con el modelo. Si los datos son consistentes, se lanza la ejecución del modelo y se utilizan los campos de vientos generados por 2DFLOW, a continuación de la última hora para la que existían datos reales.

Para ello, el sistema calcula o evalúa:

- ☐ Horas de salida y puesta de sol.
Se considera que el inicio del desarrollo de los vientos catabáticos corresponde a los momentos posteriores a la puesta de sol, o al momento de la salida, para vientos anabáticos.
- ☐ Condiciones ambientales diagnosticadas o previstas en dichos instantes.
La estabilidad atmosférica debe ser estable o ligeramente estable o, y el viento débil (≤ 1 m/s al anochecer).
- ☐ Condiciones ambientales promedio.
En el caso de que el intervalo de pronóstico comience a una hora en la que se estima que el régimen puede estar ya desarrollado, se evalúa que el promedio de la dirección del viento entre el instante de salida o puesta de sol y el inicio del intervalo de pronóstico tienda a alinearse con el eje del valle.

Ejemplo

Se dispone de datos hasta las tres de la madrugada y se desea realizar una simulación desde las 19 horas de la tarde, hasta las 9 de la mañana del día siguiente.

En este caso el sistema sigue los siguientes pasos:

1. Se calcula la hora de puesta de sol (p. ej. las 21:30) y la hora de salida (p. ej. las 6:30).
2. El sistema evalúa la condiciones existentes en torno a las 22 horas (registro horario más cercano a las 21:30), así como las condiciones promedio en las torres de referencia desde las 22 a las 3.
3. Si las condiciones son favorables, la aplicación desencadena la ejecución del modelo desde las 21:30 y asigna a los escenarios de simulación el campo de vientos diagnosticado durante el arranque de la aplicación a las horas comprendidas entre las 19 y las 3, y los campos de viento horarios previstos por 2DFLOW desde las 3 de la madrugada hasta tres horas después de la puesta de sol.

El anterior procedimiento significa entre otras cosas:

- ☐ Se da prioridad al diagnóstico con datos reales frente al pronóstico.

- Se supone cierta inercia del régimen de derrame tras la salida del sol. No obstante, el modelo comienza a acumular el efecto de "erosión" anabática sobre el régimen nocturno desde los instantes posteriores a la salida del sol. Si la intensidad del derrame es suficiente, dicho régimen permanecerá tras la salida del sol. En caso contrario, las ecuacio-

nes del modelo tratarán de "imponer" rápidamente un flujo anabático (valle arriba) en el emplazamiento.

Debido a su interés, la descripción de las características del modelo *2DFLOW* se realiza en secciones posteriores de este documento.

6

VIENTOS DE LADERA Y VALLE. MODELO 2DFLOW

6.1 Introducción

El programa 2DFLOW es un código específicamente diseñado para la modelización de vientos de drenaje, así como de los procesos de difusión y transporte asociados a los mismos. Dada la importancia de este tipo de circulaciones en la IAR "El Cabril", ha sido realizada una revisión y una profunda adaptación de los módulos de cálculo de vientos de ladera y valle de dicho código, con el objeto de incorporarlos a la sistemática de análisis de la aplicación PANDORA.

El programa 2DFLOW fue desarrollado dentro del proyecto de investigación ASCOT (*Atmospheric Studies in Complex Terrain*) llevado a cabo por la Oficina de Sanidad e Investigación del Medio Ambiente del Departamento de Energía del Gobierno de EEUU, en la región de Geysers (California). Originalmente, el código fue escrito en lenguaje FORTRAN-77 para un ordenador DEC VAX 11/780, con sistema operativo VMS V.4.3. La memoria requerida para una ejecución típica oscila en torno a unos 500 Kbytes. Dicho código se encuentra disponible a través del Banco de Datos de la Nuclear Energy Agency (NEA).

6.2 Bases conceptuales del modelo

Al atardecer y en condiciones de estabilidad sobre terreno inclinado, el enfriamiento radiativo del aire situado en las capas inferiores, próximas al suelo, puede originar condiciones de inestabilidad bajo las cuales dichas capas comiencen a desplazarse a lo largo de la pendiente por efecto de la gravedad. Este mecanismo da lugar a la formación de vientos de ladera descendentes, que pueden converger y ser canalizados por la topografía del terreno, originando vientos de drenaje que siguen los ejes de los valles, de manera similar a como lo harían las aguas en una cuenca hidrográfica.

Los flujos de drenaje, por tanto, se encuentran muy influidos por las características del terreno en que se forman, mostrando mayor variabilidad espacio-temporal a medida que aumenta la complejidad del mismo. Por lo general, son más continuos y persistentes en cañones profundos y valles estrechos, encontrándose térmicamente estratificados como consecuencia del drenaje proveniente de laderas con diferentes pendientes.

En condiciones óptimas para el desarrollo de estos vientos el enfriamiento inicial en superficie se sitúa en torno a los 6-8°C/hora durante la primera hora (después de la caída del sol), manteniéndose constante y en torno a los 0.5-1.5°C/hora durante el resto de la noche (ref. 2). El desencadenamiento de los mismos es variable, pudiendo oscilar entre 10 minutos y un par de horas (ref. 3,4). La ruptura del régimen nocturno suele ser más rápida, si bien se ha podido constatar su mantenimiento incluso hasta un par de horas después de la salida del sol; ello es debido a la inercia de la inversión de tierra que "conduce" el desarrollo de los vientos catabáticos, origen de estos flujos.

La intensidad del drenaje es variable, aunque por lo general no suele superar los 6 m/s, situándose su valor medio en torno a los 2 m/s (ref. 2,3,4); esta velocidad es, además, independiente de la existente en las cimas de las laderas que conforman la cuenca. El espesor de la capa de drenaje es variable y proporcional a la intensidad del flujo. Por lo general, dicha capa tiende a profundizarse con la distancia, como consecuencia del efecto de arrastre sobre las capas de aire inmediatamente superiores. En terreno poco accidentado, este espesor es aproximadamente igual a 0.8 veces el de la inversión de tierra que limita al flujo en la dirección vertical. El perfil vertical de velocidades muestra un máximo en torno a 0.2-0.4 veces la anchura de dicha inversión. En terreno complejo estos datos dependen fuertemente de las características del terreno.

El análisis y modelización de los vientos de drenaje puede ser de gran interés en estudios de difusión atmosférica, sobre todo en aquellas zonas cuya topografía, como en el caso que nos ocupa, facilite su formación con relativa frecuencia.

6.3 Descripción teórica del modelo

El programa 2DFLOW realiza una modelización bidimensional de los vientos de drenaje que se desarrollan sobre una zona determinada, utilizando como información fundamental la topografía del terreno con un alto grado de detalle. Los resultados de la modelización representan el campo de vientos en el área de estudio sobre una malla cartesiana rectangular, cuyo sistema de referencia se sitúa sobre la esquina inferior izquierda de la misma. Los ejes X e Y se consideran de forma similar a la indicada para el módulo TOPWIND, en apartados anteriores de este documento.

En su configuración actual el modelo trabaja internamente sobre una rejilla cuadrada de 31x31 nodos, de la que se realiza una simplificación a 16x16 para la generación y construcción de los escenarios meteorológicos necesarios para el modelo de dispersión de PANDORA. El espaciado de las rejilla de vientos se toma como $\Delta x = \Delta y = 500$ m para la Escala 1 de trabajo y de $\Delta x = \Delta y = 2000$ m para la Escala 2.

El modelo puede partir de una atmósfera en reposo (con lo cual simulará el efecto de drenaje puro) o se le puede suministrar información sobre el viento geostrofico y/o el existente por encima de la capa de drenaje.

El código está internamente preparado para realizar el cálculo de concentraciones mediante un modelo específico de partícula basado en el método de Monte Carlo. Dicho módulo de dispersión proporciona valores de concentración esperados en los nodos de la red de vientos, así como valores de la evolución temporal de la concentración en un receptor situado en cualquier punto de la red. Dicha opción, no obstante, ha sido puesta fuera de servicio en PANDORA.

6.3.1 Ecuaciones del modelo

Teniendo en cuenta que los vientos de drenaje son flujos de baja velocidad y estratificados térmicamente, en su tratamiento se ha supuesto válida la aproximación hidrostática.

Las ecuaciones de movimiento en un sistema de coordenadas generalizado son (ref. 5):

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\rho u \frac{\partial u}{\partial x} - \rho v \frac{\partial u}{\partial y} - \rho w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_v - \rho g \frac{\partial z_g}{\partial x}$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\rho u \frac{\partial v}{\partial x} - \rho v \frac{\partial v}{\partial y} - \rho w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_u - \rho g \frac{\partial z_g}{\partial y}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

donde $z = z_r - z_g$, siendo z_r la altura del punto sobre un nivel de referencia y z_g la altura del terreno sobre el citado nivel.

Sobre este conjunto de ecuaciones es posible realizar las siguientes aproximaciones e hipótesis:

1. Descomposición de Reynolds: cualquier magnitud se puede descomponer como la suma de su valor medio, más un término perturbativo de corrección.
2. Las correlaciones triples se consideran despreciables.
3. Se considera despreciable el transporte turbulento de las fluctuaciones en la densidad en la dirección paralela a la superficie.
4. El sistema de ecuaciones se integra verticalmente suponiendo constantes las componentes de la velocidad en la capa de drenaje.
5. Las fluctuaciones en la densidad se sustituyen por las de temperatura potencial usando la aproximación de Boussinesq.
6. Se supone que las perturbaciones a mesoscala en la presión son un balance hidrostático, por tanto su gradiente se expresa en términos de las perturbaciones en la temperatura potencial de la capa de drenaje y de la pendiente de la misma.
7. El transporte turbulento horizontal de momento se modeliza según la teoría del transporte de gradiente.
8. La tensión de la capa de drenaje en superficie e interfacial (en el límite superior de dicha capa) se modelizan según la aproximación de Mannins y Sawford (ref. 4) como:

$$u'v']_0 = -C_D V_u$$

$$u'v']_h = -V(u - u_a)E$$

donde:

C_D : Coeficiente de arrastre.

u_a : Componente zonal del viento por encima de la capa de drenaje.

U : Módulo de la velocidad en el interior de la capa.

V : Módulo de la velocidad de cizalladura interfacial.

E : Parámetro de arrastre interfacial (refs. 1,3).

Las ecuaciones finales del modelo son:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} + K_H \nabla^2 u - \frac{C_D V u}{h} - \frac{V(u - u_a)E}{h} - \\ &\quad - f(v_g - v) + \frac{\Theta_D g}{\Theta_R} \left[\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_g}{\partial x} \right] \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} + K_H \nabla^2 v - \frac{C_D V v}{h} - \frac{V(v - v_a)E}{h} - \\ &\quad - f(u - u_g) + \frac{\Theta_D g}{\Theta_R} \left[\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial z_g}{\partial y} \right] \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= -\frac{\partial u h}{\partial x} - \frac{\partial v h}{\partial y} + K_H \nabla^2 h + V E\end{aligned}$$

K_H indica la viscosidad horizontal de los remolinos turbulentos y se define en función de la cizalla horizontal del viento. Θ_R y Θ_D representan la temperatura potencial de referencia y la desviación respecto de la misma en la capa de drenaje. Para que el sistema de ecuaciones sea resoluble, es necesario medir o calcular u_a y v_g (viento en altura, geostrófico o de gradiente).

El flujo de drenaje es, como era de esperar, proporcional al enfriamiento relativo de las capas inferiores y a la pendiente del terreno. Los términos de perturbación de la presión a mesoscala (que contienen a h) son independientes del gradiente local de pendiente del terreno y dan cuenta de la divergencia del flujo turbulento de momento en la capa. Estos términos tienden a retardar el movimiento, siendo responsables de forzarlo en zonas de poca inclinación.

6.4 Principales características del programa 2DFLOW

6.4.1 Datos de entrada e inicialización del modelo

En su versión actual, el programa 2DFLOW necesita información acerca de la topografía y parámetros específicos del lugar al que se adapta, así como de cierta información de inicialización, incluida la relativa a las condiciones meteorológicas existentes en el inicio de la simulación, las cuales

son asignadas por PANDORA de forma automática a partir de los datos de las torres de referencia.

La descripción de la estructura y contenido de los ficheros de entrada al modelo se encuentra resumida en el Anexo 1 de este documento ("Organización y ficheros de la aplicación").

6.4.2 Estructura del programa

La estructura del modelo 2DFLOW es muy simple. El código consta de un programa principal, cuatro subrutinas de inicialización y dos subrutinas para facilitar las salidas de resultados, las cuales no realizan ningún cálculo y se limitan a servir de vía de comunicación entre el Gestor de Modelos y el código.

El código principal del programa consiste esencialmente en un bucle DO WHILE controlado por una variable que se encarga de representar el tiempo de simulación transcurrido. Dentro de dicho bucle, a intervalos regulares especificados por el usuario, se realiza la integración de las ecuaciones del modelo. Cuando el valor de la variable de control es superior al de la duración del periodo de simulación en segundos, la ejecución del programa finaliza y el control se devuelve al Gestor de Modelos. El código proporciona resultados parciales por cada hora de simulación transcurrida, los cuales son volcados a ficheros ASCII temporales. Dichos ficheros son posteriormente procesados para la construcción de los escenarios de simulación del modelo de dispersión.

El programa 2DFLOW comienza leyendo los datos de topografía, a partir de los cuales, el código calcula las variaciones longitudinales y transversales del campo de alturas del terreno. Este cálculo se realiza mediante una regla de diferenciación de cuatro puntos (ref. 7) de forma que

$$\begin{aligned}\left[\frac{\partial z}{\partial x} \right]_{ij} &= \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{z_{i+1/2,j-1/2} - z_{i-1/2,j-1/2} + z_{i+1/2,j+1/2} - z_{i-1/2,j+1/2}}{\Delta x} \right]\end{aligned}$$

y de forma análoga para la variación en la dirección Y.

A continuación, después de algunos cálculos de inicialización de escasa relevancia, el modelo realiza una estimación del contraste térmico entre las capas de aire próximas al suelo a lo largo del pe-

ríodo de simulación. Dicho valor se deduce a partir de las magnitudes estimadas para el exceso o el déficit de temperatura durante el día o la noche, las cuales son datos de entrada configurables por el usuario. Entre las 20 TMG y las 6 TMG, se le asignará al contraste el valor del déficit nocturno de temperatura. Entre las 10 TMG y las 16 TMG se le asignará el exceso diurno. Entre ambos intervalos se considerará el valor resultante de una interpolación lineal entre ambos instantes.

A los puntos en el interior de la capa de drenaje se les asigna, como velocidad inicial, la existente por encima de ésta (u_a , v_a). Si esta velocidad y la del viento geostrofico se consideran nulas, se simulará un efecto de drenaje puro. Como espesor inicial de la capa se considerará el determinado por una variable de configuración cuyo valor se asigna durante la fase de inicialización (el valor asignado por defecto es de 10 m).

Una vez concluida la fase de inicialización, el programa procede a resolver el sistema de ecuaciones de movimiento. Para ello, los términos adyectivos son evaluados mediante un esquema "forward, upstream" (ref. 8) de integración por diferencias finitas de 2º orden, de la forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \begin{cases} -u_{ij}(t) \frac{u_{i+1,j} - u_{ij}}{\Delta x}; & \text{con } u_{ij} \leq 0 \\ -u_{ij}(t) \frac{u_{ij} - u_{i-1,j}}{\Delta x}; & \text{con } u_{ij} > 0 \end{cases}$$

Si el valor del módulo de la velocidad supera el límite de 20 m/s, el programa considerará que existen problemas derivados de la estabilidad de las soluciones de las ecuaciones de movimiento e interrumpirá su ejecución, notificando al Gestor de Modelos tal contingencia.

En cada paso de integración, se incrementa el espesor de la capa de drenaje en cada punto de la rejilla de vientos según el producto del tiempo de integración por la velocidad relativa de la capa respecto de niveles superiores. Al respecto, el programa considera el nivel de 5 m, como la altura mínima de la capa, con lo cual se simula el efecto de enfriamiento radiativo continuo del suelo sobre la capa de drenaje. En la configuración actual, el valor máximo de la capa se encuentra limitado a 150 m, el cual parece estar de acuerdo con las observaciones realizadas en el emplazamiento de la IAR "El Cabril". No obstante dicho valor es configurable por el usuario.

6.4.3 Resultados del modelo

La versión del modelo integrada en PANDORA proporciona para cada hora de simulación la siguiente información:

- ☐ Campo de vientos en una red 31x31.

El campo de vientos se proporciona en coordenadas U-V y en coordenadas polares desde el Norte. El sistema reduce dicha malla a una red 16x16, de forma coherente con la configuración del resto de los módulos de cálculo de la aplicación.

- ☐ Viento estimado en las estaciones de referencia y estaciones virtuales.

El programa aproxima la posición de las estaciones por el nodo más cercano de la red de vientos, generando una serie de ficheros de intercambio ASCII para el Gestor de Modelos.

- ☐ Espesor de la capa de drenaje.

Se proporciona únicamente el valor correspondiente al nodo más cercano a la T1. Si bien es posible obtener un valor para cada uno de los nodos de la red de vientos.

6.4.4 Consideraciones finales

1. En su configuración actual, el programa 2DFLOW, obtiene las componentes de la velocidad del viento de drenaje en los nodos de una malla cartesiana. Las dimensiones de esta red pueden ser variables, admitiendo un número máximo de 40 celdas según las direcciones X e Y, lo que equivale a un total de 41 puntos por dirección. Estos valores pueden ser cambiados sin más que asignar un nuevo valor a ciertos parámetros del programa.
2. Los valores de los coeficientes de arrastre, cobertura del terreno, etc., son orientativos. Dado que no existe información acerca de los mismos para el emplazamiento, los valores asignados han sido obtenidos a partir de bibliografía técnica sobre el tema, o a la asignación de valores razonables, basados en la experiencia en el uso de modelos. Dichos valores pueden ser, no obstante, modificados sin dificultad sin más que modificar los ficheros de configuración del modelo, o mediante los diálogos específicos del Gestor de Modelos de PANDORA.

3. La condición de estabilidad para las soluciones de las ecuaciones de movimiento es

$$\Delta t < \frac{1}{\frac{|u|}{\Delta x} + \frac{|v|}{\Delta y}}$$

Dado que el modelo usa igual espaciado de red para las direcciones X e Y ($\Delta x = \Delta y$), esta condición se reduce a:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{|u| + |v|}$$

Al respecto, el programa interrumpe su ejecución solo cuando el módulo de la velocidad excede los 20 m/s.

4. No es aconsejable el empleo del modelo en terrenos con pendientes superiores a los 10-15 grados (ref. 3), si bien los posibles errores

derivados de tal uso, posiblemente no sean superiores a los debidos a las aproximaciones realizadas y a la propia integración de las ecuaciones.

5. El tiempo de ejecución del programa depende sobre todo de las dimensiones de la red y, en nuestro caso, del número de horas de simulación que sea seleccionado. El tipo de ordenador que sea utilizado para realizar las ejecuciones puede afectar dramáticamente los tiempos finales de ejecución. Se recomienda el uso de ordenadores de gama media-alta.
6. Por lo general, el modelo simula una evolución rápida del régimen durante la primera hora, en la que quedan configuradas las características esenciales del mismo. A partir de este momento, las diferencias son pequeñas de una hora a otra, obteniéndose representaciones muy similares.

7

TRABAJANDO CON EL GESTOR DE MODELOS

7.1 Introducción

Tal y como ha sido comentado en secciones anteriores de este documento, el *Gestor de Modelos* es un interfaz gráfico de usuario cuyo fin último es poner a disposición del mismo la información necesaria para que éste pueda establecer una valoración del estado de la calidad del aire en el emplazamiento.

Para ello, el *Gestor de Modelos* permite configurar determinados algoritmos y modelos de simulación de la dispersión del contaminante, durante las diferentes fases de su evolución desde que es emitido por el foco emisor.

El usuario puede, por tanto, definir o configurar las características de:

- ☐ Intervalos de simulación.
- ☐ Modos de análisis.
- ☐ Características de los focos emisores e intervalos de emisión.
- ☐ Configuración de modelos y algoritmos.
- ☐ Lista de puntos de control.

Una vez que tales módulos de cálculo han sido configurados o seleccionados, el usuario puede lanzar el proceso de simulación que conduce a la ejecución de un modelo de dispersión de contaminantes sobre un conjunto de datos que representa la evolución de la meteorología y la emisión en el emplazamiento durante un periodo de tiempo determinado.

Cuando la ejecución del modelo finaliza, el usuario tiene a su disposición, entre otras, la información acerca de las concentraciones esperadas en el área de estudio como consecuencia de las emisiones habidas en el foco emisor. Igualmente, el usuario tiene información de los puntos en los que pueden producirse superaciones de valores umbrales prefijados, así como los instantes en que éstos se producen. Dicha información puede ser usada para planificar la operación del foco emisor, adecuándola a las condiciones ambientales más favorables.

7.2 Fases de una sesión de análisis con el Gestor de Modelos

En esencia, una *sesión de análisis* con el *Gestor de Modelos* comprende los siguientes pasos:

1. Definición del modo de análisis.
2. Definición del intervalo de simulación o trabajo.
3. Configuración de parámetros del modelo de dispersión.
4. Configuración de parámetros de emisión.
5. Selección de algoritmos de estimación de altura de capa de mezcla.
6. Configuración del modelo de evolución de vientos de ladera y valle.
7. Ejecución de modelos.
8. Análisis y supervisión de resultados por parte del usuario.

Tras una sesión de análisis, para todas las horas del intervalo de simulación que sea seleccionado, el *Gestor de Modelos* pone a disposición del usuario los siguientes productos:

- ☐ Viento en las torres de referencia y en las estaciones virtuales.
- ☐ Campo de vientos en la zona sobre una malla 16x16.
- ☐ Campo de concentraciones sobre una malla 31x31.
- ☐ Distribuciones espaciales de contaminantes.
- ☐ Posibilidad de avisos y alertas.

Toda la información se muestra al usuario de forma gráfica y numérica. La descripción de los diferentes productos se encuentra en la *Guía del usuario* de PANDORA (ref. 1).

Los aspectos más interesantes relacionados con la diferentes fases de una sesión de análisis serán tratados a continuación en las secciones siguientes de este documento. Las cuestiones de detalle acerca de la configuración de los modelos o algoritmos se encuentran comentadas en las secciones correspondientes a la descripción de los mismos.

La descripción del interfaz de usuario del *Gestor de Modelos*, así como de su funcionamiento se encuentra en la *Guía del usuario* de PANDORA.

7.3 Intervalos de simulación

El *intervalo de simulación* es el periodo de tiempo para el cual el usuario establece la modelización que debe ser efectuada por el *Gestor de Modelos* y, en última instancia, por el modelo de dispersión de la aplicación.

Para la definición del intervalo de simulación, el sistema considera que la aplicación dispone de información meteorológica acerca de 48 horas (que en principio se supone son las últimas 48 disponibles hasta el momento en que se pretende realizar la modelización). Tomando como punto de referencia, el último registro de dicho periodo de 48 horas, el sistema permite establecer la simulación sobre los siguientes casos:

- ❑ Simulación sobre las últimas n horas ($n = 1, \dots, 12$).

Ejemplo: Se desea conocer el estado de calidad del aire en el momento actual, tras 6 horas de operación del foco emisor.

- ❑ Simulación sobre las próximas p horas ($p = 1, \dots, 8$).

Ejemplo: ¿Cuáles pueden ser los puntos más afectados al cabo de 6 horas si el foco comienza a operar dentro de una hora?

- ❑ Simulación desde las últimas n horas hasta las próximas p horas (máximo 20 horas de simulación).

Ejemplo: El foco lleva funcionando 5 horas y se desea conocer el estado de calidad del aire dentro de 4 horas.

El *Gestor de Modelos* incluye los elementos de diálogo necesarios para establecer los periodos de simulación de acuerdo con los casos anteriormente comentados.

Es necesario indicar que *PANDORA* dispone, desde el momento de arranque de la aplicación, de la información del diagnóstico del campo de vientos para el periodo de estudio de 48 horas. Dicha información es directamente utilizada por el *Gestor de Modelos* para construir los escenarios de simulación del modelo de dispersión, en el caso de que el intervalo de simulación incluya horas anteriores al último registro de las citadas 48 horas.

7.4 Modos de análisis del Gestor de Modelos

El "*Modo de Análisis*" del *Gestor de Modelos* es la opción que permite al usuario establecer el método de estimación que el sistema debe seguir para la generación de los escenarios de simulación sobre los que se debe ejecutar el modelo de dispersión.

La existencia de varios modos de análisis se corresponde con la necesidad apuntada al principio de este documento, de integrar los diferentes puntos de vista de los estudios realizados en las fases anteriores del proyecto, intentando cubrir además las necesidades de una aplicación que debe dar respuesta en todo momento, sobre una base horaria de registro de la información.

Los modos de análisis afectan fundamentalmente a la forma en que la aplicación realiza la asignación de datos a las estaciones virtuales y a la estimación de los campos de viento para intervalos de simulación de pronóstico. Debido a las dificultades para su implementación final en planta, han sido finalmente descartadas varias posibilidades previstas en los manuales de diseño del sistema, los cuales requerían una excesiva supervisión o intervención activa del posible usuario.

Los *Modos de Análisis* incluidos en la versión actual de *PANDORA* son los siguientes:

Modo simplificado

Se basa en la deducción de un campo de vientos únicamente a partir de los datos reales suministrados por las torres instaladas en las cercanías de la instalación. El campo de vientos siempre es ajustado al terreno (ver la sección "*Ajuste topográfico del campo de vientos*").

Para la generación de los escenarios de simulación del modelo de dispersión, el sistema sigue los siguientes pasos:

1. Descomposición del intervalo de simulación en periodos de diagnóstico (simulación sobre horas pasadas) y periodos de pronóstico.
2. Asignación de los valores horarios de los datos de escenario para las horas de diagnóstico (ver "*Asignación de datos de escenario*").
3. Generación de datos de pronóstico para los datos de escenario y para las estaciones de referencia.
4. Cálculo de la altura de la capa de mezcla para todo el periodo (horas de diagnóstico y pronóstico).
5. Copia de los campos de viento ya disponibles para las horas de diagnóstico (dichos campos de vientos corresponden a las últimas horas del total de 48 disponibles mediante el *Gestor de Datos*).

6. Asignación de datos a las estaciones virtuales para las horas de pronóstico, a partir de los datos generados previamente para las torres de referencia.
7. Generación de los campos de viento de pronóstico mediante las funciones adecuadas de TOPWIND.
8. Generación de los datos de entrada para los modelos, de acuerdo con las selecciones y opciones existentes en ese momento en el Gestor de Modelos.

El proceso de generación de los *datos de pronóstico* para las torres de referencia se realiza siguiendo un procedimiento similar al utilizado para la reconstrucción de datos primarios y eliminación de 'lagunas'. En esencia, el procedimiento se ejecuta en las siguientes etapas para cada variable:

- Se calcula la desviación media durante las últimas horas (hasta un máximo de seis) de la variable en estudio respecto de su patrón horario mensual.
- Si la desviación es pequeña (menor que 1.5 veces la desviación estándar del patrón), a la siguiente hora se le asigna el valor medio del patrón más la desviación observada.
- Si la desviación es grande, se determina la diferencia del valor de la variable respecto del valor medio de los máximos horarios de la variable. Si dicha diferencia es menor que la existente entre el valor de la variable y el valor medio del patrón, a la siguiente hora se le asigna el valor medio de los máximos menos la diferencia observada. A la hora siguiente se le asigna un valor constante, e igual al de la hora anterior. El procedimiento se realiza de forma equivalente con los valores medios de los mínimos horarios cuando las desviaciones de la variable respecto del patrón son negativas.

Como se puede apreciar, el procedimiento se basa, en última instancia, en asumir la hipótesis de que el comportamiento de las variables tiende a parecerse al cabo del tiempo al del valor medio estadístico establecido para cada variable. Además, se supone que las desviaciones horarias están acotadas en magnitud por las medias de los máximos horarios, obtenidas sobre la base de datos históricos. Dichas hipótesis son razonables en el emplazamiento de la IAR "El Cabril", en el que se ha observado, de acuerdo con los resultados de las fases anteriores del proyecto, un buen comportamiento estadístico de los datos.

Los datos de *estabilidad atmosférica* son deducidos a partir de los datos pronosticados para el gradiente térmico.

La estimación de la *altura de la capa de mezcla* se realiza una vez que han sido obtenidos todos los datos de escenario para todo el periodo de simulación. Dado que los algoritmos que se utilizan son muy sensibles a las fluctuaciones grandes de ciertas variables (la velocidad del viento, por ejemplo), una vez que los valores han sido calculados, es posible aplicar un suavizado que evite caídas o ascensos excesivamente bruscos de la altura estimada. El suavizado se realiza mediante un filtro de *media móvil*, de acuerdo con la expresión:

$$h_t = \frac{1}{q} \sum_{i=-q}^{+q} h_{t+i}$$

donde:

h_t : Altura de la capa de mezcla en el instante t

q : Orden del suavizado (dicho valor es seleccionable por el usuario)

No se realiza ningún tipo de estimación predictiva de la precipitación, asumiéndose un valor de precipitación nula para las horas de pronóstico.

Modo causal

Su nombre hace referencia a la utilización de formulaciones que establezcan la relación entre causa y efecto para los diferentes regímenes tipificados en el emplazamiento. Esta opción, por tanto, plantea la posibilidad del uso de *modelos específicos* para el diagnóstico y la predicción del campo de vientos de regímenes claramente identificados en el emplazamiento.

El método consiste en la categorización de las situaciones atmosféricas en situaciones estables, inestables o neutras y dentro de ellas la identificación de los posibles regímenes que pueden ser descritos en términos de un modelo numérico. De tal forma puede ser posible el establecimiento de una base de modelos aplicables a las situaciones más frecuentes o importantes en el emplazamiento. El sistema, tras analizar las características del intervalo de simulación, así como las condiciones ambientales en determinados instantes de interés, decide el lanzamiento de la ejecución de los *modelos específicos* disponibles de acuerdo con ciertos criterios.

Si no es posible la ejecución de los modelos, el sistema opta por abandonar este modo de análisis y realizar una estimación basada en el *Modo simplificado*. El *Modo simplificado* se configura, por tanto, como opción de base o "por defecto" para la generación de los datos de simulación para el modelo de dispersión.

La versión actual de PANDORA contempla únicamente un tipo de *modelización específica*: la de los regímenes de circulación asociados a los vientos de ladera y valle. Esta modelización se realiza mediante el modelo de pronóstico 2DFLOW.

La generación de los campos de viento para las horas de diagnóstico se realiza mediante el uso del módulo TOPWIND. El sistema podría, no obstante, acomodar otros modelos de diagnóstico en el futuro.

El procedimiento que se sigue en este caso, para la generación de datos es similar al *Modo simplificado*, excepto por el hecho de que los datos de pronóstico de viento, tanto de estaciones virtuales como de estaciones de referencia, son obtenidos a partir de los nodos del campo de vientos generado por el modelo que están más próximos a las mismas.

La descripción y criterios de utilización del modelo de pronóstico se encuentra descrita en el apartado "*Modos de análisis y pronóstico de campos de viento*".

7.5 Descripción de focos emisores. Intervalos de emisión

Un escenario de simulación para el uso de modelos puede ser contemplado como un escenario meteorológico sobre el que se realizan un conjunto de emisiones por parte de un número determinado de focos emisores, las cuales configuran lo que se puede denominar *escenario de emisión*.

La descripción de los focos emisores que realiza PANDORA está directamente relacionada con la modelización que efectúa el módulo de dispersión de contaminantes.

Un foco emisor se describe en términos de los siguientes parámetros:

- ☐ Coordenadas X e Y, en km. hasta el centro de la rejilla de estudio.
- ☐ Altura de la chimenea o punto de emisión.

- ☐ Diámetro interior de la chimenea a la altura de emisión.

Características físicas de la emisión.

- ☐ Tasa horaria de emisión de gases, en unidades de masa/hora.
- ☐ Temperatura de salida de gases, en °C.
- ☐ Velocidad de salida de gases, en m/s.
- ☐ Flujo volumétrico de gases, en m³/s.

Para realizar el cálculo de la masa total emitida en cada foco emisor, PANDORA, necesita el valor del flujo volumétrico de salida de los gases. En el caso de que este valor no sea conocido, PANDORA solicita, en su defecto, la velocidad de salida de gases. En este caso el flujo es calculado como el producto de la velocidad de salida de los gases por el área interior de la salida de gases en chimenea.

PANDORA permite la modelización de hasta cuatro focos de emisión, los cuales pueden estar ubicados en cualquier punto del área de estudio definida por la escala de trabajo que en el momento de la simulación esté seleccionada.

Para cada foco emisor es posible seleccionar entre dos tipos de emisión: continua o discontinua. Si se selecciona "*Emisión continua*", el sistema supone que el foco emisor emite de forma continua desde la primera hasta la última hora de simulación. Si, por el contrario, se selecciona "*Emisión discontinua*", el usuario debe especificar un periodo de emisión, durante el cual se supone que la fuente está activa. Dicho periodo de emisión se define en términos de la hora de inicio de la emisión y de la duración de la misma. En ambos casos, la tasa de emisión se supone constante e igual a un valor que debe ser suministrado por el usuario para todo el periodo de emisión.

La posibilidad de definir focos discretos que pueden operar según diferentes intervalos de emisión, permite simular las variaciones de carga de una única fuente emisora de contaminantes. Para ello, basta con dividir el periodo de carga variable de la fuente en hasta un total de cuatro intervalos en los que la tasa de emisión puede suponerse constante. La simulación de la fuente puede entonces hacerse mediante un número de focos emisores igual al de los intervalos definidos, cuyas características geométricas sean iguales a las de la fuente en estudio y cuya emisión se hiciera de acuerdo con la distribución de cargas por intervalos efectuada anteriormente.

7.6 Puntos de control y ventana de emisión

Además de los campos de concentraciones en los nodos de la red de concentraciones, *PANDORA* permite que el usuario chequee los valores de concentración en determinados puntos testigo o *puntos de control*.

Un punto de control se describe de forma igual a la utilizada para definir los puntos de muestreo o estaciones virtuales. Dicha información es la siguiente.

- ☐ Posición geográfica (coordenadas UTM).
- ☐ Altura sobre el nivel del mar, en m.
- ☐ Estado (activo o no activo).
- ☐ Clave de identificación (ocho caracteres).
- ☐ Descriptor (comentario a incluir por el usuario).

PANDORA permite definir dos *umbrales* frente a los cuales pueden ser contrastados en tiempo de simulación las concentraciones que se van produciendo en cada punto de control. En consecuencia, el sistema permite conocer en qué instante se produce una superación de cada uno de los dos umbrales. Dichos umbrales, los cuales son definibles por el usuario, pueden ser puestos en correspondencia con los conceptos de *Límites de aviso* y *Alerta*. En este caso los puntos testigo deben ser si-

tuados en áreas de especial interés o puntos sensibles, tales como poblaciones, áreas de interés ecológico, etc.

Tras una sesión de análisis, sólo en el caso de que se hallan producido superaciones de los umbrales en algún punto de control, el *Gestor de Modelos* pone a disposición del usuario un resumen de todos los avisos generados, y del instante y lugar en que se producen.

Dado que el periodo de simulación puede incluir intervalos de pronóstico, los avisos sobre los puntos de control pueden ser utilizados para la optimización del funcionamiento de la planta, sin más que analizar las áreas de mayor impacto que sean estimadas por el sistema. El periodo óptimo para el funcionamiento de la planta, o *ventana de emisión*, estará relacionado con aquellos intervalos en los que el impacto zonal de las emisiones quede por debajo de los umbrales pre-establecidos en los puntos testigo de mayor interés.

En la versión actual de *PANDORA*, se ha hecho coincidir la relación de puntos de control correspondiente a la Escala 1, con la de estaciones de medida usadas para la generación del campo de vientos en la citada escala de trabajo. Dicha relación se muestra en la Tabla 5.1. Para la Escala 2 la lista de puntos de control se muestra en la Tabla 7.1.

8

ESTIMACION DE LA ALTURA DE LA CAPA DE MEZCLA

8.1 Introducción

Se conoce con el nombre de Capa Límite Atmosférica (CLA) a la parte de la atmósfera cuyas características físicas se encuentran directamente determinadas por la acción de la superficie terrestre. Dado que la formación y el mantenimiento de dicha capa son debidos a la actividad de la mezcla turbulenta en la atmósfera, dicha capa suele ser denominada también como CAPA DE MEZCLA.

Puesto que la turbulencia atmosférica es debida, en última instancia a la actividad solar, la evolución de la capa de mezcla estará sujeta a una periodicidad diurna. El conocimiento de dicha evolución es fundamental a la hora de comprender los procesos de dispersión de contaminantes en los niveles inferiores de la atmósfera, ya que la cima de la capa de mezcla marca el límite de la dimensión vertical del volumen de aire en que los contaminantes pueden diluirse de forma efectiva. De tal forma, cuanto mayor sea el espesor de la misma, mayor será el volumen de aire en el que se diluirán los contaminantes y, en consecuencia, menor serán sus concentraciones relativas.

Desgraciadamente no existe una "formulación universal" que permita describir adecuadamente la estructura y evolución de la capa de mezcla en cualquier emplazamiento. Más aún, incluso la conveniencia de uso del propio concepto de capa de mezcla, en los términos anteriormente descritos, es puesta en entredicho por numerosos autores, los cuales indican la necesidad de introducir ciertos matices en su definición (tal y como será comentado en los próximos apartados de este capítulo).

Es posible encontrar numerosos ejemplos de algoritmos y parametrizaciones de la CLA en la bibliografía técnica existente sobre el tema. En la práctica, la aplicabilidad real de tales formulismos es bastante limitada debido a que la estructura y evolución de la capa de mezcla dependen fuertemente de las características del terreno sobre el que se desarrolla. Por lo general, los algoritmos y parametrizaciones obtenidos para un emplazamiento no suelen ser extrapolables a otros diferentes y sus resultados deben ser contemplados únicamente como estimaciones o valores orientativos, salvo que sea realizado un proceso de validación, ajuste o corrección especialmente diseñado para el emplazamiento en estudio.

De acuerdo con las necesidades que deben ser cubiertas por la herramienta final resultante de esta fase del proyecto, establecer una descriptiva

de la capa de mezcla supone, en realidad, asumir implícitamente la definición y parametrización de dos modelos diferentes: uno para la estructura de la capa de mezcla y otro para su evolución. Ambos modelos han sido integrados en un único esquema o MODELO FINAL que ha sido incluido como parte de PANDORA.

Para que el modelo final pueda ser realmente operativo deberá verificar las siguientes características:

- ❑ *El modelo debe poder permitir la obtención de una estimación realista de la altura de la capa de mezcla, incorporando cuando sea posible, la dependencia temporal de las características turbulentas de la atmósfera.*
- ❑ *El núcleo central del modelo debe ser aplicable para todas las situaciones meteorológicas. Dado que la aplicación final debe mantener un funcionamiento rutinario, dicha condición garantiza la existencia de una estimación válida en cualquier momento. Esta opción no excluye la posibilidad de desarrollar algoritmos complementarios para situaciones específicas de interés.*
- ❑ *El modelo debe utilizar como datos de entrada únicamente la información que pueda estar disponible de forma rutinaria en planta. Esta condición supone descartar de mano todos aquellos algoritmos que requieran el conocimiento de información muy específica, no deducible de las medidas realizadas in situ, tales como perfiles verticales de ciertas magnitudes o determinados balances.*
- ❑ *La formulación del modelo final debe ser lo más simple posible, de manera que sus requerimientos de cálculo sean mínimos.*

El procedimiento que se ha seguido para el desarrollo de PANDORA ha consistido en la definición de un *modelo conceptual* simple en el que queden reflejadas las características esenciales de la evolución de la altura de la capa de mezcla en un emplazamiento genérico.

8.2 Capa de mezcla: concepto y descripción física elemental

8.2.1 Definición y estructura

Como ha sido indicado en el apartado anterior, la capa límite atmosférica, también conocida con

el nombre de Capa Límite Planetaria o simplemente capa de fricción, puede ser definida como la "región en la que la atmósfera sufre los efectos de la superficie a través de intercambios verticales de momento, calor y humedad" (sic. ref. 9).

El terreno ejerce su influencia sobre las capas bajas de la atmósfera mediante la acción de dos mecanismos diferentes. En primer lugar, los elementos de rugosidad del terreno (vegetación, edificios, etc) perturban la dinámica del flujo de aire, facilitando el desarrollo de un movimiento turbulento altamente caótico, apreciable incluso en zonas llanas con pocos obstáculos. En segundo lugar, la superficie de la Tierra actúa como fuente o sumidero de calor para el aire situado inmediatamente por encima de ella. Así, por ejemplo, durante el día la radiación solar tiende a calentar la superficie terrestre, la cual a su vez cede calor a las capas de aire próximas al suelo, generando una actividad convectiva que facilita el desarrollo de la CLA. El efecto inverso se produce, por ejemplo, en condiciones nocturnas sobre todo con cielos despejados. En tales circunstancias el enfriamiento radiativo del suelo hace que éste actúe como un auténtico sumidero de calor, el cual es transportado hacia abajo desde niveles superiores de la atmósfera.

A efectos prácticos, el movimiento del aire dentro de la CLA puede ser considerado totalmente turbulento, de manera que en ella la mezcla es mucho más rápida y efectiva que en los niveles superiores a la misma. Debido a este hecho, los gradientes de cualquier magnitud tienden a ser fácilmente destruidos dentro de la CLA (incluidos los gradientes de concentración de cualquier elemento contaminante, ya sea activo o pasivo). Desde este punto de vista, el espesor de esta capa representa la máxima extensión vertical hasta la cual los contaminantes pueden ser diluidos y, por ello, suele recibir el nombre de "capa de mezcla", aunque como veremos posteriormente tal denominación no es del todo acertada.

Aunque existen diversas formas de desarrollar una teoría acerca de la estructura y evolución de la CLA, la formulación más frecuente se obtiene, suponiendo válida la aproximación de Reynolds para la velocidad turbulenta, y considerando el balance entre las fuerzas de inercia turbulentas y la fuerza de Coriolis, las ecuaciones de conservación de la energía y la masa y la ecuación de estado de los gases, junto con determinadas condiciones de contorno para adaptar las soluciones al flujo existente en los niveles superior e inferior (junto al sue-

lo y la atmósfera libre). A partir de lo anterior, tradicionalmente, la CLA suele ser dividida en tres niveles fundamentales:

a. Subcapa laminar:

Es el nivel inmediatamente próximo al suelo en el que los efectos de viscosidad molecular predominan sobre los originados por la turbulencia. En ella el movimiento es laminar.

b. Capa superficial:

Varía entre 10 y 200 m aproximadamente. Los flujos de calor, momento y humedad pueden ser considerados independientes de la altura y de la fuerza de Coriolis.

c. Capa de transición:

También denominada capa de Ekman. Varía desde los 100-200 m hasta el tope máximo de la CLA. Es "el nivel más bajo en la atmósfera en el que la superficie del terreno deja de influir, a través de intercambios turbulentos, en las variables dependientes que definen el movimiento de la atmósfera" (sic., ref. 8).

Es posible encontrar una descripción matemática detallada de los anteriores conceptos en cualquiera de las referencias que figuran al final de este documento.

Es posible expresar la tasa de variación de la energía cinética, en términos de un valor medio sobre un conjunto de parcelas de aire, de la forma:

$$\frac{d\bar{e}}{dt} = -\overline{u'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{v'w'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} - g \frac{\overline{w'T'}}{\bar{T}} - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'e'}) - e \quad (1)$$

Los dos primeros términos del segundo miembro de la expresión anterior representan la producción de energía turbulenta debido a la extracción de energía del flujo medio a través del tensor de Reynolds. Por lo general, este mecanismo de producción de energía es muy importante, ya que dado que la velocidad media del flujo se hace nula en el suelo (o cerca de él), genera una capa de cizalladura junto a la superficie del terreno.

El tercer término representa la producción de "flotabilidad" o disipación de energía turbulenta. De tal forma, cuando la superficie del suelo es calentada durante el día por efecto de la radiación solar, se produce una actividad turbulenta convectiva, como resultado de la diferencia de temperatura entre la superficie terrestre y el aire situado en

las niveles inmediatamente superiores a la misma. Inversamente, en condiciones nocturnas, el enfriamiento radiativo del suelo, origina la aparición de una "flotabilidad" negativa que bloquea la producción de turbulencia.

Finalmente, el cuarto término representa la transferencia vertical de energía cinética. En condiciones diurnas inestables, este término da cuenta del transporte de energía desde los niveles inferiores a los superiores, mientras que en situaciones nocturnas de estabilidad, el transporte de energía se realiza en sentido inverso, esto es, desde los niveles superiores a los inferiores, en los que dicha energía es convertida en calor por fricción molecular. ϵ representa la tasa de disipación por fricción.

Por lo general, la variación de energía cinética turbulenta total en la CLA se produce de forma relativamente lenta, de manera que es posible admitir que, en todo momento existe un quasi-equilibrio entre la producción y creación de turbulencia. Cuando la producción de energía turbulenta es grande, tal y como ocurre en días despejados con fuerte insolación, el movimiento dentro de la CLA es altamente caótico y el espesor de la capa se hace grande. Cuando la producción es pequeña, la profundidad de la capa es menor y el movimiento es menos turbulento.

El espesor de la CLA, por lo anterior, se encuentra fuertemente determinado por las características de la turbulencia que se desarrolle en su seno y, por lo general, suele ser deducido a partir de los perfiles verticales de ciertas variables (velocidad y dirección del viento, temperatura, etc.) que, de alguna manera, "miden" los efectos de dicha turbulencia.

8.2.2 Evolución de la capa de mezcla

Consideraciones previas

Como ha sido indicado en los anteriores apartados, dado que la actividad turbulenta está directamente relacionada con la actividad solar, la modelización de la evolución de la capa de mezcla supone comprender las características esenciales de dos regímenes fundamentales diferentes: un régimen diurno, que conduce a la formación y desarrollo de una capa límite convectiva y un régimen nocturno en el que el desarrollo de la actividad turbulenta tiende a ser bloqueado por la aparición de gradientes verticales de temperatura estables.

Los modelos de evolución diurna requieren el conocimiento o la estimación de los flujos calor en superficie. Para que estos modelos puedan ser realmente operativos, dichos flujos deben ser positivos y dirigidos hacia los niveles superiores y su evolución debe seguir una pauta temporal conocida. La inclusión de términos de corrección por la existencia de efectos de advección a gran escala no suele estar considerada en la mayoría de ellos (ref. 10). Las referencias 11 a 13 incluyen algunos de tales algoritmos.

La descripción del régimen nocturno requiere un gran conocimiento de las características físicas del emplazamiento (suelos, vegetación, etc.). Por lo general, los modelos que simulan este tipo de situaciones suelen ser únicamente aplicables cuando las mismas son originadas por el enfriamiento radiativo del suelo. Aunque ese tipo de regímenes ha sido objeto de gran atención en las dos últimas décadas (refs. 15 y 16, por ejemplo), los resultados de las diferentes investigaciones no suelen ser fácil ni directamente extrapolables de un emplazamiento a otro.

Finalmente, la comprensión y el conocimiento de los procesos de transición entre los dos regímenes descritos anteriormente dista aún de ser suficiente como para configurar un modelo teórico que describa aceptablemente el desarrollo de los mismos. Algunos trabajos interesantes sobre el tema se encuentran en las referencias 17 a 19.

Evolución de la capa de mezcla

La Figura 8.1 muestra un ejemplo de la evolución del espesor de la capa de mezcla a lo largo de un par de ciclos completos (ref. 20). Coincidiendo con la salida del sol, la insolación induce la aparición de un flujo vertical de "flotabilidad", de manera que, por encima de la capa superficial, la atmósfera comienza a calentarse a medida que dicho flujo transporta calor y energía turbulenta hacia los niveles superiores. Este hecho provoca el crecimiento continuado de dicha capa mientras siga existiendo aporte de calor desde los niveles inferiores.

El máximo espesor de la capa de mezcla convectiva se alcanza, por lo general, cuando el flujo vertical de calor sensible desaparece. Ello ocurre al producirse el ocaso, con lo cual desaparece el aporte primario de energía (radiación solar) causante de la producción de "flotabilidad". Dicha altura puede llegar con facilidad a los 1000 m, o in-

cluso más, dependiendo de las condiciones meteorológicas reinantes.

Una vez desaparecida la fuente de energía que permite el desarrollo y mantenimiento de la capa convectiva diurna, comienza en los niveles inferiores la definición del régimen nocturno, originado por el rápido enfriamiento radiativo que sufre el suelo.

Simultáneamente tienen lugar, por tanto, dos procesos diferentes: por un lado se comienza a "destruir" la capa convectiva diurna y, por otro, se va formando la capa nocturna. El espesor de esta última llega a alcanzar usualmente un valor máximo de varios cientos de metros (siempre dependiendo de las características del terreno), lo cual contrasta fuertemente con la magnitud del máximo obtenido por la capa convectiva diurna.

En las horas posteriores a la puesta del sol, se produce un "ajuste" de la capa de mezcla diurna a la capa nocturna, al tiempo que el espesor de esta última se incrementa. Durante este régimen el flujo de "flotabilidad" es negativo y dirigido hacia la superficie del suelo. En este caso la producción de cizalla debida a efectos puramente mecánicos es el único mecanismo inductor de la turbulencia dentro de la masa de aire. Tales movimientos tienden, sin embargo, a ser bloqueados debido al flujo negativo de "flotabilidad".

Mientras dura el régimen nocturno, el momento es extraído del flujo medio, para ser transportado por los remolinos turbulentos hacia la superficie del suelo, donde es finalmente disipado. El resultado es una transferencia neta de calor hacia los niveles inferiores, en los que es transformado para ser emitido hacia el espacio de forma más efectiva en forma de energía radiante. Todo ello provoca una estratificación estable de la capa nocturna que favorece la aparición de fenómenos locales dentro de ella, muy dependientes de las características del terreno. Simultáneamente, los niveles situados inmediatamente por encima de esta capa se adaptan a las condiciones de circulación existentes en los niveles superiores, una vez realizado el acoplamiento entre la capa nocturna y diurna.

Es necesario indicar que la capa nocturna, aunque presente una estratificación estable respecto de la temperatura, es una capa turbulenta debido a la producción de cizalla por efecto mecánico. Esta situación es de especial interés en terrenos con topografía compleja, como el que nos ocupa, ya que contribuye al desarrollo de vientos de ladera y valle, etc.

La capa nocturna alcanza su valor máximo en los momentos de mayor enfriamiento radiativo, justo en los momentos previos a la salida del sol. Una vez llegado el amanecer, tras un proceso de transición que será comentado en apartados posteriores, la actividad solar destruye el régimen nocturno, para dar paso a un nuevo ciclo diurno, con lo cual el proceso se repite.

Identificación de la altura de la capa de mezcla

La capa de mezcla convectiva suele estar limitada superiormente por una inversión térmica. Dicha inversión térmica se produce debido al ascenso de las parcelas de aire caliente proveniente de capas inferiores. Dichas parcelas de aire ejercen un efecto de penetración convectiva dentro del aire de los niveles superiores, potencialmente más caliente, hasta que detienen su movimiento por pérdida de "flotabilidad". Este efecto produce un enfriamiento neto en la cima de la capa de mezcla que permite la formación y desarrollo de la citada inversión térmica. La pérdida de calor que supone el mantenimiento de esta inversión es compensada en la capa de mezcla, que rápidamente disipa el calor mediante la mezcla hacia niveles inferiores.

La altura de la capa de mezcla puede ser estimada como una función del tiempo siempre y cuando sea posible conocer la evolución del flujo positivo de calor sensible y que, además, éste pueda ser expresado en términos de una función temporal definida. En este caso es posible obtener directamente fórmulas de pronóstico. En caso contrario únicamente será posible obtener fórmulas de diagnóstico basadas en parametrizaciones simples. Ambas posibilidades serán comentadas en el Apartado 8.2.3.

Si la advección de temperatura en niveles superiores es despreciable, una alternativa al procedimiento anterior, podría ser estimar la evolución temporal de la capa de mezcla a partir de los datos de un sondeo realizado a primera hora de la mañana. Ello se realizaría trazando la adiabática seca hacia arriba, desde la temperatura en superficie a una hora determinada, de manera que el punto de intersección entre dicha adiabática y la línea de estado que representa el sondeo indicaría la altura probable a que se situaría la cima de la capa de mezcla a esa hora.

Este procedimiento no es aplicable al caso que nos ocupa ya que la herramienta final no podrá contar con datos provenientes de sondeos de forma rutinaria.

Mientras que para el caso de la capa de mezcla de origen convectivo no existen dudas en cuanto a su definición y el anterior criterio es aceptado de forma generalizada, no ocurre igual para la definición de la misma durante el desarrollo del régimen nocturno. De acuerdo con el esquema de la Figura 8.1, después de que el régimen diurno haya alcanzado su máximo desarrollo y a continuación de la puesta del sol, comienza el desarrollo del régimen nocturno. Este régimen tiene características muy diferentes a las del régimen diurno, de manera que durante el mismo se facilita la aparición en los niveles inferiores, próximos al suelo, de circulaciones desacopladas de las existentes en altura.

Los contaminantes emitidos a lo largo del día se encontrarán por tanto confinados en una CAPA MEZCLADA localizada entre el estrato inferior y el límite superior de la capa diurna, que podría ser denominada como CAPA "MEZCLANTE". A diferencia de lo que ocurre durante las horas diurnas, la actividad turbulenta en la capa mezclada es baja y tiende, en principio, a disminuir a medida que se produce la adaptación de esta masa de aire a las condiciones generales de circulación en la zona y al régimen nocturno junto al suelo.

La existencia de esta capa mezclada es de especial interés en aquellas situaciones en las que exista poca ventilación en la zona de estudio, como puede ser el caso de situaciones anticiclónicas intensas. En estas situaciones la masa de aire contenida en la capa mezclada puede mantener su posición relativa sobre el emplazamiento durante la noche, permaneciendo hasta la llegada del régimen diurno. Si la situación persiste durante varios días, la suma del contaminante envejecido y los nuevos aportes de material que vayan siendo liberados de forma continua pueden dar lugar a situaciones episódicas de alta contaminación.

En situaciones diurnas una emisión realizada junto al suelo tenderá a ser diluida dentro de la capa límite debido al efecto de la mezcla turbulenta. La eficacia de la mezcla será proporcional a la intensidad de la actividad convectiva.

En situaciones nocturnas, sin embargo, una emisión realizada en niveles próximos al suelo se verá atrapada en las capas inferiores, a menos que sus características térmicas le permitan penetrar la inversión térmica que limita dichos estratos. En este caso la emisión accedería al régimen general de circulación existente por encima de dicha inversión; con lo cual su impacto en el entorno próximo de la instalación no sería probablemente muy importante.

Según lo anterior, el término de capa de mezcla, por tanto, no es totalmente acertado como concepto único, aplicable a todas las situaciones posibles. Desde el punto de vista de la modelización, puede ser interesante considerar en determinadas ocasiones las características de cada emisión y de cada emplazamiento. De esta forma se podría evaluar, en función de dicha información, en qué nivel se espera que sean transportados los contaminantes y decidir entonces qué capa puede imponer restricciones sobre la dispersión de los mismos.

Regímenes de transición

El paso del régimen diurno al nocturno, y viceversa, no se produce de forma abrupta sino a través de un proceso de transición cuya duración es variable en función de las condiciones meteorológicas locales existentes en el emplazamiento.

La transición del régimen diurno al nocturno, se realiza por lo general de forma muy diferente a la transición noche-día. En realidad, el conocimiento del mecanismo de tales procesos no es actualmente suficiente como para establecer modelos de aplicación general, siendo conocidos únicamente aspectos parciales acerca de los mismos.

La modelización de este tipo de procesos requiere el uso de modelos que incluyan algoritmos más elaborados que los incluidos en el modelo MESOI, cuyo código no realiza una simulación de detalle de las características específicas de cada emplazamiento. Por ello, el tratamiento de la dinámica de las transiciones de régimen no ha sido considerado como un aspecto crítico en el desarrollo de la aplicación, a excepción de algunos aspectos interesantes de las mismas, que ha servido para matizar el modelo de evolución que finalmente ha sido seleccionado.

a. Transición día-noche

Como fue indicado anteriormente, al anochecer, al cesar el aporte de energía por insolación, la actividad turbulenta en la capa convectiva diurna comienza a decrecer y se adapta a las condiciones del flujo libre en la atmósfera; al mismo tiempo empieza a definirse la capa nocturna en los niveles próximos al suelo. Suponiendo que el espesor máximo que llega a alcanzar la capa nocturna oscila en torno a los 200 ó 300 m y que los valores típicos del máximo espesor de la capa convectiva pueden oscilar en torno a los 1000 m, se debe de producir una disipación de la turbulencia existente entre los niveles de 200 y 1000 m antes de que la

capa inferior pueda ser considerada como completamente desarrollada (ref. 10).

Dado que tanto la energía cinética como su tasa de disipación en un flujo turbulento dependen del tamaño de los remolinos existentes en su seno (ref. 21), el tiempo necesario para que se produzca la relajación del régimen diurno al nocturno deberá ser proporcional al tiempo necesario para que se produzca la disipación de los remolinos del régimen convectivo hasta el tamaño de los remolinos del régimen sinóptico.

De tal forma, cuando cesa el aporte de radiación solar, el balance de energía indicado en la ecuación (1) se reduce a:

$$\frac{d\bar{e}}{dt} = -\epsilon \quad (2)$$

Suponiendo válidas las hipótesis de las teorías de semejanza (refs. 20, 21), dicha relación puede ser expresada como (ref. 10):

$$\frac{d}{dt}(k_1 u'^2) = -k^2 \frac{u'^2}{h} \quad (3)$$

donde:

$u' = u - u(t)$ es, haciendo uso de la descomposición de Reynolds, la perturbación turbulenta de la componente u de la velocidad, siendo u el valor medio de la misma.

$k_1 = 1.5$

$k_2 = 4.0$

h = es el espesor de la capa de mezcla.

La solución de dicha ecuación es:

$$\frac{1}{u'} - \frac{1}{u'_0} = \frac{4}{3} \frac{t}{h} \quad (4)$$

donde:

u'_0 es la velocidad inicial.

A partir de la expresión anterior es posible deducir que cuando $u < u'_0$, el tiempo de disipación es prácticamente independiente de la velocidad característica del flujo inicial. Para valores de $h = 1000$ m y suponiendo que los remolinos convectivos se reducen hasta el rango típico de los movimientos verticales a escala sinóptica (0.05 m/s), la expresión anterior indica que son necesarias alrededor de 4 horas para que la actividad turbulenta de origen convectivo sea disipada completamente. Este valor parece estar de acuerdo con los tiempos necesarios para la formación de la

capa estable junto al suelo, cuya formación se debe realizar de forma simultánea.

Al respecto han sido realizadas algunas simulaciones de prueba para analizar la formación y desarrollo de vientos de ladera y drenajes mediante el uso del modelo 2DFLOW (ref. 22) obteniéndose que son necesarias entre 3 y 6 horas para alcanzar un régimen bien definido. Dichos valores están de acuerdo con la anterior estimación y con las observaciones realizadas en el emplazamiento en estudio.

b. Transición noche-día

Mientras que los procesos de formación, tanto del régimen nocturno, como el del régimen diurno, han sido objeto de gran atención durante las últimas décadas, los mecanismos que conducen a la destrucción del régimen nocturno no han comenzado a recibir un tratamiento de detalle hasta hace relativamente muy poco tiempo, siendo en la última década en la que han sido objetos de mayor atención.

El proceso de destrucción del régimen nocturno (caracterizado por la existencia de situaciones y regímenes estratificados), para dar paso al régimen diurno (en el que predominan las situaciones inestables de origen convectivo), suele realizarse de forma muy diferente en función de las características del terreno en el que se desarrolle. De tal forma, el mecanismo de ruptura del régimen nocturno al diurno difiere notablemente según se realice sobre terreno llano o sobre terreno con topografía compleja.

Por lo general, sobre terreno llano, el mecanismo que más comúnmente es aceptado para explicar la desaparición de la inversión que limita la capa nocturna, es el crecimiento, desde el suelo y hacia arriba, de una capa límite turbulenta inducida por el caldeo solar, merced a un mecanismo de penetración convectiva similar al explicado en apartados anteriores de este capítulo.

En terreno montañoso, como el que nos ocupa, la situación es conceptualmente más complicada y pueden ser varios los mecanismos de ruptura.

Posiblemente, el mecanismo más conocido y mejor descrito en la bibliografía es, además del anterior, el que relaciona la ruptura del régimen nocturno con el proceso de eliminación de masa de los valles sobre los que se desarrollan las inversiones térmicas que limitan los flujos de derrame. Dicha eliminación de masa estaría motivada por la aparición de flujos anabáticos, originados por el

primer caldeo solar de la mañana sobre las laderas de las cuencas que conforman los valles.

El efecto neto de dicho mecanismo es provocar la subsidencia del aire de niveles superiores dentro de la masa de aire confinada en los valles, de manera que se compense la eliminación citada. El proceso finaliza cuando la masa de aire que está contenida dentro de la capa estable, es eliminada mediante la subsidencia, con lo cual la citada inversión térmica desaparece.

La duración de este proceso es variable, pudiendo oscilar entre minutos a varias horas, según sean las características de los valles y las condiciones meteorológicas locales (refs. 15, 17). Es frecuente, no obstante que la ruptura se produzca en intervalos típicos de entre 15 y 30 minutos.

De acuerdo con lo anterior, y considerando los tiempos de promedio que usará la aplicación (1 hora) y el escaso nivel de detalle que el modelo MESOI proporciona para simular este tipo de situaciones, las transiciones día-noche, serán en principio evaluadas como *transiciones abruptas y de duración inferior a una hora*. El instante de ruptura será seleccionado de acuerdo con las características de los algoritmos de evolución que sean implementados. La descripción de los algoritmos inicialmente seleccionados se encuentra descrita en el Apartado 8.2.3.

Establecimiento de un modelo conceptual de evolución

En el caso que nos ocupa, el modelo de dispersión MESOI utiliza en su versión original una aproximación muy sencilla de la capa de mezcla: el espesor de la capa es constante en todo el área de estudio y su límite superior es tratado por el modelo (ref. 23) como una superficie reflectante para las emisiones realizadas por debajo de dicho nivel, y como una superficie impermeable para las emisiones que sean transportadas por encima del mismo. Dado que la altura del punto de emisión no es muy elevada (13 m) y de acuerdo con las características de la aplicación y los argumentos explicados anteriormente, parece razonable utilizar un modelo de evolución como el que se propone en la Figura 8.2.

La definición de la duración de los periodos de transición será realizada de acuerdo con las características específicas de cada escenario meteorológico y con las indicaciones apuntadas en los apartados anteriores.

8.2.3 Descripción de los algoritmos seleccionados

Con el objeto de compendiar el material de trabajo que serviría de base para el desarrollo de algún modelo de estimación de la altura de la capa de mezcla aplicable al emplazamiento del la IAR "El Cabril", fue elaborado un documento en el que fueron seleccionados diversos algoritmos o métodos apropiados para el emplazamiento y el modelo conceptual propuesto.

En general, se encontró que la aplicabilidad real de los mismos podía ser muy limitada. Ello es debido, fundamentalmente, a que buena parte de las aproximaciones encontradas en la bibliografía suelen estar basadas en la validez de ciertas teorías cuyo rango de aplicación no es muy amplio, en parametrizaciones dependientes del emplazamiento en que fueron desarrolladas o en la ocurrencia de condiciones meteorológicas muy concretas. Igualmente, como ha sido comentado en secciones anteriores de este documento, la mayoría de los procedimientos encontrados solucionan únicamente determinadas "bandas horarias" correspondientes a situaciones atmosféricas muy concretas, por lo que el modelo final deberá considerar seguramente la inclusión o "mezcla" de varios algoritmos dentro de su código.

En principio, se ha intentado que los algoritmos incluidos en PANDORA sean representativos de algunos de los planteamientos más generales y comúnmente aceptados hoy en día para la determinación de la altura de la capa de mezcla sobre un emplazamiento. Sin embargo, la ausencia de un registro histórico adecuado, así como las restricciones operativas y los recursos reales disponibles han limitado finalmente el conjunto de algoritmos que han sido puestos a disposición del usuario.

Los algoritmos finalmente incluidos en PANDORA son:

- ☐ Ecuaciones de diagnóstico.
- ☐ Aproximación senoidal.
- ☐ Procedimiento de Grinyg-Batchvarova.
- ☐ Modelo de crecimiento termodinámico de Stull.

Durante la fase pruebas de la aplicación, sin embargo, se ha hecho patente la conveniencia de que en una primera aproximación sólo el primer algoritmo fuera puesto en servicio, hasta que esté disponible en el emplazamiento la instrumentación necesaria para modelizar adecuadamente con los otros algoritmos, y hasta que los mismos sean validados sobre el terreno.

8.2.4 Ecuaciones de diagnóstico

La aproximación que se realiza para estimar la altura de la capa de mezcla, depende del tipo de estabilidad dominante en las capas bajas de la atmósfera, así como de la existencia o no de inversiones térmicas en altura.

Es posible considerar tres casos fundamentales:

Condiciones neutras

Estas condiciones se caracterizan, sobre todo, por la existencia de perfiles verticales de temperatura adiabáticos. Son típicas durante los períodos de transición día-noche, o en situaciones con viento fuerte (con velocidades a 10 m superiores a 6 m/s), con lluvia o con cubierta de nubes considerable.

Una aproximación para h en estas condiciones puede venir dada por

$$h = C_n \frac{u_*}{f} \quad (5)$$

donde f es el parámetro de Coriolis y C_n es una constante, cuyo valor oscila entre

$$0.15 \leq C_n \leq 0.25$$

La anterior expresión indica que, en estas condiciones, h depende solo de la velocidad del viento. En el caso de que exista una inversión térmica a una altura inferior a la calculada por la citada expresión, h puede ser considerada igual a la altura de la base de la inversión.

El uso de esta aproximación debe ser limitado a condiciones suficientemente neutras. Una regla orientativa puede ser:

$$\left| \frac{u_*}{fL} \right| < 4$$

o, aproximadamente

$$\left| \frac{h}{L} \right| < 1$$

Condiciones estables

Este tipo de condiciones suelen ocurrir durante la noche y en situaciones de calma o viento débil. En tales situaciones es posible el desarrollo de una in-

versión térmica junto al suelo, por efecto radiativo, cuya base suele elevarse a medida que avanza la noche. En este caso, h , viene determinada por la altura de la base de dicha inversión, l , ($l = l(t)$).

$$h = l(t)$$

La parametrización de este tipo de situaciones no es fácil, sobre todo porque es frecuente la estratificación en múltiples subcapas estables, con fuertes efectos de cizalladura.

A pesar de ello es posible utilizar algunas aproximaciones elementales (ref. 24, 25).

A. Fórmula de Wetzel

$$h = \frac{R_{ib} T u_1^2}{g \Delta \theta_1} \quad (6)$$

donde:

R_{ib} : número de Richardson.

T : temperatura media en la capa.

$\Delta \theta_1$: Diferencia de temperatura potencial en la misma.

u_1 : velocidad en la cima de la capa.

R_{ib} , en este caso puede ser tomado como $R_{ib} \sim 0.33$.

B. Fórmula de Zilitinkevich

$$h = C_1 \sqrt{\frac{u_* L}{f}} \quad (7)$$

$C_1 \approx 0.4$ es un coeficiente empírico.

La primera expresión presenta la dificultad de que u_1 y $\Delta \theta_1$ son valores que, por lo general, no suelen ser medidos de forma rutinaria. La segunda ecuación presenta problemas con velocidades altas y valores de temperatura patrón, θ_* , bajos. En tales casos, es aconsejable limitar el valor de h proporcionado por dicha expresión por el valor obtenido para el caso de estabilidad neutra. Como regla práctica su uso puede ser limitado a aquellas situaciones en las que:

$$\left| \frac{u_*}{fL} \right| < 4$$

Condiciones inestables

Las condiciones inestables son típicas durante el día y se caracterizan por la existencia de flujos de

calor positivos junto al suelo y por gradientes negativos de temperatura en la CLA. No existen ecuaciones de diagnóstico adecuadas para describir la variación de h . Por lo general, h tiende a ser alrededor de un 10% mayor que la base de la inversión térmica más baja que limita la CLA.

Una aproximación de la evolución puede ser obtenida a partir de un balance de energía junto al suelo, de manera que el resultado final es (ref. 26):

$$h(t) = \left[\frac{2 \int_{t_0}^t H_0 dt}{c_p \rho (\gamma_d - \gamma)} \right]^{1/2} \quad (8)$$

γ_d es el coeficiente de enfriamiento adiabático del aire ($\gamma_d = 0.986^\circ\text{C}/100\text{ m}$) y γ es la cantidad:

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z}$$

medida al amanecer, que se considera ocurre en el instante t_0 . Esta ecuación puede ser resuelta analítica o numéricamente especificando la forma de $H_0(t)$.

En PANDORA se realiza una estimación más sencilla del valor de h para estas situaciones mediante un procedimiento indirecto. Dicho procedimiento consiste en deducir el valor de h partiendo de una estimación del espesor de la capa superficial, z , como $h = z/0.04$ (ref. 26).

El valor de z puede ser obtenido a través de la parametrización sugerida por Aloyan et al. (ref. 27):

$$z = \begin{cases} 0.28L & 10 \leq H/L \\ 0.03H & |H/L| < 10 \\ 0.01H^{3/2}|L|^{-1/2} & -400 < H/L \leq -10 \end{cases} \quad (9)$$

Las dos primeras parametrizaciones de la anterior expresión son alternativas a las propuestas en los apartados anteriores para situaciones neutra y estables. La expresión de H es:

$$H = \frac{ku_*}{f}$$

La longitud de Monin-Obukhov, L , puede ser obtenida como función de la estabilidad mediante el

uso de las curvas empíricas deducidas por Liu et al. (en ref. 26), cuyo ajuste proporciona una relación del tipo:

$$\frac{1}{L} = az_0^b$$

donde a y b , son coeficientes que dependen de la estabilidad atmosférica y cuyo valor se encuentra indicado en la Tabla 8.1.

8.2.5 Otros algoritmos.

Consideraciones finales

Las referencias 30 a 38 muestran, a modo de ejemplo, algunos algoritmos de interés que pueden ser considerados de forma complementaria para definir la parametrización definitiva que será utilizada.

Es necesario indicar que la mayoría de ellos son válidos para situaciones diurnas y preferentemente inestables, para las cuales no existen ecuaciones de diagnóstico adecuadas.

En este caso es necesario el uso bien de relaciones integrales, bien de ecuaciones incrementales (en las que aparece explícitamente la tasa de crecimiento de la capa de mezcla como variable dependiente).

Varias discusiones acerca de la aplicabilidad práctica de tales algoritmos puede ser encontrada en las referencias 9, 26, 37 y 38.

La revisión de algoritmos realizada en el marco de este proyecto ha permitido poner de manifiesto que las principales dificultades a la hora de establecer una formulación de la evolución de la altura de la capa de mezcla en un emplazamiento, radican posiblemente en tres puntos fundamentales:

1. No existe una formulación universalmente reconocida que permita describir adecuadamente tanto la estructura como la evolución de la capa de mezcla. Como ha sido comentado, existen incluso discrepancias sobre el propio concepto de capa de mezcla.
2. La mayoría de los algoritmos existentes incluyen en su definición fórmulas o parametrizaciones que dependen implícitamente de las características de los emplazamientos en que fueron obtenidos. Buena parte de ellos, además, han sido desarrollados sobre terreno llano y con un rango de validez limitado a determinadas situaciones meteorológicas, por lo

que su aplicación en terreno complejo puede ser bastante limitada.

3. La operatividad real de los algoritmos está fuertemente condicionada por la posibilidad de disponer de los datos necesarios para establecer la modelización de forma rutinaria. Así, por ejemplo, los algoritmos que necesitan la inicialización con datos provenientes de un sondeo, no podrán ser implementados (al menos en su forma original), ya que dichas

medidas no estarán disponibles durante la operación de la aplicación.

Finalmente, es necesario indicar que los algoritmos que han sido implementados, no son algoritmos validados, debido a la falta de un registro histórico adecuado en el emplazamiento. Un proceso de validación, corrección y contraste de algoritmos debería de ser parte del desarrollo natural de la aplicación de cara al futuro.

9

EL MODELO DE DISPERSION MESOI V.2.0

9.1 Introducción

De acuerdo con las especificaciones de diseño de la aplicación *PANDORA*, el modelo de dispersión que debe realizar la estimación de la evolución de los contaminantes emitidos por el foco emisor es *MESOI V.2.0*.

MESOI V.2.0 corresponde a la tercera generación de modelos basados en el desarrollo del código *MESODIF*, preparado por J.V. Ramsdel y G.F. Athey durante la década de los 70 para el National Reactor Testing Station (posteriormente Idaho National Engineering Laboratory). En principio, el modelo fue desarrollado con fines reguladores por parte del U.S. Department of Energy (U.S. DOE) y la U.S. Nuclear Regulatory Commission (U.S. NUREG), para su uso en situaciones de emergencia nuclear. La versión 2.0 fue desarrollada durante los años 1982 y 1983 a partir de las anteriores versiones 1.0 y 1.1, estando disponible realmente desde 1984.

El código fue desarrollado en FORTRAN 77, para ordenadores DEC VAX-11/780, con opciones gráficas limitadas a terminales *Visual 500* y *plotters* con versión PNL del software gráfico de *Calcomp*. Esta versión constaba de un módulo principal y 41 subrutinas agrupadas en cuatro clases:

- ☐ Inicialización.
- ☐ Entradas y salidas del programa.
- ☐ Transporte, difusión y deposición.
- ☐ Procedimientos de utilidad general.

Una ejecución típica requería entre 200 y 300 Kbytes de memoria para su ejecución. El número de horas de simulación estaba limitado a 48 y el número máximo de *puffs* utilizables para describir un penacho era de 125 por foco emisor, con emisiones compuestas por un número máximo de 4 *puffs*/hora. El proceso de inicialización del modelo podía requerir hasta 36 interrogaciones consecutivas al usuario.

Para su inclusión en *PANDORA*, el modelo ha sido objeto de una profunda remodelación. Se han eliminado numerosas limitaciones de su código y se ha racionalizado su estructura. Finalmente, el modelo ha sido incluido dentro de un ambiente gráfico fácil de usar.

9.2 Modelos lagrangianos

Las mayoría de los modelos de dispersión pueden ser agrupados en dos grandes categorías: modelos eulerianos y modelos lagrangianos.

En un modelo de dispersión euleriano las diferentes variables que intervienen en la simulación son referidas a un sistema de referencia fijo (por ejemplo, respecto del suelo), mientras que en el caso lagrangiano el sistema de referencia "sigue" el movimiento medio de la atmósfera. Dado que el modelo *MESOI V.2.0* pertenece a esta segunda categoría de modelos, el interés de este apartado se centrará en describir sucintamente las bases en que se asientan este tipo de formulismos. La descripción de detalle de los diferentes algoritmos que integran el modelo será presentada en los siguientes apartados.

La ecuación fundamental que describe la dispersión de un contaminante según el formulismo lagrangiano es:

$$\langle c(\vec{r}, t) \rangle = \int_{-\infty}^t \int p(\vec{r}, t | \vec{r}', t') S(\vec{r}', t) d\vec{r}' dt'$$

En esta expresión, el término de la izquierda representa el valor medio de la concentración en el punto determinado por el vector de posición \vec{r} en el instante t , $S(\vec{r}', t')$ representa el término fuente (en masa volumen⁻¹ tiempo⁻¹) y $p(\vec{r}, t | \vec{r}', t')$ la función de densidad de probabilidad de que una parcela de aire se mueva desde \vec{r}' en t' , hasta \vec{r} en t , donde para cualquier \vec{r}' y $t > t'$, es:

$$\int p(\vec{r}, t | \vec{r}', t') d\vec{r} \leq 1$$

Dicha expresión puede ser menor que uno cuando se considere que existe pérdida de masa por deposición o por transformación química. En caso contrario, la condición de conservación de la masa exige que el valor de la integral sea siempre igual a uno.

Para el caso de contaminantes no reactivos, la función de densidad de probabilidad, p , es una función sólo de la meteorología (y del contaminante, cuando sean considerados procesos de deposición). En este caso las anteriores ecuaciones constituyen una descripción probabilística bastante rigurosa de los procesos de dispersión de un contaminante. En dicha descripción, por tanto, tendrán mucha importancia las hipótesis que sean

realizadas acerca de la forma o estructura de la función de densidad de probabilidad, p.

9.3 El modelo MESOI V.2.0

El modelo MESOI V.2.0 es un típico ejemplo de modelo de dispersión lagrangiano en el que se supone que el material liberado por el foco emisor se encuentra contenido en una o más bocanadas o "puffs", en el interior de los cuales la concentración se supone distribuida normalmente (*puff gaussiano*). De tal forma, en ausencia de reflexiones en la superficie, la concentración, C, en un punto del espacio, de coordenadas (x,y,z), viene dada por la expresión:

$$c(x,y,z) = \frac{Q}{\sqrt{(2\pi)^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{(x-x_0)}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{(y-y_0)}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{(z-z_0)}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (1)$$

donde:

Q masa de material contenida en el puff.

(x₀,y₀,z₀) coordenadas del centro del puff.

σ_x,σ_y,σ_z coeficientes de difusión.

El término de la derecha puede ser considerado como producto de tres términos:

Q término fuente

1/(2π)^{3/2}σ_xσ_yσ_z disminución de la concentración relativa respecto del centro del puff.

exp [...] disminución de la concentración con la distancia al centro del puff.

En líneas generales, el modelo simula la dispersión de los contaminantes siguiendo varios pasos de cálculo. En primer lugar, la masa total emitida es fraccionada en uno o más puffs. A continuación los puffs son emitidos y transportados por el viento, de acuerdo con las condiciones meteorológicas existentes, las cuales se suponen constantes durante un cierto intervalo de tiempo (o periodo de advección). Finalmente, el modelo estima las concentraciones junto al suelo en los nodos de una rejilla de características prefijadas.

Los datos generales de mayor interés acerca de las diversas etapas de cálculo son los siguientes:

a. Sistema de Referencia

El sistema de referencia utilizado por el modelo considera que la coordenada X está orientada según la dirección del viento, Y en la dirección transversal a X y Z en la dirección vertical a ambos.

b. Geometría del puff

Para cada puff, se supone que la sección horizontal es circular (σ_x=σ_y), y que, en ausencia de efectos de dispersión inducidos por el terreno, el perfil horizontal de concentraciones es gaussiano. Igualmente se supone que las dimensiones radiales dependen tan solo de σ_y y que las concentraciones son función exclusivamente de la distancia al centro del puff.

c. Emisión

Cada vez que un puff es emitido, el modelo asigna unas coordenadas iniciales al centro del mismo, las cuales corresponden a las coordenadas horizontales del punto de emisión, x₀, y₀, y a la altura efectiva de emisión, z₀ (también h_e). La coordenada z₀ es la suma de la altura del punto de emisión más el incremento de altura debido a la flotabilidad o al momento del penacho. Este incremento adicional de altura es calculado por el modelo en función de las características de la emisión y de acuerdo con las condiciones ambientales existentes.

d. Transporte

El modelo desplaza los puffs subiéndolos o bajándolos en cada periodo de advección, adaptándolos a la topografía del terreno. Para ello, se considera la altura del terreno al centro del puff y se define una altura efectiva de emisión local para los puntos no centrales del puff, la cual depende de la posición de éstos. De tal forma, h_e se corrige por la diferencia de altura entre el punto en cuestión y el centro del puff, siendo:

$$h_e' = h_e - (T_r - T_c)$$

donde:

T_r = Elevación del terreno en el receptor.

T_c = Elevación del terreno en el centro del puff.

h_e' puede ser positiva o negativa.

Al finalizar cada periodo de advección, el modelo calcula la posición final del puff y asigna un

nuevo valor de x_0 , y_0 , igual a dicha posición final. El valor de h_e permanece constante durante todo el periodo de advección y hasta que se produzca una variación explícita de las condiciones meteorológicas existentes.

e. Dispersión

La ecuación (1) supone que la difusión puede realizarse en todas las direcciones de cero a infinito. Esta hipótesis no es realista, sobre todo en la dirección vertical, sobre la que pueden ser impuestas numerosas restricciones, de acuerdo con las condiciones meteorológicas existentes.

Para dar cuenta de este hecho, el modelo incorpora una descripción elemental de la capa de mezcla, considerando que la difusión está limitada en la vertical por el suelo y por dicha capa, suponiendo, además, que ambas superficies son reflectantes.

A efectos de cálculo, el modelo supone que la capa de mezcla es continua y de altura constante sobre el suelo en todo el dominio de simulación. El modelo permite acomodar variaciones temporales horarias de dicho valor, las cuales deben ser suministradas como *dato de entrada*.

Los efectos de reflexión, anteriormente citados, han sido incorporados al modelo mediante la utilización del método de las imágenes, mediante la suma de un conjunto de términos exponenciales, que dan cuenta de los mismos a la expresión (1). Aunque este procedimiento será comentado más adelante, por su interés, cabe destacar ahora los siguientes casos particulares:

- ☐ Si h_e' y $\sigma_z \ll \text{LDEPTH}$: el término de reflexión incrementa (1) en un factor de 2.
- ☐ Si $\sigma_z \sim \text{LDEPTH}$: el perfil vertical de concentración tiende a hacerse uniforme.

donde LDEPTH es la variable que representa la altura de la capa de mezcla en el modelo.

En los apartados siguientes se resumen algunas de las características más importantes de los algoritmos que MESOI V.2.0 utiliza para simular los diferentes procesos de la cadena del transporte de contaminantes en la atmósfera.

9.4 Coeficientes de difusión

Los coeficientes de difusión, σ_y , σ_z son tratados por el modelo como funciones de la estabilidad at-

mosférica y de la distancia al punto de emisión. Se usan en total cuatro parametrizaciones.

- ☐ Aproximación de Start y Wendell a las curvas de difusión en el desierto desarrolladas por Markee.
- ☐ Curvas sigma en campo abierto de Briggs.
- ☐ Curvas sigma normales de la NRC usadas en MESODIF-II, XOQDOQ y PAVAN.
- ☐ Parametrización recomendada por la U.S. Army.

9.4.1 Aproximación de Start y Wendell

Las parametrizaciones son de la forma:

$$\sigma_y = \begin{cases} A_y x^{0.85} & x \leq 20000m \\ A_y' x^{0.85} & x > 20000m \end{cases}$$

$$\sigma_z = \begin{cases} A_z x^B & \sigma_z / H \leq 0.465 \\ \left[0.465 + 0.335 \left(\frac{x - x_c}{x_c} \right) \right] & 0.465 < \sigma_z / H \leq 0.8 \\ 0.8H & \sigma_z / H > 0.8 \end{cases}$$

donde:

A_z , B , A_y , A_y' = función de la estabilidad.

H = espesor de la capa de mezcla.

x_c = distancia para la cual $\sigma_z = 0.465 H$.

Las dimensiones de los coeficientes son:

$$[A_y] = m^{0.15}$$

$$[A_y'] = m^{0.5}$$

$$[A_z] = m^{(1-B)}$$

A_z y B son funciones de la estabilidad atmosférica, H es el espesor de la capa de mezcla y x_c es la distancia para la cual $z = 0.465H$.

9.4.2 Curvas de difusión en campo abierto

Las parametrizaciones son de la forma:

$$\sigma = Ax (1 + Bx)^C$$

donde:

A , B , C = funciones de la estabilidad para σ_z .

A = función de la estabilidad para σ_y .

B, C = constantes para σ_y .

Con:

B = 0.0001 m^{-1} .

C = -0.5.

9.4.3 Curvas Sigma-normales

En este caso:

$$\sigma = Ax^B + C$$

Para σ_y , A, B y C son funciones de la estabilidad y de la distancia a la fuente, teniendo valores diferentes según tres rangos:

☐ $x < 100 \text{ m}$.

☐ $100\text{m} \leq x \leq 1000 \text{ m}$.

☐ $x > 1000 \text{ m}$.

Para σ_z , A es función de la estabilidad, en tanto que B y C son constantes con valores de 0.9031 y 0.0 respectivamente. Las dimensiones de A son de $\text{m}^{(1-B)}$ y las de C de metros.

9.4.4 Parametrización recomendada por la U.S. Army

Los coeficientes de difusión son calculados utilizando la expresión:

$$\sigma = I \cdot F(x) \cdot x$$

donde:

I = intensidad de la turbulencia.

F(x) = eficiencia de la turbulencia en la difusión.

x = distancia a la fuente.

Para σ_y , I_y es la razón de la desviación estándar de la componente V a la velocidad media del viento. En este caso, dicha razón es aproximadamente igual a la desviación estándar de las fluctuaciones de la dirección del viento expresada en radianes.

Para σ_z , I_z es la razón de la desviación estándar de las fluctuaciones de la velocidad vertical a la velocidad media. Se puede aproximar por la desviación estándar del ángulo de elevación del viento en radianes.

La función F(x) es adimensional y puede ser parametrizada de la forma:

1. Para la difusión horizontal:

$$F(x) = \begin{cases} (x / x_r)^{-1/10} & x \leq 10000\text{m} \\ 1 & x > 10000\text{m} \end{cases}$$

2. Para la difusión vertical:

$$F(x) = (1 + bx)^c$$

Esta última parametrización equivale a la de Briggs con:

$$b = B_z$$

$$c = C_z$$

9.4.5 Cálculo de los coeficientes de difusión

Los coeficientes de difusión son funciones implícitas del tiempo. Dicha dependencia es el resultado de las relaciones existentes entre las distancias recorridas y el tiempo de advección total, así como de la variación temporal de la estabilidad atmosférica.

Cuando se produce un cambio en la estabilidad atmosférica no es conveniente estimar la magnitud de los coeficientes de difusión a partir de las distancias reales recorridas por el puff ya que, si se usan éstas, las dimensiones del puff cambiarían en el mismo instante en que cambia la estabilidad. Dado que este cambio podría ser muy grande, el resultado final de la estimación sería la aparición de una discontinuidad que no sería realista.

Para soslayar este problema, el modelo MESOI realiza un cálculo a través de distancias virtuales en tres pasos:

Paso 1º

Al principio de cada intervalo de muestreo, las distancias a las fuentes puntuales, x_v , y_v , se calculan a partir de los valores de σ_y y σ_z que existen al final del anterior intervalo de muestreo (intervalo de tiempo en el que MESOI integra en el tiempo) y las condiciones atmosféricas (estabilidad y capa de mezcla) que existen en el período de advección (intervalo de tiempo sobre el que las condiciones meteorológicas se suponen constantes). A las distancias así obtenidas se las denomina *distancias virtuales*.

Paso 2º

Se calcula una *distancia efectiva* recorrida por el puff al final del intervalo de muestreo, x_e , sumando la distancia recorrida durante el mismo a las distancias virtuales.

Paso 3º

Los valores de los coeficientes de difusión (σ_y , σ_z), se calculan para el final del intervalo de muestreo, usando la parametrización escogida y las distancias de recorrido efectivo.

9.5 Sobreelevación del penacho

El modelo MESOI V.2.0 permite el tratamiento tanto de emisiones elevadas como de emisiones a nivel del suelo.

Si la emisión se realiza desde una chimenea para la cual son conocidos los valores de temperatura y flujo de salida de gases, la altura efectiva (o final) de emisión se calcula como:

$$h_e' = h_s + h_r$$

donde:

h_e' = es la altura final de emisión

h_s = es la altura de la chimenea

h_r = el ascenso del puff debido a la flotabilidad.

Si, por el contrario, los parámetros de emisión son desconocidos el modelo no puede realizar ninguna estimación de la sobreelevación del penacho. Si se espera que la emisión se comporte como una emisión elevada (no necesariamente a través de una chimenea), h_e' debe ser estimada o calculada independientemente e introducida en el modelo como parámetro de inicialización.

El modelo MESOI calcula la sobreelevación del penacho según el método de Briggs, el cual permite la estimación únicamente de la altura final del penacho. Este procedimiento supone que la flotabilidad térmica es el factor dominante en el proceso, despreciando la posible contribución del momento del inicial de los gases. La sobreelevación no se calcula a menos que la temperatura de emisión exceda a la del medio ambiente en 10°C.

Las parametrizaciones utilizadas por el modelo son:

a. Condiciones de estabilidad atmosférica

En condiciones de estabilidad atmosférica, se supone que el ascenso del penacho viene dado por el flujo de flotabilidad, F_0 , la velocidad del viento a la altura de emisión y por el parámetro de estabilidad, S .

F_0 se define como:

$$F_0 = \frac{gV(T_s - T_a)}{T_a}$$

donde:

g = Aceleración de la gravedad.

V = Flujo de emisión.

T_s = Temperatura de emisión de los gases en K.

T_a = Temperatura ambiente en K.

S viene dado por:

$$S = \frac{g}{T_a} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \frac{g}{T_a} \left(\frac{\partial T_a}{\partial z} + 0.01 \right)$$

donde:

$\left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$ es la variación de la temperatura potencial con la altura en K/m.

Si el viento está en calma, el ascenso final de la pluma viene dado por:

$$h_r = 5.3 F_0^{1/4} S^{-3/8} - 6 R_0$$

donde:

R_0 = es el radio de la chimenea.

En caso contrario, en condiciones de viento fuerte:

$$h_r = 2.6 [F_0 / (uS)]^{1/3}$$

b. Condiciones inestables o neutras

En condiciones neutras o inestables el modelo considera que cerca del penacho, el ascenso es independiente de la flotabilidad y proporcional a $x^{2/3}$, de la forma:

$$h_r(x) = 1.6 F_0^{1/3} u^{-1} x^{2/3} \quad (2)$$

Briggs sugiere dos opciones para realizar el cálculo de la distancia de ascenso final:

- ❑ En chimeneas con una emisión térmica de 20 MW o más, la distancia debe escogerse unas 10 veces la altura de emisión.
- ❑ Para chimeneas con menor temperatura:

$$x = AF_0^{2/5} h_s^{3/5}$$

donde A es una constante cuyo valor es $6.49(s/m)^{6/5}$

Con vientos débiles, el modelo supone una velocidad mínima de 0.5 m/s para usar en las anteriores ecuaciones.

MESOI impone algunas restricciones al ascenso del penacho, de manera que no se permite el transporte del material por encima del límite de la capa de mezcla en el momento de la emisión. Si la altura efectiva de emisión, incluyendo la sobre-elevación, es mayor que dicho límite, la altura efectiva se reduce a este valor. Sólo hay dos casos en que el modelo permite exceder este valor:

1. La chimenea tiene una altura superior a la de la capa.
2. Inmediatamente después de la emisión se produce un decrecimiento del espesor de la capa en el tiempo.

9.6 Términos de reflexión

Como fue indicado en apartados anteriores, el modelo supone que tanto el suelo como el límite superior de la capa de mezcla son superficies impenetrables. Por tanto, a efectos de cálculo, el material liberado dentro de la capa de mezcla será reflejado por dichas superficies, a menos que sea explícitamente depositado en el suelo. Este proceso ha sido implementado mediante el uso del método de las imágenes.

El procedimiento se basa en considerar el efecto de las reflexiones en dichas superficies mediante la suma de una serie de términos exponenciales a la ecuación (1).

El paso inicial para considerar la reflexión es separar el término exponencial de (1) en dos partes que describen la disminución horizontal y vertical de la concentración, de la forma:

$$\exp[\dots] = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{|\vec{r}|}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{|z-z_0|}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

$$|\vec{r}| = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]^{1/2}$$

El término exponencial vertical se sustituye por:

$$\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{|z-z_0|}{\sigma_z}\right)^2\right] \approx \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{2nH - h_e' - z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\}$$

donde:

z = Altura del emisor al suelo.

H = Espesor de la capa de mezcla.

En la práctica sólo se suelen considerar los primeros términos de la suma. En MESOI el rango de variación de n es de -4 a $+4$.

El método supone la existencia de una emisión elevada, que se realiza a una altura h_e' , durante un periodo en el que la altura de la capa de mezcla es igual a H . A medida que la difusión vertical aumenta las dimensiones del penacho, el material emitido comienza a alcanzar el suelo y a ser, por tanto, reflejado por él. La contribución de dicho material a la concentración en los niveles próximos al suelo es estimada entonces igual que la que produciría una fuente virtual situada a una altura $-h_e'$, "por debajo" del suelo. El método se aplica de forma similar para las reflexiones en la capa de mezcla. A medida que la simulación de las emisiones continua, el procedimiento considera la suma de más términos a la ecuación (1).

Si el receptor está a nivel del suelo:

$$\begin{aligned} & \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{|z-z_0|}{\sigma_z}\right)^2\right] \approx \\ & \approx \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{2nH - h_e' - z}{\sigma_z}\right)^2\right] + \right. \\ & \quad \left. + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{2nH - h_e' + z}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} = \\ & = 2 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{2nH - h_e'}{\sigma_z}\right)^2\right] \end{aligned}$$

Cuando la altura efectiva de emisión supera el límite de la capa de mezcla, dicha fuente deja de ser considerada en los pasos posteriores. El límite superior se comporta entonces como una capa permeable para el material que haya sido emitido desde la fuente que está por encima, y como superficie reflectante para las fuentes que estén en el interior de la capa.

A medida que los valores de los coeficientes de difusión se hacen mayores, la distribución vertical de concentraciones se hace cada vez más uniforme. En el caso de que la altura efectiva de emisión sea inferior a la altura de la capa de mezcla y que el valor de σ_z se haga mayor o igual a $8/10H$. El modelo interrumpe el cálculo de las concentraciones mediante el anterior procedimiento y utiliza el perfil de concentraciones correspondiente a un modelo gaussiano sencillo:

$$\chi(\vec{r}, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y H_u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{|\vec{r}|}{\sigma_y} \right)^2 \right]$$

Dicho perfil se extiende desde 0 hasta el límite de la capa de distribución uniforme, H_u (cuyo valor máximo será $8/10H$).

En el caso de que el espesor de la capa de mezcla decrezca con el tiempo, es posible que los valores de σ_z excedan $8/10H$, por ello H_u se calcula como:

$$H_u = 1.25\sigma_z$$

Esta aproximación se realiza para evitar comprimir los puffs verticalmente en dichas situaciones.

El perfil vertical de concentraciones puede llegar a ser también uniforme si h_e' está por encima del límite de la capa de mezcla. En este caso, el modelo, compara los valores de σ_z con h_e' . Si $\sigma_z > 8/10 h_e'$ se utiliza el perfil uniforme y la altura de la capa uniforme es calculada como:

$$H_u = 1.25\sigma_z$$

en caso contrario se usan los términos de reflexión.

9.7 Influencia del terreno

MESOI V.2.0. considera los valores de la altura del terreno para realizar el cálculo de las concentraciones en los puntos receptores de interés.

Para ello, el modelo utiliza las diferencias de elevación del terreno entre el receptor y el punto a nivel del suelo inmediatamente debajo del centro del puff. Dichas diferencias de elevación son utilizadas para estimar una altura de emisión local, a la cual se considera que está situado el puff.

Las elevaciones del terreno deben ser suministradas para cada punto receptor mediante un fichero de datos adaptado al emplazamiento en estudio.

Las alturas medidas desde los centros de los puffs se calculan a partir de las elevaciones del terreno alrededor de cada nodo de la red, al principio y al final del período de advección, usando un esquema de interpolación ponderada. En la interpolación, el peso dado a la elevación es proporcional al recíproco de la distancia entre el punto y el centro del puff. Las elevaciones del centro del puff en los intervalos de muestreo dentro del período de advección se calculan interpolando linealmente entre las elevaciones del punto inicial de la trayectoria en dicho intervalo y las correspondientes a los puntos integrantes de la misma a lo largo del tiempo.

9.8 Empobrecimiento del puff

Los principales mecanismos causantes de la disminución de la concentración en el aire del material emitido, que pueden ser considerados en el modelo son:

- ☐ Deposición (seca y húmeda).
- ☐ Decaimiento radiactivo.
- ☐ Transformación química.

MESOI contempla explícitamente los dos primeros, en tanto que el tercero podría ser simulado adaptando convenientemente el programa. Es necesario señalar que los algoritmos que el modelo implementa para simular tales procesos corresponden a una descripción elemental de los mismos.

9.8.1 Deposición seca

Se utiliza el modelo de deposición seca por empobrecimiento del término fuente. Dicho procedimiento supone la existencia de un flujo de material hacia la superficie (masa por unidad de tiempo y área) que es proporcional a la concentración del material en el aire en los niveles próximos a la misma. La constante de proporcionalidad tiene unida-

des de velocidad y se denomina *velocidad de deposición*, V_d .

En MESOI, el flujo de material hacia la superficie viene dado por la expresión:

$$\omega(\bar{r}) = V_d \chi(r, 0) = \frac{2vdQ'}{(2\pi)^{2/3} \sigma_y^2 \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{r}}{\sigma_y} \right)^2 \right] \sum_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2nH - h'_e}{\sigma_z} \right)^2 \right]$$

donde Q' es la masa existente en el puff centrado en (x_0, y_0) .

La variación de la masa en el puff vendrá dada por:

$$\frac{dQ'}{dt} = - \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |\bar{r}| \omega(\bar{r}) d\bar{r} d\theta \quad (3)$$

La evaluación de estas integrales debe hacerse numéricamente cuando la concentración en los niveles del suelo varía de forma compleja debido a la existencia de términos de reflexión, ya que los mismos son función de la posición.

Como una alternativa a la integración numérica, la anterior expresión puede ser simplificada suponiendo que:

$$h'_e = h_e$$

Esto equivale a admitir terreno llano para este tipo de procesos, ello consigue un buen compromiso entre la precisión y la rapidez del cálculo.

Por lo anterior:

$$\frac{dQ'}{dt} = -2\pi \sigma_y^2 V_d \chi(x_0, y_0, 0)$$

donde $\chi(x_0, y_0, 0)$ es la concentración a nivel del suelo, en el punto situado inmediatamente debajo del centro del puff.

En la versión actual de PANDORA, el modelo MESOI V.2.0, usa siempre una velocidad de deposición constante de 0.01 m/s, si bien dicho valor puede ser modificado por el usuario.

9.8.2 Deposición húmeda

Mientras que la deposición seca es un fenómeno superficial, en el que intervienen sólo los niveles

próximos al suelo, la deposición húmeda es un fenómeno integral, que es función del efecto de la precipitación que cae a través del puff o del penacho.

MESOI trata la deposición húmeda como un proceso simple denominado "washout" o lavado. Dicho mecanismo considera que la precipitación elimina el material del puff de forma proporcional a la razón de la precipitación a la concentración dentro del puff.

El flujo de deposición húmeda viene dado por la integral:

$$\begin{aligned} \omega_w(r, 0) &= -\lambda_w \int_{-\infty}^{+\infty} \chi(\bar{r}, z) dz = \\ &= + \frac{\lambda_w Q'}{2\pi \sigma_y^2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{|\bar{r}|}{\sigma_y} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

donde λ_w es el coeficiente de lavado en (horas)⁻¹.

Integrando sobre la extensión horizontal del puff se obtiene el cambio total en la masa transportada por el mismo, de la forma:

$$\frac{dQ'}{dt} = - \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \omega(\bar{r}, 0) |\bar{r}| d\bar{r} d\theta = -\lambda_w Q$$

Dado que, en realidad, la integración de la anterior expresión se extiende sobre el volumen entero ocupado por el puff, el resultado de la misma será independiente de la distribución vertical de concentraciones real dentro del puff. La evaluación de la integral constituye, pues una estimación exacta de dicha concentración, en la medida que dicha formulación sea correcta.

La deposición total en superficie vendrá dada por la suma de la masa depositada por vía húmeda y por vía seca. Conviene señalar que dichos resultados deben ser contemplados como una aproximación grosera a la realidad, si bien los resultados que sean obtenidos pueden servir para dar una idea de las zonas donde es probable una mayor deposición.

9.8.3 Decaimiento

El modelo contempla tres casos:

1. Efluente estable de especie A que no decae.
2. Especie A que decae a especie B estable.

3. Especie A que decae a B, que a su vez decae a C cuya concentración no interesa.

El decaimiento puede ser considerado químico o radiactivo en función de la vida media de las especies que sean consideradas. Los rangos actualmente permitidos por el modelo para dichos valores corresponden a valores típicos de un decaimiento radiactivo.

Caso 1: A no decae

Este caso es trivial, y la especie se tratará con o sin deposición según interese.

Caso 2: A decae a B

Se admite que la tasa de decaimiento es proporcional a la concentración de la especie A, de la forma:

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A$$

donde:

N_A = suma de las especies A presentes.

λ_A = constante de decaimiento relacionada con la vida media de A.

La cantidad de A tras el decaimiento será:

$$N_A(T) = N_{A0}(1 - e^{-\lambda_A T})$$

Si B es estable:

$$N_B(T) = N_{A0}(1 - e^{-\lambda_A T})$$

donde se ha supuesto que B no está presente en $T=0$.

CASO 3: A decae a B, que a su vez decae a C

El cambio en B será:

$$\frac{dN_B}{dt} = -\lambda_A N_A - \lambda_B N_B$$

Esta ecuación tiene dos soluciones:

a) $\lambda_A = \lambda_B$

$$N_B(T) = N_{A0}(1 - e^{-\lambda_A T})$$

b) $\lambda_A \neq \lambda_B$

$$N_B(T) = N_{A0} \left(\frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_B} \right) (e^{-\lambda_A T} - e^{-\lambda_B T})$$

MESOI calcula las constantes de decaimiento para cada especie a partir de sus respectivas vidas medias, las cuales deben ser suministradas como *input* en la inicialización de la simulación.

9.9 Transporte del puff

En MESOI los puffs son transportados con el viento existente a la altura efectiva de emisión. El viento se determina a partir de un campo tridimensional de componentes horizontales. Este campo consta de 3 niveles: capa superficial, intermedia (interpolado) y nivel de viento del gradiente.

Viento en superficie

El viento en superficie debe estar definido en los nodos de una red 16×16 (o red de vientos) que abarca el ámbito de aplicación del modelo.

La versión original del modelo incorporaba un conjunto de funciones para la interpolación del campo de vientos a partir de los datos medidos en diversos puntos de muestreo. Dichas opciones han sido eliminadas de la versión incluida en PANDORA, permitiéndose a cambio la posibilidad de que los campos de vientos puedan ser suministrados mediante la aplicación de cualquier modelo bidimensional de diagnóstico o pronóstico del campo de vientos.

En la actualidad, PANDORA incorpora los módulos TOPWIND y 2DFLOW, descritos en otras secciones de este documento.

Capa superior

Representa el viento por encima de la capa de mezcla. Únicamente aplica a puffs cuya altura efectiva de emisión sea superior al límite de dicha capa.

El modelo considera que el viento en dicho nivel es el mismo en todos los nodos de la malla. Para ello el dato de viento en altura debe ser suministrado como *input* en cada periodo de promedio.

Capa intermedia

En MESOI la capa de vientos en superficie representa el viento por debajo de los 10 m. La capa superior representa el viento por encima de la capa de mezcla. La capa intermedia, por su parte, representa el estrato en el que se realiza el trans-

porte del penacho. En dicha capa el viento se obtiene mediante la interpolación vertical entre los niveles superior e inferior anteriormente descritos.

El esquema de interpolación en esta capa, desde el suelo hasta la altura correspondiente al centro del puff es de la forma:

$$u_i(h_e) = u_i(10m) + [u_i(H) - u_i(10m)] \left(\frac{h_e - 10m}{H - 10m} \right)^\alpha$$

donde:

u_i = Componente i del viento.

α = Parámetro de interpolación.

En su configuración actual, α es siempre igual a 1.0, lo cual equivale a realizar una interpolación lineal. El modelo puede permitir realizar una interpolación independiente para cada componente, previa adaptación del código. Diversos estudios muestran cómo α presenta dependencia con la estabilidad, variando en 0,5 y 1,5 siendo diferente en cada componente. En ausencia de más información debe escogerse $\alpha=1.0$.

9.10 Cálculo de las concentraciones

La salida primaria del modelo MESOI es un conjunto de nueve matrices de concentraciones en los nodos de una red 31*31, ajustada a la red de vientos y con un paso de malla igual a la mitad del utilizado en aquella. Cinco de tales matrices guardan los valores integrados en el tiempo de las concentraciones en el aire, junto al suelo, de las diferentes especies incluidas en las simulaciones. Las cuatro matrices restantes contienen los valores de la contaminación en superficie en cada uno de los nodos de la red.

A. Concentraciones integradas en el tiempo

Para un efluente sin deposición ni decaimiento, los valores de concentración integrada en el tiempo junto al suelo, (usualmente denominadas Exposiciones en el suelo), $E(x, y, 0)$, se calculan como:

$$E(x, y, 0) = \sum_i \sum_j \chi_{ij}(x, y, 0) \Delta T_i$$

donde:

χ_{ij} = Concentraciones en $(x, y, 0)$.

ΔT_i = Intervalo de muestreo: Comienza al principio de la simulación y acaba al final de la misma o cuando ya no hay más puffs activos.

j = Puffs que afectan al nodo.

Los anteriores valores de concentración integrada se expresan en unidades de masa*hora/m³. Lógicamente, estas concentraciones son mayores que las de un efluente con deposición o decaimiento.

Cuando existe deposición o decaimiento, se mantiene más de un término fuente para cada puff. El término fuente primario es la masa inicial contenida en el puff. Si existe empobrecimiento por deposición o decaimiento, se mantiene un término fuente para cada especie primaria. Dicho término se calcula realizando correcciones al término fuente primario. Así, por ejemplo, después del primer intervalo de muestreo, las correcciones que son aplicadas al término fuente primario serán:

$$Q_{A'}(t) = Q_{A'}(t-1) + \left\{ \left[\frac{dQ_{A'}(t-1)}{dt} \right]_{\text{seco}} + \left[\frac{dQ_{A'}(t-1)}{dt} \right]_{\text{húmeda}} + \left[\frac{dQ_{A'}(t-1)}{dt} \right]_{\text{decay}} \right\} \Delta T$$

donde:

A: especie A.

$Q_{A'}(t=0)$: término fuente primario (sin relajación).

Si A decae a B, se supone que B es una especie que no existía en el momento de la emisión y que el decaimiento de B a C está gobernado por las ecuaciones vistas en los apartados anteriores.

E_A y E_B se obtendrán entonces, como:

$$E_A(x, y, 0) = \sum_i \sum_j \left[\left(\frac{Q_{A'ij}}{Q} \right) \chi_{ij}(x, y, 0) \Delta T_i \right]$$

$$E_B(x, y, 0) = \sum_i \sum_j \left[\left(\frac{Q_{B'ij}}{Q} \right) \chi_{ij}(x, y, 0) \Delta T_i \right]$$

El modelo puede proporcionar dos conjuntos de exposiciones:

- a. Exposiciones acumuladas en el período de advección:

La suma en i se extiende desde 1 hasta el número de intervalos de muestreo existentes en el período de advección de un puff específico.

Estos valores de exposición pueden ser utilizados para estimar los valores de concentración a corto plazo.

- b. Exposiciones acumuladas desde el principio de la simulación:

Corresponden a la suma total de las exposiciones parciales correspondientes a cada período de advección, acumuladas durante todo el período de simulación.

5. Cálculo del decaimiento de la especie A e incremento de la especie B dentro de cada puff.

6. Empobrecimiento del puff por deposición seca.

7. Empobrecimiento del puff por deposición húmeda.

Al final de cada período de advección, los valores de las diferentes concentraciones son corregidos para dar cuenta del decaimiento y, finalmente la contribución neta del citado período de advección es sumada a los valores acumulados de las diferentes estimaciones que proporciona el modelo.

B. Concentración en superficie

La *Concentración en superficie*, $S_c(x,y)$, se calcula directamente a partir de los flujos de deposición, húmeda y seca como:

$$S_c = \sum_i \sum_j [(\omega_{dij} + \omega_{wij}) \Delta T_i]$$

De forma similar a las concentraciones integradas en el tiempo, el modelo guarda memoria de dos conjuntos diferentes de valores, correspondientes a los valores acumulados durante el período de advección y los acumulados durante el período total de simulación. Ambos conjuntos de datos permiten acomodar la contribución del decaimiento cuando este proceso es tenido en cuenta. S_c se mide en unidades de masa/m².

C. Secuencia de cálculo

La secuencia de cálculo que sigue el modelo para la estimación de las concentraciones es la siguiente:

1. Cálculo de la contribución de cada foco emisor a las concentraciones integradas, a nivel del suelo, sin empobrecimiento (deposición, ni decaimiento).
2. Idem con empobrecimiento.
3. Contribución de la deposición seca a la contaminación en superficie.
4. Idem con la deposición húmeda.

9.11 Resultados del modelo

La versión de MESOI incluida en PANDORA proporciona al usuario:

- ☐ Posición de los puffs.
- ☐ Concentraciones a lo largo del tiempo.
- ☐ Superaciones de valores límite en puntos de control.

9.11.1 Posición de los puffs

Para cada hora de simulación, MESOI proporciona información acerca de la totalidad del conjunto de puffs que están siendo usados para modelizar el penacho.

Dicha información incluye:

- ☐ Número total de puffs existentes en la rejilla.
- ☐ Número total de puffs eliminados de la rejilla en el último período.
- ☐ Posiciones de los centros de los puffs (x,y,z).
- ☐ Radio de las representaciones gráficas.
- ☐ Valores de las sigmas.
- ☐ Masa contenida en cada puff.

Cada puff se representa como circunferencias con centros en las posiciones correspondientes de la red. El radio puede indicar una distancia determinada (por ejemplo $3\sigma_y$, o una concentración fijada, que se toma igual a 10-15 masa*hr/m³ (ver "Características de la modelización de MESOI V.2.0").

9.11.2 Concentraciones integradas a lo largo del tiempo

En su versión actual, para cada hora de simulación, el modelo proporciona los siguientes valores de concentración:

- ☐ Concentración integrada debida a un penacho sin procesos de eliminación o pérdida de masa.
- ☐ Concentración integrada debida a la especie A, con deposición, decaimiento o eliminación.
- ☐ Idem para la especie B (si procede).
- ☐ Deposición debida a la especie A.

- ☐ Idem para la especie B (si procede).

9.11.3 Superaciones de valores límite

Para un conjunto predeterminado de *puntos testigo* o de *control* (ver secciones anteriores), el modelo proporciona los instantes en que se producen superaciones de ciertos valores umbrales de concentración. Igualmente, el modelo proporciona los valores finales de concentración alcanzados en tales puntos tras finalizar el proceso de simulación.

Dichos datos son posteriormente proporcionados al *Gestor de Modelos* de PANDORA, para facilitar su representación de cara al usuario.

10

CARACTERISTICAS DE LA MODELIZACION DE MESOI V.2.0

10.1 Introducción

El objetivo de este apartado es poner de manifiesto algunos de los aspectos que deben ser considerados con mayor cuidado a la hora de trabajar con el modelo MESOI V. 2.0. La experiencia acumulada en el uso de este modelo demuestra que, a pesar de su sencillez conceptual y de su flexibilidad, su aplicación práctica puede conducir a resultados muy dispares según sean las condiciones en que sea ejecutado. Por ello, la comprensión de los métodos de cálculo utilizados en el modelo, así como de las limitaciones de los mismos, es fundamental para garantizar un uso adecuado del mismo.

La discusión que sigue a continuación se centra en el análisis de los siguientes aspectos:

- ☐ Dominio y resolución espacial del modelo.
- ☐ Descripción de la dinámica atmosférica.
- ☐ Tratamiento de la capa de mezcla.
- ☐ Características de la modelización en puffs.
- ☐ Limitaciones generales del modelo.

10.2 Dominio y resolución espacial del modelo

MESOI es un modelo de dispersión inicialmente configurado para su aplicación en el dominio de la mesoscala β , cubriendo áreas de estudio de dimensiones típicas entre los 40 y 50 km. de radio. Ello no quiere decir que el modelo no pueda ser utilizado fuera de dicho ámbito, sino que a la hora de realizar ejecuciones del mismo "fuera" de los límites impuestos por defecto en el código es necesario considerar ciertas cuestiones adicionales.

Como ha sido comentado en la descripción de las bases teóricas del modelo, MESOI está configurado para trabajar con una malla cuadrada de 16×16 nodos que es utilizada para describir el campo de vientos existente sobre la misma. El espaciado de dicha malla es igual en las direcciones X e Y.

Sobre dicha malla se superpone otra de 31×31 nodos sobre la cual son referidos todos los cálculos de concentraciones. El espaciado de esta última red es igual a la mitad del espaciado utilizado por la malla de vientos. Es posible modificar el espaciado de la red de vientos, pero el paso de la malla de concentraciones será siempre igual a la mitad del utilizado en la de vientos.

En su configuración inicial, el modelo acepta valores del espaciado de la red de vientos comprendidos entre 2500 y 15000 m, lo cual proporciona resoluciones entre 1250 y 7500 m para la rejilla de concentraciones. Tal y como fue comentado en informes elaborados en fases anteriores del proyecto, la resolución máxima proporcionada por el modelo en estas condiciones no es del todo apropiada para el caso que nos ocupa, ya que impide obtener una representación adecuada del área cubierta por las campañas de medida.

La definición de las dimensiones espaciales del área de modelización y la resolución del modelo son de especial importancia en nuestro caso, ya que a ellas han sido referidas todas las tareas de parametrización de escenarios y situaciones de interés. Por ello, han sido analizados ciertos aspectos relativos a las características del modelo, del terreno y de la dinámica atmosférica que se desarrolla sobre el mismo.

10.2.1 Consideraciones numéricas

Numéricamente, el modelo MESOI está limitado por la resolución de la rejilla utilizada para estimar las concentraciones, el número de puffs emitidos en cada periodo de simulación (usualmente una hora) y el mínimo intervalo de tiempo requerido para realizar el cálculo de las concentraciones. Todos estos parámetros pueden ser modificados. Sin embargo, por lo general, un cambio en cualquiera de ellos probablemente requerirá un cambio en los demás.

Al menos teóricamente, el límite para la máxima resolución del modelo viene impuesto no por el espaciado de la malla de concentraciones, sino por el intervalo de tiempo mínimo requerido para realizar el cálculo de las concentraciones, o tiempo de muestreo. Dicho intervalo varía en el modelo como una función del cociente entre la velocidad del viento y el tamaño de cada puff y su valor mínimo está fijado a un minuto.

Cuando un puff es pequeño y la velocidad del viento es grande, el movimiento del mismo a lo largo de un minuto puede ser grande en comparación con las medidas del puff al final del citado recorrido. Por tanto, el número de muestreos que serán necesarios para estimar las concentraciones en los puntos de la red será pequeño y las concentraciones dependerán fundamentalmente de las distancias relativas de los puntos de la red a los centros de los puffs.

Al respecto, la Figura 10.1 (extraída del manual del modelo) representa la dependencia de las estimaciones frente a la razón entre la distancia recorrida por un puff gaussiano y su σ_y correspondiente. En la misma, la distancia recorrida por el puff está calculada como el producto de la velocidad del viento por el tiempo de muestreo de las concentraciones, y la incertidumbre en las estimaciones como la razón de las concentraciones calculadas en función de la distancia (para distancias crecientes) y el valor real de la integral de la expresión de cálculo de las concentraciones (ver secciones anteriores de este documento). En dicha figura se puede observar que, a medida que la distancia va siendo mayor que σ_y , la incertidumbre en las estimaciones es cada vez mayor.

Si el anterior esquema es aplicado al caso del modelo MESOI, la máxima resolución del mismo dependerá de la incertidumbre con que se desee obtener las estimaciones. De acuerdo con las estimaciones de los autores, si se quiere que la incertidumbre en las estimaciones de la citada integral no sea superior a un 20%, la máxima distancia incremental que puede recorrer un puff en un intervalo de muestreo debe ser algo menor de $3\sigma_y$. Dado que el mínimo valor del intervalo de muestreo es de un minuto, el factor que será entonces realmente determinante de la máxima resolución del modelo será σ_y . Para una velocidad de 10 m/s, y condiciones de estabilidad atmosférica neutra, según la Figura anterior, σ_y debe ser mayor de 200 m para que se obtenga la exactitud del 20%, requerida a modo de ejemplo. De acuerdo con las parametrizaciones de las sigmas, tales valores no serían alcanzados más que para distancias superiores a unos 3 km. de la fuente.

A partir de lo anterior se puede comprender que, a priori, la bondad de los resultados del modelo no es algo "intrínseco" del mismo, sino que depende de las condiciones en que éste sea ejecutado. En función de tales condiciones de ejecución existirán unos rangos espaciales en los que los resultados del modelo son "mejores" que en otros. Por lo general, las mejores estimaciones de las concentraciones deberán ser obtenidas a distancias en las que el valor de σ_y se aproxime al valor de la distancia entre nodos. Así, por ejemplo, si en el caso anterior el espaciado de la red es de 3 km. las zonas de concentraciones altas debidas al paso de un puff gaussiano cuya σ_y es aproximadamente igual a 200 m tenderán a caer en los espacios entre nodos y no en los propios nodos. Por tanto, es razonable suponer que cuando los valores de σ_y ,

comienzan a ser mayores que la mitad del espaciado de red, los nodos comenzarán a verse afectados consistentemente por el paso de los puffs. Por lo general, ello tiende a ocurrir a distancias típicas de 10 km. o más de la fuente.

Tanto el tiempo de muestreo como el espaciado de la red pueden ser modificados para mejorar la resolución del modelo. Obviamente ello se traduce en mayor esfuerzo de cálculo, pero no existe más limitación numérica que la señalada anteriormente, y en este sentido debe ser interpretada la limitación del rango de espaciados de malla definido en la configuración actual del modelo; así como los valores por defecto en él recomendados.

Existen, no obstante, otras limitaciones, físicas y operacionales, que serán consideradas a continuación.

10.2.2 Consideraciones físicas

De acuerdo con la información existente acerca de los trabajos realizados en fases anteriores del proyecto, las dimensiones de las áreas de modelización, fueron variables, centrándose fundamentalmente en torno a los valores de 8 y 30 km. en torno al punto de emisión. En este punto es necesario indicar que la selección de la resolución de las rejillas de datos determina automáticamente la cobertura espacial del modelo, que será la que se obtenga de multiplicar el espaciado de la malla de vientos por 15 (o el de la de concentraciones por 30) ya que el modelo siempre trabaja con una malla de 15x15 celdas para la definición del campo de vientos.

La posibilidad de alterar los valores de las dimensiones "maestras" (15 y 30 celdas en cada dirección para cada rejilla de valores), ha sido descartada tras analizar las características formales del código, ya que su estructura no fue diseñada para que las dimensiones de las diferentes variables y parámetros que intervienen en el cálculo fuesen alteradas.

Para el desarrollo de la versión incluida en PANDORA, ha sido, por tanto, aconsejable definir cual (o cuales) son las dimensiones óptimas que deben ser consideradas para garantizar un compromiso entre la resolución del modelo y una adecuada cobertura espacial.

A partir de algunas ideas esbozadas por diversos autores, un procedimiento elemental para obtener una primera estimación de las dimensiones recomendables para definir el área de modelización,

consiste en tabular los tiempos de paso de una hipotética parcela de aire que podría ser muestreada dentro del área de interés, en función de unas velocidades de tránsito máxima y mínima. La tabla resultante puede ser entonces fácilmente contrastada con las características del terreno, la información climática y meteorológica disponible y las necesidades requeridas por la modelización que se desea efectuar para verificar su idoneidad. La Tabla 10.1 muestra algunos valores orientativos que dan una idea global de los órdenes de magnitud que pueden ser inicialmente manejados y las opciones más comunes de espaciado de red que suelen ser encontradas en la bibliografía.

El procedimiento anterior, a pesar de su sencillez puede servir para obtener información complementaria acerca de la descripción de la pluma de contaminante. Así, por ejemplo, la Tabla 10.2 muestra el tiempo que tardaría un puff aislado en recorrer diversas distancias para varias intensidades de viento. De dicha tabla se deduce que, en poco tiempo, un puff que sea transportado por el viento a velocidades bajas abandonaría la rejilla de modelización. Dicho tiempo, puede marcar de facto un límite para los tiempos de emisión de los puffs.

El número de puffs emitidos por hora, o más específicamente, el tiempo entre emisiones de los puffs, determina la calidad de la simulación que el modelo puede proporcionar (sobre todo cuando la dirección del viento sufre cambios bruscos). La distancia inicial entre puffs es igual al producto de la velocidad del viento y el tiempo transcurrido entre cada emisión, que es el *tiempo de advección*. El transporte de cada puff se realiza a intervalos regulares iguales al tiempo de advección, suponiendo que la dirección y velocidad del viento permanecen constantes durante dichos intervalos. En su configuración por defecto, el modelo utiliza un total de 4 puff por hora para representar al penacho, lo cual significa el uso de tiempos de advección iguales a 15 minutos.

Por lo general, para rejillas no muy grandes, la descripción de la pluma que realiza el modelo con dicha configuración, emitiendo un número fijo de 4 puffs por hora, puede resultar insuficiente. Ello es debido al hecho de que la probabilidad de que un puff abandone la rejilla de modelización antes de que otro sea emitido, dejando a la red sin concentraciones, es muy alta. Por otra parte, la imagen del penacho que se obtiene con esta representación tenderá a ser pobre, al ofrecer una visión muy discontinua del mismo.

Para soslayar este problema ha sido conveniente introducir ciertas correcciones en el modelo de manera que éste puede "acomodar" el reparto de la masa de contaminante emitida cada hora en un mayor número de puffs. Ahora bien, de acuerdo con las características del código, el número de puffs emitido cada hora debe ser una cantidad coherente con la elección del tiempo de muestreo para las concentraciones (cuyos valores máximo y mínimo son respectivamente de 1 y 60 minutos).

De acuerdo con lo anterior la Tabla 10.3 muestra los posibles tiempos de muestreo que han sido introducidos en el modelo para que éste los utilice de forma selectiva en función de los valores de la relación [distancia recorrida/tamaño del puff]. En dicha tabla, la columna cuarta corresponde a la única posibilidad contemplada en la versión original del modelo.

10.2.3 Representación del terreno

La versión actual del modelo MESOI contempla dos representaciones distintas del terreno.

La primera, y más importante, consiste en una representación del área de estudio mediante el uso de una red de 31x31 puntos, que deben ser coincidentes con los de la rejilla de concentraciones. La representación consiste en proporcionar al modelo las alturas del terreno sobre un nivel de referencia para cada uno de los nodos de la citada red. Dichas alturas son utilizadas por el modelo a la hora de calcular la contribución efectiva de cada puff a la concentración medida en dicho nodo.

La segunda representación consiste en una transcripción muy simple de los principales accidentes del terreno, para introducir una corrección en el campo de vientos. Dicha representación ha sido comentada en apartados anteriores de este documento.

Dado que la malla de concentraciones viene impuesta por la selección de la rejilla de vientos, se corre el riesgo de que la representación de la topografía sea impuesta por las condiciones de ejecución sin considerar las características más importantes del terreno. En el caso que nos ocupa, ello condicionaría la parametrización de escenarios mediante el uso en paralelo de determinados modelos dinámicos en los que la representación del terreno puede ser un factor crítico.

Para evitar tal contingencia, a la hora de establecer tanto el ámbito como la resolución espacial

del modelo, es conveniente analizar las características del terreno y su relación con la meteorología de la zona. Para ello, el principal problema estriba en determinar las dimensiones de los mecanismos responsables de los procesos de dispersión y de las escalas de la respuesta física a los mismos, que son los que limitan el ámbito natural del estudio. Por tanto, fue realizado un estudio para analizar las características del terreno y su relación con la meteorología de la zona, conjuntamente con las características de los diferentes módulos de cálculo de PANDORA. El análisis realizado fue basado fundamentalmente en la realización de un análisis de escalas topográficas, cuyos resultados permitieron definir las escalas de trabajo y características de las mallas de datos de la aplicación.

10.2.4 Descripción de la dinámica atmosférica

A. Estructura horizontal

Como anteriormente ha sido indicado, el modelo MESOI utiliza una descripción del campo de vientos basada en la definición de dos niveles (suelo y límite superior de la capa de mezcla) desde los cuales se interpola a cualquier nivel intermedio.

Para ello, en su configuración de origen, el modelo parte de las medidas disponibles en puntos de muestreo discretos distribuidos dentro del área de aplicación del modelo, usando hasta un máximo de 30 puntos de medida diferentes. Como ha sido comentado en secciones previas de este documento, la generación de los campos de viento se realiza en la actualidad mediante el módulo TOPWIND.

Tal y como fue comentado, el método utilizado por dicho módulo es un procedimiento estrictamente matemático que no impone ningún tipo de restricción dinámica sobre el campo de vientos. En principio, se supone que la medida en cada punto de muestreo incluye implícitamente cualquier tipo de influencia del terreno próximo a ella, así como de cualquier proceso físico que tenga lugar en sus proximidades. Por lo anterior, se deduce que la descripción del campo de vientos que utiliza el modelo será tanto mejor cuanto mayor sea el número de estaciones de medida involucradas en la simulación y viceversa.

En el caso que nos ocupa, esta descripción puede resultar inadecuada si consideramos que, además, el emplazamiento de El Cabril posee una topografía complicada en la que los efectos locales

pueden ser no despreciables. Este hecho puede verse agravado por la circunstancia de que la operación de rutina del modelo tendrá que ser realizada utilizando datos provenientes únicamente de dos puntos de medida.

A pesar de que TOPWIND, realiza un ajuste topográfico elemental del campo de vientos, el método goza de una componente subjetiva bastante grande, derivada sobre todo de la conceptualización del terreno como líneas de obstáculo y de la definición subjetiva de los coeficientes de ladera. La experiencia acumulada en el uso de este modelo sugiere que los resultados de la aplicación de este procedimiento pueden ser muy desiguales. El método permite, no obstante, efectuar un ajuste rudimentario del campo de vientos al terreno en determinadas ocasiones. Este ajuste permite al menos disminuir el efecto de ciertas inconsistencias inducidas por una interpolación directa del viento a los nodos de la red.

En el futuro, de cara a la operación de rutina de la aplicación, y dada la escasa cobertura espacial de los datos reales que estarán disponibles, sería deseable la utilización de algún algoritmo de interpolación que proporcione un ajuste al terreno basado en métodos objetivos, o la utilización de nuevos modelos tanto de diagnóstico, como de pronóstico.

B. Estructura vertical

En apartados anteriores fueron descritos los algoritmos utilizados para efectuar la interpolación vertical del campo de vientos a partir de los valores del viento en superficie y del viento en altura, existente por encima del límite de la capa de mezcla.

El esquema descrito depende de forma crítica de los valores del coeficiente de interpolación vertical, α . En principio el código del modelo está preparado para incluir fácilmente el uso de dos coeficientes de interpolación vertical, α_u y α_v , que podrían ser utilizados para la interpolación de las componentes U y V del viento, respectivamente.

De nuevo, la experiencia en el uso del modelo muestra cómo los resultados que proporciona el mismo pueden ser notablemente mejorados si se realiza un ajuste empírico de los valores de α_u y α_v . Para lo cual sería necesario disponer de información suficiente, medida en campo, acerca de la estructura vertical del campo de vientos en las zona.

Por lo anterior, el Gestor de Modelos de PANDORA está preparado para poder acomodar en el futuro el cambio de los valores de los coeficientes

α_u y α_v , pero dicha opción se encuentra desactivada en su configuración actual. Los valores de dichos parámetros serán, por tanto, en cualquier circunstancia $\alpha_u = \alpha_v = 1.0$.

Otros dos aspectos muy importantes, tampoco considerados en el modelo son la influencia de la cizalladura del viento sobre el penacho, y los posibles efectos derivados de la estratificación térmica que con frecuencia se observa en este tipo de emplazamientos. El primero de ellos podría ser soslayado parcialmente mediante la expresión recomendada por la US Army para los coeficientes de difusión. Para ello debería ser parametrizada de forma adecuada la función $F(x)$, para lo cual serían necesarias medidas de turbulencia adecuadas así como observaciones *in situ* de la evolución del penacho. El segundo, exigiría una modificación radical del código y de los planteamientos del modelo. Tanto un aspecto, como el otro no han sido tenidos en cuenta para el desarrollo de PANDORA, por razones evidentes.

10.3 Tratamiento de la capa de mezcla

MESOI considera una descripción muy simplificada de la capa de mezcla, cuya presencia es tenida en cuenta para realizar el cálculo de las concentraciones. El modelo considera la capa de mezcla como el límite efectivo para la dispersión vertical del contaminante, suponiendo que la misma se extiende de forma paralela a la superficie del terreno.

La altura de la capa de mezcla es un *input* del modelo, el cual debe ser suministrado con la misma periodicidad que la información meteorológica. El modelo no incorpora ningún tipo de parametrización acerca de la capa de mezcla en su configuración inicial.

El tratamiento específico que recibe la emisión de contaminantes debido a la presencia de la capa de mezcla fue comentado en detalle en secciones anteriores de este documento (ver "El modelo de dispersión MESOI V.2.0"), por ello no recibirá más atención en este apartado. Sin embargo, y dado que PANDORA incorpora varios algoritmos para la estimación de la altura de la capa de mezcla, es interesante plantear la cuestión de cual es el nivel de detalle que debe tener dicho algoritmo para que sus estimaciones sean utilizados en conjunción con el modelo MESOI.

Para ello se procedió a realizar una serie de pruebas sencillas tendentes a probar la "sensibili-

dad" del modelo, estudiando la variación en las concentraciones estimadas por el modelo, inducidas por la variación de diversos parámetros de entrada, entre ellos la altura de la capa de mezcla.

El procedimiento seguido consistió en elaborar un conjunto de datos "artificiales", representativos de diversos escenarios de emisión sencillos, sobre los cuales se ejecuta el modelo, variando caso a caso alguno de los parámetros de entrada. Para simplificar el problema, en todos los casos el modelo fue ejecutado suponiendo terreno llano. El campo de vientos fue generado a partir de un total de 16 puntos de muestreo distribuidos regularmente sobre el dominio de aplicación del modelo, con el fin de conseguir un campo de vientos homogéneo en todos los puntos. En cada caso la ejecución del modelo fue mantenida hasta conseguir un régimen lo más cercano posible al estado estacionario.

En lo que concierne a la capa de mezcla, el resultado tal vez más interesante observado fue la falta de sensibilidad del modelo frente a los cambios en la altura de la misma a igualdad de condiciones de simulación. De tal forma se observó que los valores de concentración permanecían prácticamente invariables frente a los cambios en el espesor de la capa de mezcla, cuando la altura de ésta supera aproximadamente los 500 m. Los resultados son similares para diferentes valores de velocidad de viento y estabilidad atmosférica.

De lo anterior se deduce que el uso de este modelo no exige una parametrización muy rigurosa de la evolución de la altura de la capa de mezcla, al menos a partir de los primeros 500 m. Dado que este valor puede ser fácilmente superado durante las horas centrales del día, el anterior resultado sugiere la conveniencia de centrar el interés de la parametrización de la altura de capa de mezcla en aquel tipo de situaciones o periodos en los que el modelo sea realmente sensible a dicho parámetro. Los algoritmos finalmente implementados en PANDORA han considerado un orden de precisión numérica coherente con el comportamiento observado para MESOI.

10.4 Características de la modelización en puffs

En líneas generales, el conjunto de pruebas descrito en el apartado anterior permitió poner de manifiesto un comportamiento cualitativo del modelo bastante aceptable, pero también ha eviden-

ciado algunas particularidades de las estimaciones que el modelo proporciona que es interesante comentar al menos brevemente.

Los aspectos que han sido sobre todo valorados han sido los relacionados con la parametrización de la sobreelevación del penacho y con la distribución final de concentraciones en la rejilla.

10.4.1 Sobreelevación del penacho

La estimación de la sobreelevación del penacho es un aspecto que puede ser crítico para la aplicación de un modelo de dispersión. Una estimación incorrecta de la sobreelevación del penacho tiene un efecto inmediato en el cálculo de las concentraciones, bien a través de la distribución vertical de concentraciones, bien mediante el aumento de la incertidumbre que introduce en el transporte de la pluma.

Dado que no existe información *a priori* acerca de las características del penacho de la instalación, no es aconsejable efectuar ningún tipo de ajuste o modificación en este módulo del modelo. Sin embargo, fue realizado un ejercicio teórico para tratar de valorar la influencia de la parametrización implementada en el mismo. Igualmente se trató de formular algún tipo de hipótesis acerca de las características que podía presentar el penacho de la instalación.

Como información de partida han sido considerado los siguientes datos de partida:

Diámetro interior de la chimenea	0.5 m
Velocidad de salida de gases	15 m/s
Temperatura de salida de gases	150°C

A partir de dicha información fueron realizadas algunas estimaciones acerca de ciertas características físicas de interés de los gases en el momento de su emisión en la chimenea:

- ❑ La razón entre el flujo de momento y el de flotabilidad en el momento de la emisión de gases a la atmósfera, considerando un rango de variación de temperatura ambiente entre 0 y 30 °C, oscila alrededor de 4.5.
- ❑ El número de Froude de los gases liberados supera claramente los valores próximos a la unidad.
- ❑ La escala longitudinal de movimiento (l_m) predomina sobre la escala térmica (l_b).

Es necesario indicar que los valores l_m y l_b han sido obtenidos suponiendo que el desarrollo de la pluma no es vertical (se realiza con velocidades mayores a 1 m/s) y que la sección del penacho en los puntos inmediatamente próximos al punto de emisión puede ser considerada circular.

Los resultados anteriores sugieren las siguientes consideraciones de interés:

- ❑ El hecho de que la escala longitudinal asociada al flujo vertical de momento sea netamente superior a la escala longitudinal asociada a la flotabilidad térmica ascensional del penacho, a pesar de que la temperatura teórica de éste sea de 150 °C, indica la dominancia del momento sobre la componente ascensional térmica. Dicha dominancia forzaría al penacho a estabilizarse de forma más rápida y, previsiblemente, a distancias relativamente próximas al foco emisor.
- ❑ Los números de Froude muy superiores a la unidad, sugieren que las fuerzas debidas a la flotabilidad térmica son insuficientes como para neutralizar a las debidas al ímpetu ascensional mecánico. Como consecuencia la componente ascensional inicial del penacho tenderá a disminuir rápidamente durante los primeros instantes del proceso de elevación, disipándose su energía en la atmósfera.

Las conclusiones anteriores deben ser entendidas como un mero ejercicio teórico, ya que en realidad las anteriores estimaciones deberían ser realizadas partiendo de medidas reales efectuadas sobre el penacho a lo largo de su trayectoria.

Por lo general, la componente mecánica suele ser predominante en los primeros momentos de la emisión, siendo necesarios tiempos del orden de 4-5 segundos para que se produzca la transición al régimen dominado por los efectos de flotación. Ello parece estar de acuerdo con las razones del flujo de momento al de flotabilidad encontradas.

El algoritmo actualmente implementado en el modelo MESOI V.2.0, no da cuenta de la trayectoria de la pluma en los instantes iniciales posteriores a la emisión, realizándose únicamente una estimación de la altura final de equilibrio esperada. Según diversos estudios dicho algoritmo tiende a infravalorar en líneas generales la estimaciones, sobre todo en condiciones de estabilidad.

En el caso que nos ocupa, el análisis efectuado, parece indicar que las estimaciones del algoritmo sitúan la altura efectiva de emisión predominantemente dentro de los estratos de circulación inferior.

res, próximos al suelo, excepto, quizá para algunos casos de estabilidad atmosférica. Por tanto, cualquier error en la estimación puede alterar sensiblemente la contribución de las emisiones a los niveles de concentración junto al suelo.

La validación de este algoritmo o el ajuste de otros diferentes basados en el análisis detallado del ascenso de la pluma de contaminantes emitidos, podría ser de gran interés para el funcionamiento de rutina de la aplicación PANDORA.

10.3.2 Campo de concentraciones

Durante las ejecuciones de prueba se ha podido apreciar la aparición de valores de concentración anómalos o no esperados, principalmente relacionados con las escenarios con viento débil y condiciones atmosféricas inestables.

En las anteriores circunstancias, cuando la distancia recorrida por un puff en un periodo de advección no es lo suficientemente grande, las dimensiones del puff se ven afectadas por un crecimiento anómalo, de manera que es posible observar concentraciones (aunque de pequeña magnitud) por detrás de la fuente, en dirección opuesta al sentido de la dispersión señalado por el viento.

Una revisión de los valores de las posiciones de los centros de los puffs así como de la evolución de los radios de su proyección sobre el suelo, pone de manifiesto como es posible observar puffs cuyos radios alcanzan valores incluso de varios km. a distancias relativamente cercanas al foco emisor. Tales valores contrastan fuertemente con los valores estándar de referencia de 3σ , que son claramente menores.

Para comprender mejor los resultados del modelo, este hecho fue objeto de atención, durante los trabajos previos al desarrollo informático de la aplicación. Para ello, algunos módulos de cálculo del modelo han sido chequeados en el siguiente orden:

1. Cálculo de parámetros de difusión.
2. Procedimiento de eliminación y colapso de puffs.
3. Procedimientos de estimación del tamaño de los puffs.

Analizado el procedimiento de cálculo de los parámetros de difusión, fue descartado como causa de tal efecto, debido a su gran simplicidad.

Por tanto el interés fue centrado en los procesos 2 y 3.

Influencia del procedimiento de eliminación de puffs

Un puff puede ser eliminado del grid por cualquiera de las tres causas siguientes:

- ☐ El puff abandona la rejilla de cálculo al ser advechado por el viento.
- ☐ La concentración máxima en el puff decrece por debajo de un umbral mínimo (controlado por la variable $\text{chimn}=1.0\text{E}-15/60 \text{ min/m}^3$). Este valor explica el orden de magnitud mínimo de las concentraciones que son registradas en los nodos de la red ($1.0\text{E}-17$).
- ☐ Cuando los puffs provenientes de una misma fuente se encuentran lo suficientemente cerca, el modelo provoca el colapso de ambos puffs, generando uno nuevo. El término fuente del nuevo puff es la suma de los términos fuente de los dos puffs anteriores. Los valores de σ_y y del radio de dicho puff son calculados como la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de los valores individuales de σ_y y de los radios de los puffs que son combinados. El valor de σ_z se escoge como el mayor valor de ambos.

La posible influencia de este procedimiento fue analizada y, finalmente, su importancia fue descartada, si bien es necesario señalar que puede ser no despreciable en ciertas ocasiones, por ejemplo en los casos en que se realice una descripción muy pobre de la geometría del penacho (un número de puff/hora demasiado pequeño, por ejemplo).

Influencia del procedimiento de estimación del tamaño de los puffs

La contribución de cada puff a los niveles de concentración junto al suelo en cada nodo de la red es calculada en el modelo, puff a puff, para cada periodo de advección. Los intervalos de muestreo que se utilizan en cada periodo de advección dependen de los valores de la razón de la distancia recorrida por el puff dentro de cada periodo de advección al valor de σ_y .

Una vez que se asigna una altura de emisión efectiva al centro del puff, el modelo analiza los valores de concentración en la vertical al suelo desde el citado centro, considerando para ello el valor adecuado de σ_z . Si la concentración a nivel del suelo es menor que un valor pre-especificado, la contribución de dicho puff a los nodos de la red no es calculada. En caso contrario el modelo estima el radio del área circular de influencia del puff

al nivel del suelo. El valor mínimo de concentración que es considerado "en tiempo de muestreo" es $CHIMIN \cdot DT$, donde $CHIMIN$ es un valor definido anteriormente y DT es el intervalo de muestreo en minutos. En este caso, las concentraciones son calculadas en los nodos de la red que se encuentran contenidos dentro del área considerada.

Por lo anterior los puffs son tratados en MESOI como "áreas circulares cuyo centro se encuentra situado en la proyección del centro del puff sobre el suelo y cuyo radio indica la distancia a la que se alcanza un valor predeterminado de concentración normalizada".

La representación de los puffs usando un radio basado en un valor de concentración mínima límite, es la responsable de la aparición de puffs de dimensiones más grandes de lo que cabría esperar a distancias próximas de la fuente, sobre todo si tales dimensiones son comparadas con el valor de concentración que se alcanza a una distancia de $3\sigma_y$ del centro del puff.

A partir de las pruebas realizadas sobre el modelo, el anterior procedimiento de cálculo parece ser el principal responsable del incremento aparentemente "anómalo" de los radios de los puffs.

En la incidencia de este hecho influyen, lógicamente, la estabilidad atmosférica (cuanto mayor sea la inestabilidad, mayor será el radio) y el mecanismo de eliminación y colapso de los puffs (recuérdese que el procedimiento de mezcla y eliminación de los puffs ocasiona la aparición de nuevos puffs de mayores dimensiones que los originales). La verificación de tales relaciones ha sido realizada chequeando el modelo manualmente.

Hasta donde ha sido posible investigar este hecho parece que el problema no tiene solución sin realizar modificaciones importantes en el código, las cuales caen fuera del alcance de este trabajo.

De acuerdo con lo esperado por los autores del modelo, los resultados parecen indicar que las estimaciones más realistas del modelo se obtienen en el rango de distancias en el que el criterio implementado, basado en la obtención de una concentración mínima, coincide con el de $3\sigma_y$.

10.5 Conclusiones.

Limitaciones generales del modelo

El modelo MESOI V.2.0. es una herramienta de cálculo cuya finalidad es la simulación de los pro-

cesos de dispersión a los que se ven sometidos los contaminantes emitidos desde uno o más focos de emisión, desde el momento en que estos son liberados a la atmósfera. La simulación considera los mecanismos de sobreelevación del penacho, transporte, difusión y deposición del material emitido.

Como toda herramienta de simulación, MESOI, está sujeto a numerosas restricciones o limitaciones de uso. Las principales limitaciones del modelo pueden ser agrupadas en tres categorías:

- ☐ Limitaciones derivadas de las formulaciones o parametrizaciones implementadas.
- ☐ Limitaciones impuestas por el tipo de datos que el modelo utiliza como input.
- ☐ Restricciones numéricas impuestas por la necesidad de conseguir un compromiso entre los requisitos de memoria y tiempos de ejecución del modelo.

Las principales consideraciones concernientes a este último grupo han sido ya tratadas en secciones anteriores de este documento. Por tanto, el interés ahora, se centrará en resumir brevemente los aspectos más interesantes relacionados con los dos primeros.

A. Limitaciones debidas a la formulación del modelo

MESOI es un modelo diseñado, en principio, para proporcionar una respuesta aceptablemente rápida para la asesoría a la operación o emergencia de un foco emisor. Por tanto, las formulaciones que utiliza suelen tener un carácter claramente simplificador, aun cuando los procesos que el modelo intenta simular son bastante complejos. Aunque en algunos casos (tales como el decaimiento) los algoritmos utilizados para representar los diferentes procesos son bastante aproximados a la realidad, en la mayoría de los casos son una simple analogía matemática.

A pesar de lo anterior, el modelo puede ser considerado realista, en el sentido de que usa procedimientos de cálculo y parametrizaciones muy ajustadas a la situación real (disponibilidad de medidas, sistemas de cálculo, etc.) de las instalaciones en las que puede ser utilizado.

Las principales simplificaciones realizadas por el modelo afectan a los siguientes aspectos:

- ☐ Descripción del penacho mediante el uso de puffs gaussianos.
- ☐ Ajuste empírico del campo de vientos.
- ☐ Esquema de interpolación vertical del viento muy simplificado.
- ☐ Descripción elemental de la sobreelevación del penacho.

Debe ser entendido que las limitaciones impuestas por tales formulaciones tienen un carácter "esencial": si se espera que el ajuste que proporcionan no sea el adecuado, la única posibilidad de mejora es sustituir las formulaciones empleadas por otras dentro del código del programa.

Algunos aspectos que pueden ser manifiestamente mejorados pueden ser el procedimiento de ajuste del campo de vientos, el algoritmo de sobreelevación, o el de interpolación vertical del viento, la inclusión de efectos de cizalladura sobre la difusión o una mejor resolución del modelo a distancias próximas a la fuente. Algunas de tales mejoras han sido ya efectuadas en PANDORA.

B. Limitaciones impuestas por los datos

Las limitaciones impuestas por los *inputs* del modelo pueden ser agrupadas en tres clases:

- ☐ Incertidumbres en los valores del término fuente.

Los datos necesarios para simular la emisión de contaminantes (además de las características geométricas de la fuente) son la tasa de emisión del contaminante y el flujo volumétrico de gases. Si no se realiza un seguimiento continuo de dichos valores, es aconsejable entonces utilizar un valor de la tasa de emisión normalizado a la unidad. En este caso, los resultados del modelo servirán únicamente para proporcionar una estimación de la posición de la pluma, así como de los valores de concentración relativa (X/Q). Si los datos de emisión son conocidos, es posible obtener los valores de la concentración integrada en el tiempo, así como los valores de contaminación en superficie, sin más que multiplicar los valores de concentración relativa por la tasa de emisión.

Si sólo se pretende realizar una estimación cualitativa, pueden ser usados los valores de emisión previstos en el diseño de la planta.

- ☐ Falta de idoneidad e incertidumbre de las parametrizaciones del modelo.

La bondad de los resultados que cabe esperar de la aplicación del modelo MESOI depende, en gran medida, de la parametrización de los coeficientes de difusión y "washout", así como de la velocidad de deposición.

En principio, sobre terreno llano, y campos de vientos homogéneos y uniformes, sobre este modelo deberán ser consideradas las mismas restricciones que aplican a un modelo gaussiano. Por tanto, se puede considerar que la incertidumbre en las estimaciones del modelo a corto plazo, se encuentran acotadas en un factor de ± 2 . Esta incertidumbre disminuye a medida que se aumenta la duración de la emisión.

A medida que la complejidad del terreno o de la meteorología aumenta, es de esperar que aumente la incertidumbre en las estimaciones. Es necesario indicar, no obstante, que en este caso, las estimaciones de un modelo de puff como MESOI, deben ser mejores que las proporcionadas por un modelo gaussiano de trayectoria recta, debido a que la descripción del transporte es manifiestamente más realista en el primer caso que en el segundo.

Otro aspecto que influye en la incertidumbre de las estimaciones es el procedimiento utilizado para describir la estabilidad atmosférica. En concreto, el modelo usa el esquema de clasificación de Pasquill-Gifford, que constituye una aproximación muy grosera al problema, sobre todo en terrenos con meteorología y terreno complejos.

Igualmente, siguiendo las recomendaciones de los autores, es necesario indicar que las estimaciones que el modelo proporciona de la contaminación en superficie, constituyen solo una aproximación elemental al problema y solo pueden ser contempladas como una indicación de las áreas que pueden ser sensibles al impacto de las emisiones.

- ☐ Incertidumbres derivadas de la información meteorológica disponible.

La mayoría de los aspectos concernientes a este punto, han sido ya comentados en apartados anteriores. No obstante, un punto que no ha sido tratado y que merece la pena

destacar es la posible influencia de la *altura efectiva de emisión*.

Si dicha altura no se encuentra bien definida el error existente en las estimaciones de las posiciones de los puffs puede ser muy grande. El procedimiento que puede ser seguido en tales situaciones es intentar acotar dicho error. Para ello, el modelo puede ser ejecu-

tado varias veces, modificando en cada ejecución los valores de la altura efectiva de emisión.

Dichos valores pueden ser representativos de la altura efectiva de emisión más probable esperada, así como de los límites inferior y superior esperados para la misma.

11

CONCLUSIONES

Como resultado de los trabajos realizados se ha conseguido sintetizar en la aplicación *PANDORA* una buena parte del conocimiento existente acerca de los principales regímenes de circulación atmosférica en el entorno de la Instalación de Almacenamiento de Residuos de El Cabril.

Dicha aplicación informática puede ser utilizada por dicha Instalación con una doble finalidad.

- Por una parte, el uso rutinario de *PANDORA* en las tareas de control de calidad y seguimiento continuos de las torres meteorológicas ubicadas en la misma, permite simplificar notablemente la atención requerida por el personal técnico encargado de su mantenimiento y supervisión.
- Por otra, el programa puede ser utilizado como ayuda a la operación de la planta, ya que dispone de las herramientas necesarias para establecer un diagnóstico y un pronóstico de las condiciones de dispersión existentes en la zona. De esta forma, el usuario podrá ajustar los parámetros o el plan de operación del foco, para conseguir una minimización del impacto de las emisiones.

Entre las características más notables de *PANDORA*, destacan:

- La aplicación puede ser instalada en plataformas informáticas tipo PC de prestaciones medias.
- El tiempo necesario para su aprendizaje y utilización es muy reducido. La comunicación con el usuario ha sido planteada sobre un entorno gráfico de ventanas de manejo fácil e intuitivo.
- Es posible incorporar nuevos conocimientos sobre los regímenes de dispersión en la

zona, sin modificar sustancialmente el desarrollo ya efectuado. También es posible la incorporación de nuevos módulos de cálculo, así como nuevos modelos numéricos.

Como todo programa de simulación, *PANDORA* está limitado por las características de los modelos que incorpora, así como por las restricciones impuestas por las aproximaciones y simplificaciones efectuadas a la hora de describir los procesos de transporte y dispersión.

Como ha sido comentado en secciones anteriores, los resultados de la versión actual del sistema deben ser, en buena lógica sometidos a un proceso crítico de pruebas y ajuste. Dicho proceso no debiera ser, por otra parte, ajeno a la realización de un programa de validación que permitiera corregir y ampliar la base de conocimiento del sistema, o al menos determinar las incertidumbres principales que pueden afectar a las estimaciones que en él son realizadas.

En particular, de cara al futuro, sería interesante una revisión y validación de los algoritmos relacionados sobre todo con la estimación de la altura de la capa de mezcla y la sobreelevación del penacho, ya que tienen una gran influencia sobre el cálculo de concentraciones. Es necesario recordar en este punto que las aproximaciones incluidas en *PANDORA*, representan una aproximación sencilla al problema, como consecuencia de la ausencia de información acerca de determinadas variables y parámetros en el emplazamiento.

Un conocimiento más detallado de las anteriores cuestiones podría permitir la inclusión de modelos más sofisticados, que dieran cuenta con mayor detalle de la estructura vertical de los regímenes típicos de circulación.

12

REFERENCIAS

1. Ibersaic, S.A. (1995). "Manual del usuario de la aplicación PANDORA v.1.0". Madrid.
2. Dickerson, M.H., Gudiksen, P.H., ed. (1983). "Atmospheric Studies in Complex Terrain. Technical Progress Report, FY-1979 Trough FY-1983".
3. Garret, A.J., Smith III, F.G. (1984). "Two-Dimensional Simulations of Drainage Winds and Diffusion Compared to Observations". *Jou. Clim. and Appl. Meteor.*, 23, n° 4, 598-610.
4. Mannins, P.C., Sawford, B.L. (1979). "A Model of Katabatic Winds". *Jou. of Atm. Scien.*, 36, 619-630.
5. Pielke, R.A., Martin, C.L. (1981). "The Derivation of a Terrain-Following Coordinate System for Use in a Hidrostatic Model". *Jou. of Atm. Scien.*, 38, 1707-1714.
6. Hanna, S.R., Briggs, G.A, Hosker, Jr., R.P. (1982). "Handbook on Atmospheric Diffusion". Ed. Tech. Inf. Center. U.S. Dept. of Energy.
7. Abramowitz, M. Stegun, I.A., ed. (1972). "Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables. Dover Publications INC., Nueva York, (1ª Ed. 1965).
8. Pielke, R.A. (1984). "Mesoscale Meteorological Modeling". Ed. Academic Press Inc., Orlando, Florida.
9. Panofsky, H. A., Dutton (1984). "Atmospheric Turbulence". John Wiley. New York.
10. Benkley, C. A., Schulman, L.L. (1979). "Estimating hourly mixing depths from historical meteorological data". *Jou. Appl. Meteor.*, 18, 772-780.
11. Tennekes, H., (1973). "A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer". *J. Atmos. Sci.*, 30, 558-567.
12. Venkatram, A., (1977). "A model of internal boundary-layer development". *Boundary-Layer Meteor.*, 11, 419-437.
13. Driedonks, A. G. M., (1982). "Models and observations of the growth of the atmospheric boundary layer". *Boundary-Layer Meteor.*, 23, 283-306.
14. Dickerson, M. H., Gudiksen, P. H. (ed.) (1983). "Atmospheric studies in complex terrain. Tech. progress rep. FY-1979- trough FY-1983".
15. Hanna, S. R. (ed.) (1989). "Atmospheric studies in complex terrain". *J. Appl. Meteor*, vol. 28, n° 6 y 7.
16. Blumen, W., (1990). "Atmospheric processes over complex terrain". *Met. Monographs*. vol. 23, n° 45, A.M.S, Boston, MA.
17. Whiteman, C. D. (1982). "Breakup of nocturnal inversion in deep mountain valleys, Parts I-II". *J. Appl. Meteor.*, 21, 270-302.
18. Muller, H. , Whiteman, C. D. (1988). "Breakup of nocturnal inversions in the Dichma Valley during DISKUS". *J. Appl. Meteor*, 27, 188-194.
19. Kelly, R. D. (1988). "Asymmetric Removal of Temperature inversions in a high Mountain Valley". *J. Appl. Meteor.*, 27, 664-673.
20. Dobbins, R. A. (1979). "Atmospheric motion and air pollution". Willey Interscience. New York.
21. Sutton, O. G. (1953). "Micrometeorology". McGraw-Hill Co.
22. Garret, A. J., Smith III, F. G. (1984). "Two-Dimensional simulations of drainage winds and diffusion compared to observations". *J. Clim. Appl. Meteor.*, 23, 598-610.
23. Ramsdell, J. V. et al. (1983). "MESOI v. 2.0.. An interactive mesoscale Lagrangian puff dispersion model with deposition and decay". NUREG/CR-3344. PNL-4753.
24. Wetzel, P., (1982). "Toward the parameterization of the stable boundary-layer". *J. Appl. Meteor.*, 21, 7-29.
25. Zilitinkevich, S. L., (1972). "On the determination of the height of the Ekman boundary layer". *Boundary-Layer Meteor.*, 21. 225-250.
26. Zannetti, P., (1990). "Air pollution modeling. Theories computational methods and available software". *Comp. Mech. Pub. Van Nostrand Reinhold*, New York.
27. Aloyan , A. E. et al. (1981). "Parametrization of a surface layer with variable height". *Soc. Met. And Hirdrol.*, 27-34. En ref. 2.
28. Powell, D. C., "A formulation of time-varying depths of daytime mixed layer and night-time

- stable layer for use in air pollution assesment models".
29. Casanova, J. L. et al. (1992). "Cálculo de la altura de mezcla mediante una torre meteorológica". Ponencias de la XVIII Reunión Anual. Soc. Nuc. Esp. 28-30 oct 1992. Jerez de la Frontera-Pto. Sta. María. pp. 208-210.
 30. Yamada, T., (1979). "Predictions of the nocturnal surface inversion height". J. Appl. Meteor., 18, 526-531. En ref 2.
 31. Deardorff, J. W., (1974). "Three-Dimensional numerical study of the height and mean structure of a heated planetary boundary-layer". Boundary-Layer Meteor., 7, 81-106. En ref. 24.
 32. Rayner, K. N., Watson, I. D. (1991). "Operational predictions of daytime mixed layer heights for dispersion modelling". Atmos. Envir., 25A, 1427-1436.
 33. Deardorff, J. W., (1972). "Parameterization of the planetary boundary layer for use in general circulation models". Mon. Wea. Rev., 100, 93-106.
 34. Gamo, M., Yokoyama, O., (1979). "Growth of the mixing depth and the diurnal variation of vertical profiles of temperature and turbulence characteristics in the mixing layer". J. Met. Soc. Jap., 57, 159-171.
 35. Stull, R. B. (1973). "Inversion-rise model based on penetrative convection". J. Atmos. Sci., 30, 1092-1099.
 36. Carson, D. J., (1973). "The development of a dry inversion-capped convectively unstable boundary layer". Quart. Roy. Meteor. Soc., 90, 450-467.
 37. Mahfouh, J. F. et al. (1987). "A comparative study of various parameterizations of the planetary boundary layer in a numerical mesoscale model". J. Appl. Meteor, 26, 1671-1695.
 38. Van Ulden, A. P., Holtslag, A. A .M., (1985). "Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications". J. Appl, Meteor., 24, 1196-1207.

13

FIGURAS

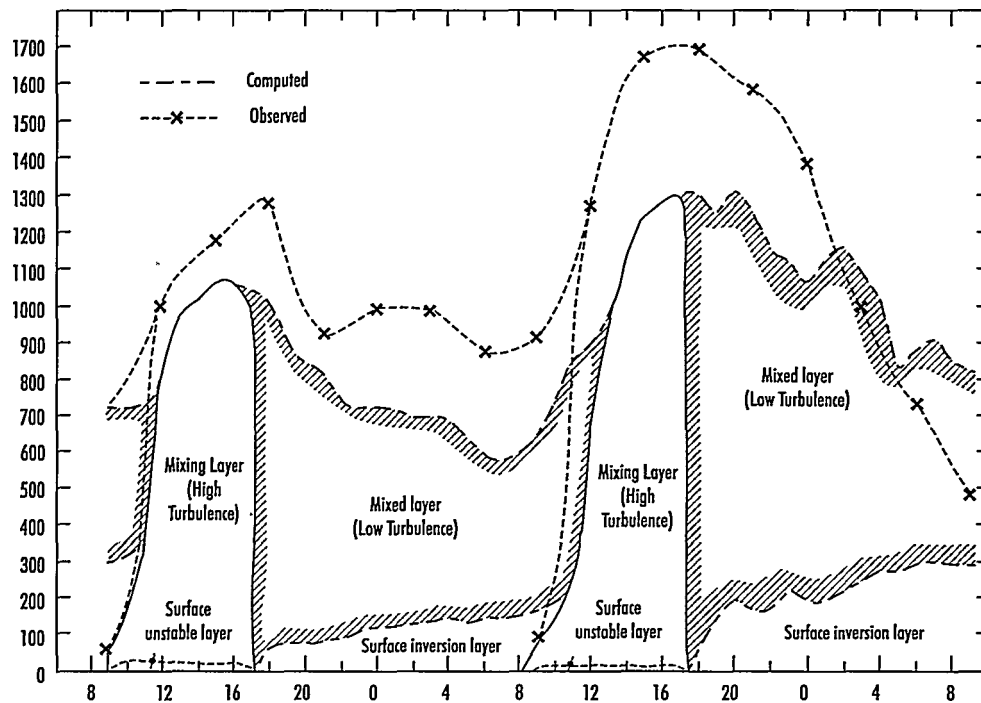


Figura 8.1. Representación gráfica del ciclo de evolución de la capa de mezcla (en Dobbins, R.A., ref. 20).

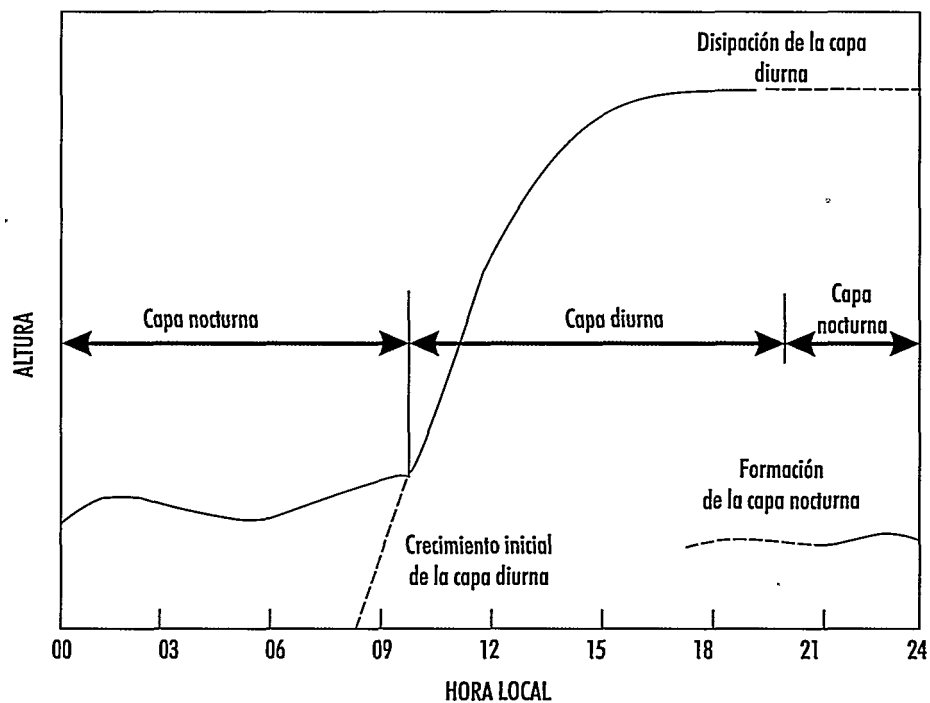


Figura 8.2. Representación esquemática del modelo de evolución de altura de la capa de mezcla incluido en PANDORA.

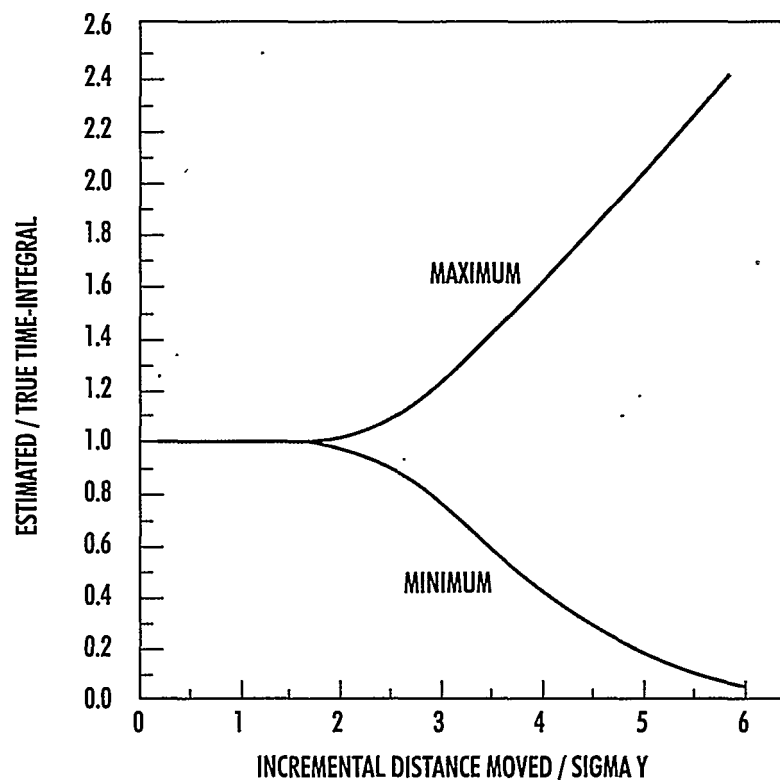


Figura 10.1. Relación entre la incertidumbre en el cálculo de concentraciones realizada por MESOI V.2.0 y la razón entre la distancia recorrida por un puff en un intervalo de integración y los valores de Sigma y correspondientes (en ref. 23).

14

TABLAS

Tabla 2.1

Relación de puntos de muestreo utilizados en las campañas de medida durante el proyecto de "Caracterización de procesos atmosféricos en terreno complejo". En el punto correspondiente al Cerro de los Morales se ubica en la actualidad la Torre Primaria de la instalación. "Torre Base" es la antigua denominación de la actual Torre Secundaria

Clave	Punto de muestreo	UTM-X	UTM-Y	Altura (m)
T1	Cerro de los Morales	288.30	4217.70	391.0
T2	Arroyo Montesinos	289.50	4216.50	243.0
T3	Sierra Albarrana	283.60	4220.20	740.0
T4	Fuente del Cura	291.70	4215.50	320.0
T5	Cerro del Becerro	290.70	4220.70	515.0
T6	Pantano de Bembézar	305.70	4197.50	200.0
T7	Torre Base	287.80	4216.85	569.0

Tabla 3.1

Relación de variables meteorológicas que se miden en la Torre Primaria. Claves de identificación y unidades de medida

Nivel	Variable	Significado	Sensor	Unidades
10	VV11	Velocidad del viento	Nominal	m/s
	VVR11		Redundante	
	DV11	Dirección del viento	Nominal	grados sexag.
	DVR11		Redundante	
	ST11	$\sigma\theta$ del viento	Nominal	
	STR11		Redundante	
10-60	$\Delta T121$	Incremento de temperatura entre los niveles de 10-60 m	Nominal	$^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$
	$\Delta TR121$		Redundante	
10	T11	Temperatura ambiente	Nominal	$^{\circ}\text{C}$
	HR11	Humedad relativa	Nominal	%
0	PR10	Precipitación	Nominal	mm
	RS10	Radiación solar	Nominal	$\text{cal}/\text{cm}^2\text{ min}$
10-60	ES121	Close de estabilidad	Nominal	

Tabla 3.2
Relación de intervalos y rangos de variación que se utilizan para las diferentes variables en el cálculo de distribuciones de frecuencias

Nivel	Variable	Significado	Sensor	Unidades	
10	VV21	Velocidad del viento	nominal	m/s	
	DV21	Dirección del viento		grados sexag.	
40	VV22	Velocidad del viento		m/s	
	DV22	Dirección del viento			
10	ST21	$\sigma\theta$ del viento			grados sexag.
40	ST22				
10	T21	Temperatura ambiente			°C

Tabla 3.3
Relación de intervalos y rangos de variación que se utilizan para las diferentes variables en el cálculo de distribuciones de frecuencias

Variables	Descripción	Nº de intervalos	Límites
W11 WVR11 WV21 WV22	Velocidad del viento	5	<1 1 - 3 3 - 6 6 - 10 10 - 999.9
DV11 DVR11 DV21 DV22	Dirección del viento	8	337.5 - 22.5 22.5 - 67.5 67.5 - 112.5 112.5 - 157.5 157.5 - 202.5 202.5 - 247.5 247.5 - 292.5 292.5 - 337.5
ST11 STR11 ST21 ST22	Desviación estándar de la dirección del viento	5	<20 20 - 40 40 - 60 60 - 80 80 - 999.9
T11 T21	Temperatura	9	<(-10) (-10) - 0 0 - 5 5 - 15 15 - 20 20 - 25 25 - 30 30 - 35 35 - 999.9
AT121 ATR121	Gradiente de temperatura	7	<(-1.8) (-1.8) - (-1.6) (-1.6) - (-1.4) (-1.4) - (-0.4) (-0.4) - 1.6 1.6 - 4.1 4.1 - 999.9
HR11	Humedad relativa	7	<40 40 - 50 50 - 60 60 - 70 70 - 80 80 - 90 90 - 999.9

Tabla 3.3
Relación de intervalos y rangos de variación que se utilizan para las diferentes variables en el cálculo de distribuciones de frecuencias (continuación)

Variables	Descripción	Nº de intervalos	Límites
PR10	Precipitación	7	<1
			1 - 3
			3 - 5
			5 - 7
			7 - 10
			10 - 20
			20 - 30
RS10	Radiación solar	5	<0.4
			0.4 - 0.8
			0.8 - 1.2
			1.2 - 1.6
			1.6 - 999.9

Tabla 3.4
Coordenadas UTM de las esquinas del área de estudio para la Escala 1. Las esquinas se indican en el sistema de referencia de la red de vientos

Escala 1		
Nodo	UTM-X	UTM-Y
(1,1)	281.40	4210.00
(16,1)	296.40	4209.70
(16,16)	296.70	4224.70
(1,16)	281.70	4225.00

Tabla 3.5
Coordenadas UTM de las esquinas del área de estudio para la Escala 2. Las esquinas se indican en el sistema de referencia de la red de vientos

Escala 1		
Nodo	UTM-X	UTM-Y
(1,1)	258.00	4188.60
(16,1)	318.00	4187.40
(16,16)	319.20	4247.40
(1,16)	259.20	4248.40

Tabla 4.1
Clases de estabilidad atmosférica establecidas en función de los valores del gradiente vertical de temperaturas de acuerdo con la clasificación de Pasquill-Gifford

Clase de estabilidad	Índice	Gradiente vertical de temperatura (°C/100M)
A	1	$\Delta t/\Delta z \leq -1.9$
B	2	$-1.9 < \Delta t/\Delta z \leq -1.7$
C	3	$-1.7 < \Delta t/\Delta z \leq -1.5$
D	4	$-1.5 < \Delta t/\Delta z \leq -1.2$
E	5	$-1.2 < \Delta t/\Delta z \leq -1.0$
F	6	$-1.0 < \Delta t/\Delta z \leq -0.5$
G	7	$-0.5 < \Delta t/\Delta z$

Tabla 4.2
Clasificación de la precipitación según su tipo e intensidad. PANDORA asigna un código de 1 a 6 de acuerdo con las clases anteriores. El código se asigna por filas de izqda a dcha. Ej.: 1 = precipitación líquida débil, 2 = precipitación líquida moderada, ..., 6 = nieve de intensidad débil. 0 = no precipitación

Tipo	Tasa de precipitación		
	Débil (<1mm/hora)	Moderada	Intensa (> 10 mm/hora)
Agua	0.79	2.2	4.0
Nive	0.36	1.2	2.3

Tabla 5.1
Relación de estaciones (puntos de muestreo y estaciones virtuales) utilizadas para la generación de campos de viento para el área de estudio correspondiente a la Escala 1

Clave	Punto de muestreo	UTM-X	UTM-Y	Altura (m)
T1_MORA	Torre primaria	288.30	4217.70	391.0
MONTESIN	Arroyo Montesinos	289.50	4216.50	243.0
ALBARAN	Sierra Albarrana	283.60	4220.20	740.0
FUENTE_C	Fuente del Cura	291.70	4215.50	320.0
CERRO_BE	Cerro del Becerro	290.70	4220.70	515.0
BEMBEZAR	Pantano de Bembézar	305.70	4197.50	200.0
T2_BASE	Torre Base	287.80	4216.85	569.0

Tabla 5.2
Relación de estaciones (puntos de muestreo y estaciones virtuales) utilizadas para la generación de campos de viento para el área de estudio correspondiente a la Escala 2

Clave	Punto de muestreo	UTM-X	UTM-Y	Altura (m)
T1_MORA	Torre primaria	288.30	4217.70	391.0
MONTESIN	Arroyo Montesinos	289.50	4216.50	243.0
ALBARAN	Sierra Albarrana	283.60	4220.20	740.0
FUENTE_C	Fuente del Cura	291.70	4215.50	320.0
CERRO_BE	Cerro del Becerro	290.70	4220.70	515.0
BEMBEZAR	Pantano de Bembézar	305.70	4197.50	200.0
T2_BASE	Torre Base	287.80	4216.85	569.0
ALCANTAR	Cerro de Alcántara	310.50	4224.70	878.0
CARDENA_	Cortijo de la Cárdena	271.40	4200.90	892.0

Tabla 5.3
Patrones de viento para velocidades de la Torre Primaria inferiores a 0.4 m/s. Dichos patrones fueron obtenidos en la Fase III del proyecto "Caracterización de procesos atmosféricos en terreno complejo". La asignación de claves de estaciones corresponde a la indicada en la Tabla B-1

Patrón	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Estación	Horas
1	NNE-NE EN	WNW(1)	SSE(4)	WNW(1)	ESE(3)	EN(3)	SSE-S(4) S	P, O	22-9
2	NNW-N NW	WNW NW(1)	SSE(3)	WNW(2)	ESE(3)	NE(3)	SE-SSE-S(3) SSE-S	P, I	22-9
3	SSE	WNW(2)	SSE(4)	WNW(2)	ESE(3)	NE(3)	SE-SSE-S(4)	O, P	22-6

(1) = $V < 0.4$ m/s; (2) = $0.4 \leq V < 1$ m/s; (3) = $1 \leq V < 4$ m/s; (4) = $V \geq 4$ m/s
I = Invierno; P = Primavera; V = Verano; O = Otoño

Tabla 5.4

Patrones de viento para velocidades de la Torre Primaria comprendidas entre 0.4 y 1 m/s. Dichos patrones fueron obtenidos en la Fase III del proyecto "Caracterización de procesos atmosféricos en terreno complejo". La asignación de claves de estaciones corresponde a la indicada en la Tabla B-1

Patrón	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Estación	Horas
1	NW-NNW NNW	WWNW(1)	NNW(4)	NW(2)	NNW(3)	NE(2)	NNW(4) NW	P, O	22-6
2	SE SSE S	WNW (1)	S(3)	NW(2)	SSE(3)	NE(3)	SSE-S(3) SE-SSE-S S-SSW	I, O	22-9
3	NW-N NW-NNW NNW	WNW(1)	SSE(4)	WNW(2)	SE(3)	NE(3)	SSE(4) S SE	I, O	22-9
4	NNW-N-NNE	WNW(1)	NNE(4)	NW(2)	NNW(3)	NE(4)	N-NNE(4) NE	I, V, P	22-9
5	SE-SSE SE	WNW(1)	E(4)	WNW(2)	ESE(3)	NE(3)	E(4) ESE	I, O	7-9
6	NW-NNW-N	WNW(1)	ENE(3)	WNW(2)	WNW(3)	NE(3)	ENE-E(3)	I	22-9

(1) = $V < 0.4$ m/s; (2) = $0.4 \leq V < 1$ m/s; (3) = $1 \leq V < 4$ m/s; (4) = $V \geq 8$ m/s

I = Invierno; P = Primavera; V = Verano; O = Otoño

Tabla 5.5

Patrones de viento para velocidades de la Torre Primaria superiores a 1 m/s. Dichos patrones fueron obtenidos en la Fase III del proyecto "Caracterización de procesos atmosféricos en terreno complejo". La asignación de claves de estaciones corresponde a la indicada en la Tabla B-1

Patrón	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Estación	Horas
1	NNW-NW	WNW(2)	NNW(3)	NW(3)	NW(3)	NNE(2)	NW-NNW(3) W-WNW-NW-N NW(3)	P, V	22-6
2	SE-SSE-S SSE	NSE(1)	S(3)	S(2)	SSE(2)	NNW(1)	SSE-S-SSW SE-SW(3)	O, P	10-18
3	S-SSW-SW SSW	SE(2)	SW(3)	SSE(2)	SSW(3)	NNW(2)	SW(3) SSW	P, V	10-21
4	NW-NNW-N	WNW(1)	N(3)	NW(2)	NNW(2)	NE(2)	N-NNE-NE(3)	I, P	22-6
5	W-WNN WNW WSW	WNW(2)	WSW(3)	WSW(2)	W(2)	NNW(2)	WSW W(3) SW	P	10-6
6	NNE-NE	NW(2)	NE(3)	NE(2)	NE(3)	NE(2)	NE(3)	I, P	10-18

(1) = $V < 0.4$ m/s; (2) = $0.4 \leq V < 1$ m/s; (3) = $1 \leq V < 4$ m/s; (4) = $V \geq 8$ m/s

I = Invierno; P = Primavera; V = Verano; O = Otoño

Tabla 5.6

Equivalencias entre estaciones virtuales y estaciones de referencia. Las equivalencias se usan cuando no es posible la asignación de un patrón característico. Las estaciones T8 y T9 sólo son consideradas cuando se trabaja sobre la Escala 2.

A la estación T6 se le asigna viento de componente N ó S en función de la componente principal de los valores de dirección medidos en la Torre Primaria

Clave	Punto de muestreo	UTM-X
T1	Cerro de los Morales	VV11,DV11
T2	Arroyo Montesinos	VV11,DV11
T3	Sierra Albarrana	VV21,DV21
T4	Fuente del Cura	VV11,DV11
T5	Cerro del Becerro	VV21,DV21
T6	Pantano de Bembézar	N ó S
T7	Torre Base	V21,DV21
T8	Cerro de Alcántara	VV22,DV22
T9	Cortijo de la Cárdena	VV22,DV22

Tabla 7.1
Relación de puntos de control para el área de estudio correspondiente a la Escala 2

Clave	Punto de muestreo	UTM-X	UTM-Y	Altura (m)
T1_MORA	Torre primaria	288.30	4217.70	391.0
MONTESIN	Arroyo Montesinos	289.50	4216.50	243.0
ALBARRAN	Sierra Albarrana	283.60	4220.20	740.0
FUENTE_C	Fuente del Cura	291.70	4215.50	320.0
CERRO_BE	Cerro del Becerro	290.70	4220.70	515.0
BEMBEZAR	Pantano de Bembézar	305.70	4197.50	200.0
T2_BASE	Torre Base	287.80	4216.85	569.0
ALCANTAR	Cerro de Alcántara	310.50	4224.70	878.0
CARDENA_	Cortijo de la Cárdena	271.40	4200.90	892.0
GRANJA_T	Granja de Torrehermosa	273.20	4243.80	575.0
AZUAGA_	Azuaga	265.80	4238.60	550.0
OBEJUNA_	Fuente Obejuna	288.40	4238.60	575.0
PEÑARROY	Peñarroya-Pueblonuevo	301.80	4242.00	560.0
BELMEZ_	Bélmez	307.10	4238.80	530.0
ALANIS_	Alanís	261.80	4214.00	690.0
HORNACHU	Hornachuelos	302.40	4189.40	140.0
NAVAS_CO	Navas de la Concepción	283.40	4201.40	450.0
CONSTANT	Constantina	279.60	4195.40	570.0
PUERTO_P	Puerto de Peñas Rubias	314.60	4215.20	812.0

Tabla 8.1
Valores de los coeficientes a y b utilizados para la estimación potencial de la longitud de Monin-Obukhov, L , mediante la parametrización de Liu, según la expresión:

$$\frac{1}{L} = \alpha z_0^b$$

Clase de estabilidad	a	b
A	-0.08750	-0.1029
B	-0.03849	-0.1714
C	-0.00807	-0.3049
D	0.0	0.0
E	0.00807	0.3049
F/G	0.03849	0.1714

Tabla 10.1
Relaciones entre la escala de medida y el tiempo de tránsito de una parcela de aire sobre un área de estudio de dimensiones determinadas

Escala	Dominio horizontal (km)	Area (km ²)	Espaciado de red	Min. velocidad de la parcela de aire (m/s)	Max. velocidad de la parcela de aire (m/s)
α	2.5	6.25	50 m	1	10
β	25.0	625.0	500 m	5	10
γ	250.0	62.5E+3	5 km	10	50
	2500.0	62.5E+6	50 km	10	50

Tabla 10.2

Distancias teóricas que pueden ser recorridas por una parcela de aire que se mueva con la velocidad constante igual a la indicada en las columnas, durante un tiempo igual al indicado en las filas

Tiempo (hr)	Velocidad (m/s)				
	1	2	5	10	15
1	3.6	10.8	18.0	36.0	54.0
2	7.2	21.6	36.0	72.0	108.0
3	10.8	32.4	54.0	108.0	162.0
4	14.4	43.2	72.0	144.0	216.0
5	18.0	54.0	90.0	180.0	270.0
6	21.6	64.8	108.0	216.0	324.0
10	36.0	108.0	180.0	360.0	540.0

Tabla 10.3

Relación entre los tiempos de integración y los valores de la variable NPH (número de puffs emitidos por hora) incluidos en la versión actual de MESOI

Tiempo de muestreo (min)	Valores de NPH											
	1	2	3	4	5	6	10	12	15	20	30	60
60	•											
30	•	•										
20	•		•									
15	•	•		•								
12	•				•							
10	•	•	•			•						
6	•	•			•		•					
5	•	•	•	•		•		•				
4	•		•		•				•			
3	•	•		•	•		•			•		
2	•	•	•		•	•	•		•		•	
1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

ANEXO 1

ORGANIZACION Y FICHEROS DE LA APLICACION

A1.1 Estructura del directorio de PANDORA

PANDORA necesariamente debe estar instalado en un directorio de la unidad C:, denominado CD4. Su estructura debe ser la siguiente:

Directorio	Descripción
C:\CD4	Directorio de PANDORA.
C:\CD4\DATOS	Directorio donde se encuentra el fichero de datos meteorológicos.
C:\CD4\MAGEN\CONOS	Directorio donde se encuentran los ficheros de iconos de PANDORA (*.ico).
C:\CD4\NFORMES\MODELOS	Directorio donde se recogen los informes producidos por el modelo MESOI.
C:\CD4\NFORMES\CALIDAD	Directorio donde se recogen los resultados del control de calidad.
C:\CD4\MESOC4	Directorio donde se encuentran los modelos y sus ficheros de configuración.
C:\CD4\SISTEMA	Directorio donde se encuentran los programas y los ficheros de configuración de PANDORA.
C:\CD4\SISTEMA\MAPAS	Directorio donde se almacenan los ficheros de mapas utilizados por PANDORA (*.bmp).
C:\CD4\SISTEMA\WRK	Directorio temporal donde PANDORA almacena los ficheros de trabajo.
C:\CD4\ED	Directorio donde se encuentran los programas del editor de textos de PANDORA.

A1.2 Datos de entrada a PANDORA

La entrada de datos en PANDORA se realiza mediante ficheros que contienen la información meteorológica medida en las dos torres instaladas en el emplazamiento.

Dichos ficheros deben contener la información de 48 horas registrada en formato ASCII, y de nombre:

CD4_60.DAT

La plantilla de registro de la información, así como el descriptor Fortran equivalente, se encuentran indicadas en la Tabla A1-2-1.

A1.3 Datos de configuración de PANDORA

A1.3.1 Ficheros de iniciación

PANDORA almacena los parámetros iniciales y los datos de configuración de la última sesión en 8 ficheros de acceso aleatorio con formato de estructura compatible con Microsoft VISUAL BASIC.

La información es almacenada en ficheros que responden al nombre:

INI-*nn*.CD4

donde:

NN	Entero de dos dígitos indicativo del número de fichero de configuración.
01	Clave de acceso.
02	Clave de sistema.
03	Definición de los intervalos de frecuencias.
04	Escala de la última sesión.
05	Configuración de la última sesión de análisis.
06	Configuración por defecto de una sesión de análisis.
07	Configuración de la última sesión de generación de informes.
08	Configuración por defecto para la generación de informes.

A1.3.2 Puntos de control

Puntos de control son aquellos sobre los cuales se desea establecer un control específico de la inmisión. Dichos puntos por lo general deben coincidir con áreas de especial interés, tales como poblaciones y áreas sensibles al impacto de las emisiones. También pueden ser utilizados para contrastar o evaluar los resultados de los modelos (cuando coinciden con puntos de medida, por ejemplo).

La información relativa a los puntos de medida y control es almacenada en ficheros ASCII que responden al nombre:

CKPNT-nn.CD4

donde *nn* es un entero de dos dígitos indicativo de la escala espacial de trabajo. (Ej.: 01, para la escala 1, 02, para la escala 2, etc.).

La plantilla de registro que se utiliza es la indicada en la Tabla A1-3.1-1. Un ejemplo del contenido de dichos ficheros se muestra en la Tabla A1-3.1-2.

A1.3.3 Puntos de medida

Puntos de Medida o muestreo son aquellas localizaciones dentro del área de estudio en las que existen equipos de medida utilizables por la aplicación. Estos puntos coinciden con la posición de las torres de medida reales y virtuales.

La información relativa a los puntos de medida es almacenada en ficheros ASCII que responden al nombre:

ESTAC-nn.CD4

donde *nn* es un entero de dos dígitos indicativo de la escala espacial de trabajo. (Ej.: 01, para la escala 1, 02, para la escala 2, etc.).

La plantilla de registro que se utiliza es la indicada en la Tabla A1-3.2-1. Un ejemplo del contenido de dichos ficheros se muestra en la Tabla A1-3.2-2.

A1.3.4 Área de estudio

El *Área de Estudio* es el dominio espacial al que está referida la herramienta. Su descripción se realiza mediante la identificación de las coordenadas UTM de los vértices de las esquinas que la definen.

La información de escala es almacenada en ficheros ASCII de nombre:

SCALE-nn.CD4

donde *nn* es un índice de escala (Ej.: 01, para la escala 1, 02, para la escala 2, etc.).

La plantilla de registro de la información que es almacenada en dichos ficheros es la descrita en la Tabla A1-3.3-1.

A1.3.5 Ficheros de topografía

Son ficheros ASCII de dos tipos:

TOPOG-nn.CD4

TERRA-nn.CD4

donde *nn* es un índice de escala (Ej.: 01, para la escala 1, 02, para la escala 2, etc.).

Las plantillas de registro se indican en las Tablas A1-3.4-1 y A1-3.4-2.

A1.4 Datos de configuración del modelo MESOI

A1.4.1 INITIAL.MSI

Contiene la información de los parámetros de configuración general que usa el modelo en cada simulación.

La plantilla de registro de la información que es almacenada en dichos ficheros es la descrita en la Tabla A1-4.1-1.

A1.4.2 RELEASES.MSI

Contiene la información de los parámetros de configuración de emisiones que usa el modelo en cada simulación.

La plantilla de registro de la información que es almacenada en dichos ficheros es la descrita en la Tabla A1-4.2-1.

A1.4.3 Descripción de focos emisores

La información de la configuración de la fuente, es almacenada en ficheros ASCII de nombre:

FUENTE-nn.MSI

donde *nn* es un entero de dos dígitos que indica un índice identificador de un foco emisor determinado (Ej.: 01, para la fuente 1, 02, para la fuente 2, etc.).

La plantilla de registro de la información que es almacenada en dichos ficheros es la descrita en la Tabla A1-4.3-1.

A1.5 Datos de configuración del modelo 2DFLOW

El programa utiliza los siguientes ficheros:

- ☐ INPUTT.2DF
Fichero de topografía, similar a los descritos para la aplicación.
- ☐ INPUTW.2DF
Fichero de configuración para los cálculos del campo de vientos.
- ☐ INPUTS.2DF
Fichero de configuración para los cálculos del campo de concentraciones (sin uso en la actualidad).
- ☐ FD.2DF
Fichero de configuración de rutas de acceso para los ficheros de inicialización.

La plantilla de registro del fichero inputW.2df se encuentra descrita en la Tabla A1-5.1-1.

En la versión actual de PANDORA, la ruta de acceso para todos los ficheros de inicialización anteriores es 'C:\CD4\MESOCD4\'. Dicha información está registrada en el fichero FD.2DF.

A1.6 Informes del control de calidad y de concentraciones

A1.6.1 Informes del control de calidad

Los resultados del control de calidad que se realiza al inicio de PANDORA, se almacenan en el directorio de informes de control de calidad (C:\CD4\INFORMES\CALIDAD), y están disponibles en dicho directorio hasta que se inicie una nueva sesión de PANDORA.

Hay dos tipos de ficheros: Los *ficheros de avisos*, que contienen los registros dónde se han producido anomalías, y los *ficheros de resumen*, que almacenan la estadística de ocurrencias de cada aviso.

La información de avisos se almacena en ficheros ASCII de nombre:

QCV-t.nn.EGD

La información de resumen del control de calidad se almacena en ficheros ASCII de nombre:

QC-t.nn.EGD

donde

t: Índice del número de torre, (Ej.: 1, para la torre 1, 2, para la torre 2).

nn: Índice del número de variable, (Ej.: 01, para la variable de velocidad en el nivel 1).

A1.6.2 Informes del modelo

Una sesión de análisis de pandora permite consultar informes de concentraciones horarias.

Si se han consultado los informes del modelo después de una sesión de análisis, se puede disponer de los ficheros de éstos hasta la próxima ejecución de PANDORA, puesto que se limpia el directorio de informes.

El directorio que contiene los ficheros de informes del modelo es C:\CD4\INFORMES\MODELOS.

Los ficheros tienen los siguientes nombres:

- ☐ EXPCUM.TXT
Concentración integrada debida al penacho de uno o varios focos de emisión sin deposición ni decaimiento.
- ☐ AXPDP.L.TXT
Concentración integrada para la especie A, debida a un penacho o grupo de penachos que sufren procesos de deposición o decaimiento.
- ☐ BXPDP.L.TXT
Concentración integrada para la especie B (idem al anterior sólo si hay decaimiento).
- ☐ ADEPOS.TXT
Deposición especie A.
- ☐ BDEPOS.TXT
Deposición especie B (en el caso de que haya decaimiento).

A1.7 Tablas

Tabla A1-2-1
Plantilla de registro de la información almacenada en el fichero CD4_60.DAT

Variable	Descripción	Descriptor
IAÑO	Año del registro	I2.2
IMES	Mes del registro	I2.2
IDIA	Día del registro	I2.2
IHORA	Hora del registro	I2
IMINUTO	Minuto del registro	I2
VV11	Velocidad del viento en la torre 1 nivel 1	F5.1
DV11	Dirección del viento en la torre 1 nivel 1	F5.1
ST11	Desviación estándar de la dirección del viento en la torre 1 nivel 1	F5.1
VVR11	Velocidad del viento redundante en la torre 1 nivel 1	F5.1
DVR11	Dirección del viento redundante en la torre 1 nivel 1	F5.1
STR11	Desviación estándar redundante de la dirección del viento en la torre 1 nivel 1	F5.1
T11	Temperatura en la torre 1 nivel 1	F5.1
DT121	Gradiente de temperatura en la torre 1	F5.1
DTR121	Gradiente redundante de temperatura en la torre 1 nivel 1	F5.1
HR11	Humedad relativa en la torre 1 nivel 1	F5.1
PR10	Precipitación	F5.1
RS10	Radiación solar	F5.3
EST121	Estabilidad	I1
VV21	Velocidad del viento en la torre 2 nivel 1	F5.1
DV21	Dirección del viento en la torre 2 nivel 1	F5.1
ST21	Desviación estándar de la dirección del viento en la torre 2 nivel 1	F5.1
VV22	Velocidad del viento en la torre 2 nivel 2	F5.1
DV22	Dirección del viento en la torre 2 nivel 2	F5.1
ST22	Desviación estándar de la dirección del viento en la torre 2 nivel 2	F5.1
T21	Temperatura en la torre 2 nivel 1	F5.1

Tabla A1-3.1-1
Plantilla de registro de la información almacenada en el fichero CKPNT-nn.CD4
Primer registro

Variable	Tipo
Límite 1	Real
Límite 2	Real

n registros siguientes:

Variable	Tipo
UTM-X	Real
UTM-Y	Real
Altura	Real
Estado	Entero
Clave	Alfanumérico
Comentario	Alfanumérico

Tabla A1-3.1-2
Ejemplo del contenido de los ficheros de puntos de control

Límite 1	Límite 2				
1,0E-15	1,0E-10				
UTM-X	UTM-Y	Altura (m)	Estado	Clave	Comentario
288.30	4217.70	391	1	T1__MORA	Torre primaria Cerro de los Morales
289.50	4216.50	243	1	MONTESIN	Arroyo Montesinos
283.60	4220.20	740	0	ALBARRAN	Sierra Albarrana
291.70	4215.50	320	0	FUENTE_C	Fuente del Cura
290.70	4220.70	515	1	CERRO_BE	Cerro del Becerro
305.70	4197.50	200	1	BEMBEZAR	Pantano de Bembézar
287.80	4216.85	569	1	T2__BASE	Torre Secundaria (antigua Torre Base)
310.50	4224.70	878	0	ALCANTAR	Cerro de Alcantara
271.40	4200.90	892	0	CARDENA_	Cortijo de la Cardena
265.90	4238.60	550	0	AZUAGA__	Azuaga (10.290 hab.)
273.20	4243.80	575	0	GRANJA_T	Granja de Torrehermosa (2.969 hab.)
288.40	4238.60	575	0	OBEJUNA_	Fuente Obejuna (6951 hab.)
201.80	4242.00	560	0	PEÑARROY	Peñarroya-Pueblonuevo (14.174 hab.)
307.10	4238.80	530	0	BELMEZ__	Bélmez (4656 hab.)
261.80	4214.00	690	0	ALANIS__	Alanis (2.267 hab.)
302.40	4189.40	140	0	HORNACHU	Hornachuelos (5.427 hab.)
283.40	4201.40	450	0	NAVAS CO	Navas de la Concepción (2.155 hab.)
279.60	4195.40	570	0	CONSTANT	Constantina (7.935 hab.)
314.60	4215.20	812	0	PUERTO_P	Puerto de Peñas Rubias

Tabla A1-3.2-1
Plantilla de registro de la información almacenada en el fichero ESTAC-nn.CD4

Variable	Tipo
UTM-X	Real
UTM-Y	Real
Altura	Real
Estado	Entero
Clave	Alfanumérico
Comentario	Alfanumérico

Tabla A1-3.2-2
Ejemplo de relación de puntos de medida

UTM-X	UTM-Y	Altura (m)	Estado	Clave	Comentario
288.30	4217.70	391	0	T1_MORA	Torre primaria Cerro de los Morales
289.50	4216.50	243	0	MONTESIN	Arroyo Montesinos
283.60	4220.20	740	0	ALBARRAN	Sierra Albarrana
291.70	4215.50	320	0	FUENTE_C	Fuente del Cura
290.70	4220.70	515	0	CERRO_BE	Cerro del Becerro
305.70	4197.50	200	0	BEMBEZAR	Pantano de Bembézar
287.80	4216.85	569	0	T2_BASE	Torre Secundaria (antigua Torre Base)
310.50	4224.70	878	0	ALCANTAR	Cerro de Alcantara
271.40	4200.90	892	0	CARDENA_	Cortijo de la Cardena

Tabla A1-3.3-1
Plantilla de registro de la información almacenada en el fichero SCALE-nn.CD4
Primer registro

Variable	Tipo
Nº de celdas x	Entero
Nº de celdas y	Entero
Delta x	Real
Delta y	Real

Cuatro registros siguientes:

Variable	Tipo
Nodo x	Entero
Nodo y	Entero
UTM-X	Real
UTM-Y	Real

Tabla A1-3.4-1
Plantilla de registro de la información almacenada en el fichero TOPOG-nn.CD4
Primer registro

Variable	Tipo
Nº de celdas x	Entero
Nº de celdas y	Entero
Delta x	Real
Delta y	Real

Segundo registro (sólo para el fichero INPUTT.2DF DE 2DFLOW):

Variable	Tipo
UTM-X del origen de coordenadas	Real
UTM-Y del origen de coordenadas	Real
Angulo de orientación de la rejilla respecto de la referencia UTM	Real

31 registros siguientes:

Se registran los valores de altura sobre el nivel del mar de cada uno de los nodos de la rejilla de concentraciones. El primer registro corresponde a la fila 31. Los valores se leen de izqda a dcha, desde 1 hasta 31. El formato de registro para cada valor es de tipo entero.

Tabla A1-3.4-2
Plantilla de registro de la información almacenada en el fichero TERRA-nn.CD4

Variable	Tipo
Indice de nodo X en coordenadas de rejilla de vientos	Entero
Indice de nodo Y en coordenadas de rejilla de vientos	Entero
Orientación del obstáculo, en grados desde la línea W-E	Real
Coefficiente de ladera Oeste, de 0.0 a 1.0	Real
Coefficiente de ladera Este, de 0.0 a 1.0	Real

Tabla A1-4.1-1
Plantilla de registro de la información almacenada en el fichero INITIAL.MSI

Variable	Descripción	Tipo
TIT	Título	Alfanumérico
NPH	Número de puffs por hora	Entero
DTA	Tiempos de integración	Tabla 12 enteros
NSIA	Nº de intervalos de integración	Tabla 12 enteros
CHIMIN	Límite de concentración mínima	Real
VD	Velocidad de deposición	Real
VC	Tabla de coeficientes de "washout"	Tabla 6 reales
INTFLG	Datos cada bora	Lógica
IMO	Mes de inicio de simulación	Entero
IDAY	Día de inicio de simulación	Entero
IYR	Año de inicio de simulación	Entero
STHR	Hora de inicio de simulación	Entero
ALPHFL, ALPHAU, ALPHAV	Flag de interpolación vertical Factor de interpolación vertical	3 enteros

Tabla A1-4.2-1
Plantilla de registro de la información almacenada en el fichero RELEASES.MSI

Variable	Descripción	Tipo
NSOURC	Número de fuentes	Entero
LDPHLG	Deposición	Lógico
LDCFLG	Decaimiento	Lógico
HLIFA	Vida media especie A	Entero
HLIFB	Vida media especie B	Entero

Tabla A1-4.3 -1
Plantilla de registro de la información almacenada en el fichero FUENTEEnn.MSI

Variable	Descripción	Tipo
X	Distancia X al centro de la rejilla, en km	Real
Y	Distancia Y al centro de la rejilla, en km	Real
Z	Altura de emisión, en m	Real
IMO	Mes de inicio de emisión	Entero
IDAY	Día de inicio de emisión	Entero
IYR	Año de inicio de emisión	Entero
IHR	Hora de inicio de emisión	Entero
IMN	Minuto de inicio de emisión	Entero
IHRSIM	Horas de emisión	Entero
IMNSIM	Minutos de emisión	Entero
FLGTE	¿Tasa de emisión conocida?	Lógico
TE	Tasa de emisión	Real
FLGPR	Sobre-elevación	Lógico
TG	Temperatura de emisión de los gases	Real
VF	Flujo volumétrico de salida	Real

Tabla A1-4.1-1
Plantilla de registro de la información almacenada en el fichero INPUTW.2DF

Variable	Descripción	Tipo
IHORASIM	Hora de simulación inicial	Entero
SLST	Hora local de inicio	Entero
THRS	Duración	Real
.TPRT	Tiempo entre salidas de resultados en minutos	Real
IMIN	Sin uso	Entero
JMIN	Sin uso	Entero
IMAX	Sin uso	Entero
JMAX	Sin uso	Entero
DELT	Paso de integración en s	Real
UA	Componente U del viento a 10 m. de altura	Real
VA	Componente V del viento a 10 m. de altura	Real
UG	Componente U del viento geostrófico	Real
VG	Componente V del viento geostrófico	Real
HI	Espesor inicial de la capa de derrame	Real
TDDAY	Superavit diurno de temperatura	Real
TDNGT	Déficit nocturno de temperatura	Real
EF	Coefficiente de <i>entrainment</i>	Real
CVRG	Coefficiente fraccional de cubierta de vegetación	Real
HMIN	Espesor mínimo de la capa de derrame	Real
HMAX	Espesor máximo de la capa de derrame	Real
CAS	Coefficiente de arrastre por vegetación	Real
CD	Coefficiente de arrastre superficial	Real
TAR	Temperatura de referencia (°K)	Real

PUBLICACIONES TECNICAS

1991

- 01 REVISION SOBRE LOS MODELOS NUMERICOS RELACIONADOS CON EL ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS.
- 02 REVISION SOBRE LOS MODELOS NUMERICOS RELACIONADOS CON EL ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS.
ANEXO 1. Guía de códigos aplicables.
- 03 PRELIMINARY SOLUBILITY STUDIES OF URANIUM DIOXIDE UNDER THE CONDITIONS EXPECTED IN A SALINE REPOSITORY.
- 04 GEOESTADISTICA PARA EL ANALISIS DE RIESGOS. Una introducción a la Geoestadística no paramétrica.
- 05 SITUACIONES SINOPTICAS Y CAMPOS DE VIENTOS ASOCIADOS EN "EL CABRIL".
- 06 PARAMETERS, METHODOLOGIES AND PRIORITIES OF SITE SELECTION FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL IN ROCK SALT FORMATIONS.

1992

- 01 STATE OF THE ART REPORT: DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE IN DEEP ARGILLACEOUS FORMATIONS.
- 02 ESTUDIO DE LA INFILTRACION A TRAVES DE LA COBERTERA DE LA FUA.
- 03 SPANISH PARTICIPATION IN THE INTERNATIONAL INTRAVAL PROJECT.
- 04 CARACTERIZACION DE ESMECTITAS MAGNESICAS DE LA CUENCA DE MADRID COMO MATERIALES DE SELLADO.
Ensayos de alteración hidrotermal.
- 05 SOLUBILITY STUDIES OF URANIUM DIOXIDE UNDER THE CONDITIONS EXPECTED IN A SALINE REPOSITORY. Phase II
- 06 REVISION DE METODOS GEOFISICOS APPLICABLES AL ESTUDIO Y CARACTERIZACION DE EMPLAZAMIENTOS PARA ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD EN GRANITOS, SALES Y ARCILLAS.
- 07 COEFICIENTES DE DISTRIBUCION ENTRE RADIONUCLEIDOS.
- 08 CONTRIBUTION BY CTN-UPM TO THE PSACON LEVEL-5 EXERCISE.
- 09 DESARROLLO DE UN MODELO DE RESUSPENSION DE SUELOS CONTAMINADOS. APLICACION AL AREA DE PALOMARES.
- 10 ESTUDIO DEL CODIGO FFSM PARA CAMPO LEJANO. IMPLANTACION EN VAX.
- 11 LA EVALUACION DE LA SEGURIDAD DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS. UTILIZACION DE METODOS PROBABILISTAS.
- 12 METODOLOGIA CANADIENSE DE EVALUACION DE LA SEGURIDAD DE LOS ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS RADIATIVOS.
- 13 DESCRIPCION DE LA BASE DE DATOS WALKER.

1993

- 01 INVESTIGACION DE BENTONITAS COMO MATERIALES DE SELLADO PARA ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD. ZONA DE CABO DE GATA, ALMERIA.

- 02 TEMPERATURA DISTRIBUTION IN A HYPOTHETICAL SPENT NUCLEAR FUEL REPOSITORY IN A SALT DOME.
- 03 ANALISIS DEL CONTENIDO EN AGUA EN FORMACIONES SALINAS. Su aplicación al almacenamiento de residuos radiactivos
- 04 SPANISH PARTICIPATION IN THE HAW PROJECT. Laboratory Investigations on Gamma Irradiation Effects in Rock Salt.
- 05 CARACTERIZACION Y VALIDACION INDUSTRIAL DE MATERIALES ARCILLOSOS COMO BARRERA DE INGENIERIA.
- 06 CHEMISTRY OF URANIUM IN BRINES RELATED TO THE SPENT FUEL DISPOSAL IN A SALT REPOSITORY (I).
- 07 SIMULACION TERMICA DEL ALMACENAMIENTO EN GALERIA-TSS.
- 08 PROGRAMAS COMPLEMENTARIOS PARA EL ANALISIS ESTOCASTICO DEL TRANSPORTE DE RADIONUCLEIDOS.
- 09 PROGRAMAS PARA EL CALCULO DE PERMEABILIDADES DE BLOQUE.
- 10 METHODS AND RESULTS OF THE INVESTIGATION OF THE THERMOMECHANICAL BEHAVIOUR OF ROCK SALT WITH REGARD TO THE FINAL DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES.

1994

- 01 MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DE LOS ECOSISTEMAS EN EL ENTORNO DE LA FABRICA DE URANIO DE ANDUJAR.
- 02 CORROSION OF CANDIDATE MATERIALS FOR CANISTER APPLICATIONS IN ROCK SALT FORMATIONS.
- 03 STOCHASTIC MODELING OF GROUNDWATER TRAVEL TIMES
- 04 THE DISPOSAL OF HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE IN ARGILLACEOUS HOST ROCKS. Identification of parameters, constraints and geological assessment priorities.
- 05 EL OESTE DE EUROPA Y LA PENINSULA IBERICA DESDE HACE -120.000 AÑOS HASTA EL PRESENTE. Isostasia glaciaria, paleogeografías y paleotemperaturas.
- 06 ECOLOGIA EN LOS SISTEMAS ACUATICOS EN EL ENTORNO DE EL CABRIL.
- 07 ALMACENAMIENTO GEOLOGICO PROFUNDO DE RESIDUOS RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD (AGP). Conceptos preliminares de referencia.
- 08 UNIDADES MOVILES PARA CARACTERIZACION HIDROGEOQUIMICA
- 09 EXPERIENCIAS PRELIMINARES DE MIGRACION DE RADIONUCLEIDOS CON MATERIALES GRANITICOS. EL BERROCAL, ESPAÑA.
- 10 ESTUDIOS DE DESEQUILIBRIOS ISOTOPICOS DE SERIES RADIATIVAS NATURALES EN UN AMBIENTE GRANITICO: PLUTON DE EL BERROCAL (TOLEDO).
- 11 RELACION ENTRE PARAMETROS GEOFISICOS E HIDROGEOLOGICOS. Una revisión de literatura.
- 12 DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA COBERTURA MULTICAPA DEL DIQUE DE ESTERILES DE LA FABRICA DE URANIO DE ANDUJAR.

1995

-
- 01 DETERMINACION DEL MODULO DE ELASTICIDAD DE FORMACIONES ARCILLOSAS PROFUNDAS.
- 02 *UO₂ LEACHING AND RADIONUCLIDE RELEASE MODELLING UNDER HIGH AND LOW IONIC STRENGTH SOLUTION AND OXIDATION CONDITIONS.*
- 03 THERMO-HYDRO-MECHANICAL CHARACTERIZATION OF THE SPANISH REFERENCE CLAY MATERIAL FOR ENGINEERED BARRIER FOR GRANITE AND CLAY HLW REPOSITORY: LABORATORY AND SMALL MOCK UP TESTING.
- 04 DOCUMENTO DE SINTESIS DE LA ASISTENCIA GEOTECNICA AL DISEÑO AGP-ARCILLA. Concepto de referencia.
- 05 DETERMINACION DE LA ENERGIA ACUMULADA EN LAS ROCAS SALINAS FUERTEMENTE IRRADIADAS MEDIANTE TECNICAS DE TERMOLUMINISCENCIA. Aplicación al análisis de repositorios de residuos radiactivos de alta actividad.
- 06 PREDICCIÓN DE FENOMENOS DE TRANSPORTE EN CAMPO PRÓXIMO Y LEJANO. Interacción en fases sólidas.
- 07 ASPECTOS RELACIONADOS CON LA PROTECCIÓN RADIOLOGICA DURANTE EL DESMANTELAMIENTO Y CLAUSURA DE LA FABRICA DE ANDUJAR.
- 08 ANALYSIS OF GAS GENERATION MECHANISMS IN UNDERGROUND RADIOACTIVE WASTE REPOSITORIES. (Pegase Project).
- 09 ENSAYOS DE LIXIVIACION DE EMISORES BETA PUROS DE LARGA VIDA.
- 10 2º PLAN DE I+D. DESARROLLOS METODOLOGICOS, TECNOLOGICOS, INSTRUMENTALES Y NUMERICOS EN LA GESTION DE RESIDUOS RADIATIVOS.
- 11 PROYECTO AGP-ALMACENAMIENTO GEOLOGICO PROFUNDO. FASE 2.
- 12 IN SITU INVESTIGATION OF THE LONG-TERM SEALING SYSTEM AS COMPONENT OF DAM CONSTRUCTION (DAM PROJECT). Numerical simulator: Code-Bright

PUBLICACIONES NO PERIODICAS

1992

PONENCIAS E INFORMES, 1988-1991.
SEGUNDO PLAN DE I+D, 1991-1995. TOMOS I, II Y III.
SECOND RESEARCH AND DEVELOPMENT PLAN, 1991-1995, VOLUME I.

1993

SEGUNDO PLAN DE I+D. INFORME ANUAL 1992.
PRIMERAS JORNADAS DE I+D EN LA GESTION DE RESIDUOS RADIATIVOS. TOMOS I Y II.

1994

SEGUNDO PLAN I+D 1991-1995. INFORME ANUAL 1993.

1995

TERCER PLAN DE I+D 1995-1999.
SEGUNDAS JORNADAS DE I+D. EN LA GESTION DE RESIDUOS RADIATIVOS. TOMOS I Y II.

Edita:

enresa

empresa nacional de residuos radiactivos, s.a.

Diseño y coordinación editorial: TransEdit

Imprime: L & J DUQUE, s.l.

ISSN: 1134-380X

D.L.: M-11668-1996

Marzo de 1996