

Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera

TÍTULO:

**ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PRODUCIDA  
POR UN COMPLEJO INDUSTRIAL**

Tesista: María Laura Mayol

Directora: Ana Graciela Ulke

Co-Directora: María Isabel Gassmann

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

Año 2008



## ÍNDICE

RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	6
2. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA	11
2.1 Introducción	11
2.2 Estructura y Evolución de la Capa Límite Atmosférica	12
2.2.1 Características de la Capa Mezclada y dispersión de contaminantes	13
2.2.2 Características de la Capa Residual y dispersión de contaminantes	14
2.2.3 Características de la Capa Límite Estable y dispersión de contaminantes	15
2.3 Emisiones y dispersión de contaminantes en la atmósfera	17
2.3.1 Emisiones	19
2.3.2 Efectos de la Atmósfera	22
a) Turbulencia	22
b) Estabilidad	23
c) Efecto del viento en la difusión y el transporte	26
d) Procesos de transformación de contaminantes	28
e) Procesos de remoción de contaminantes	30
2.4 Modelado de la dispersión de contaminantes: modelos eulerianos y lagrangeanos	31
3. CLIMATOLOGÍA DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN EL AIRE DE LA CIUDAD DE BUENOS AIRES Y SUS ALREDEDORES	34
3.1 Antecedentes	34
3.2 Viento: intensidad y dirección	35
3.3 Estabilidad atmosférica	36
3.4 Altura de la capa límite atmosférica	37
3.5 Ventilación	37
4. ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA DE DOCK SUD (Pdo. De Avellaneda, Pcia. de Buenos Aires)	39
4.1 Introducción	39
4.2 Descripción del Complejo Industrial	39
4.3 Ubicación de las estaciones de monitoreo	42
4.4 Contaminantes muestreados: Características sobresalientes de la calidad del aire en Dock Sud	43
5. APLICACIÓN DEL MODELO CALPUFF	46
5.1 Descripción de submódulos del CALPUFF	46
5.1.1 Módulo Topografía y Uso de suelo	46
5.1.2 Módulo Preprocesador Meteorológico CALMET	48
5.1.3 Módulo modelo de dispersión CALPUFF	53
5.1.4 Módulo Post-procesador de los campos de concentraciones	57
5.2 Casos de estudio	57
5.2.1 Selección de casos de estudio	57
5.2.2 Campos meteorológicos obtenidos de BRAMS	58
5.2.3 Datos observados en estaciones SMN	61
5.3 Fuentes de Emisión	62
6. RESULTADOS	66
6.1 Estudio de Caso día 23 de Noviembre del 2001	66
6.1.1 Análisis de la situación sinóptica	66
6.1.2 Simulación de la dispersión de contaminantes	78
6.2 Estudio de Caso día 15 de Enero del 2002	90
6.2.1 Análisis de la situación sinóptica	90
6.2.2 Simulación de la dispersión de contaminantes	100
CONCLUSIONES	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis directoras de este trabajo de tesis por haberme dado la oportunidad de trabajar junto a ellas, por estar a mi lado no solo para brindarme sus conocimientos, sino también para darme ánimo cuando las cosas no salían como uno quería. Sin ellas nada de esto hubiese sido posible.

A la Universidad de Buenos Aires, en particular al Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, por permitirme crecer tanto a nivel personal como académico.

A mi familia, por brindarme su apoyo incondicional, por acompañarme durante todos estos años de carrera, por no permitirme nunca bajar los brazos. Para ellos sólo tengo palabras de agradecimiento, porque con el sólo hecho de saber que estaban ahí me dieron la fuerza y la confianza necesarias para llegar hasta acá.

A mis amigos, por estar siempre a mi lado. Por ser mi cable a tierra.

A mis compañeros y amigos, a la Banda de Meteo, a los que todavía están y a los que quedaron en el camino, porque de no ser por ellos yo no estaría escribiendo estas líneas. Porque hicieron que estos años fueran inolvidables para mí. Gracias por tantos buenos momentos compartidos juntos.

A todos los que de alguna manera me ayudaron y acompañaron en este camino...

Gracias!

**Agradecimientos a instituciones:**

Se agradece al SMN por los datos meteorológicos y al NCEP por los resultados de los distintos modelos utilizados. Se agradece el soporte financiero de los proyectos UBACYT X283 y UBACYT X170 que proveyeron la infraestructura para realizar las corridas del CALPUFF y el proyecto ANPCyT 07-14420 la infraestructura para correr BRAMS.

## **RESUMEN**

El objetivo principal del presente trabajo es el de estudiar el aporte a la contaminación del aire de las emisiones de un complejo industrial emplazado al sudeste del Área Metropolitana de Buenos Aires. La concreción de este objetivo involucra la implementación y evaluación de un sistema acoplado de modelado meteorológico y de dispersión de contaminantes. El modelo de dispersión proporciona una estimación cuantitativa de las concentraciones de contaminantes así como también su distribución espacial y su variación con el tiempo. Las concentraciones obtenidas se comparan con mediciones de calidad de aire a fin de evaluar el desempeño del sistema de modelado. El estudio propuesto reviste importancia dada la posibilidad de impacto a escala local o urbana por la proximidad de la fuente a una megaciudad. Plantea la utilización de un avanzado sistema de modelado, el cual, mediante representaciones adecuadas de los procesos y mecanismos relevantes en la dispersión de contaminantes, permite la obtención de mejores estimaciones de las concentraciones y sus posibles efectos.

## **1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES**

A nivel mundial se observa una tendencia a la concentración de personas en centros urbanos, debido a las oportunidades de mejoras económicas y culturales. Entre los impactos de las megaciudades está la contaminación atmosférica (Molina y Molina, 2004). Los efectos de los contaminantes abarcan desde aquéllos en la salud e impactos sobre vegetación, materiales y propiedades de la atmósfera hasta los relacionados con el cambio global (Seinfeld y Pandis, 1998).

La distribución espacial de los contaminantes en el aire y su variación temporal dependen de las condiciones meteorológicas durante las cuales se realiza la emisión y su estadía en la atmósfera. La naturaleza del terreno (elevación, tipo y uso del suelo) es también un determinante de las características del flujo.

Los modelos permiten analizar resultados a partir de la integración de conocimiento y ayudan a establecer áreas en las cuales es necesario reforzar la investigación para generar nuevos desarrollos. Además son herramientas útiles para el diseño de políticas y para el manejo adecuado de los recursos. En particular, los modelos de calidad del aire posibilitan el cálculo de las concentraciones, conocidas las emisiones, las condiciones atmosféricas y la topo-geografía del lugar. Se aplican al estudio de la calidad del aire, análisis de episodios de contaminación, diseño de estrategias de mitigación, optimización de inventarios de emisiones o predicción de concentraciones (Gallardo y otros, 2002, Freitas y otros, 2005, Rodríguez y otros, 2007).

La ciudad de Buenos Aires, junto con el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) se encuentra emplazada sobre la margen derecha del Río de la Plata. La extensión (3880 km<sup>2</sup>) y población (aproximadamente 13 millones de habitantes) del AMBA determinan que sea la región urbana de Argentina con mayor cantidad de emisiones. El AMBA experimenta una expansión y aumento demográfico sostenido. Las emisiones de fuentes móviles y fijas (principalmente plantas de generación de energía eléctrica e industrias), producen el deterioro de la calidad del aire en la zona (World Bank, 1997, Bogo y otros, 2003).

Monitoreos realizados en períodos cortos en la ciudad de Buenos Aires encontraron que las concentraciones de ciertos contaminantes exceden en determinadas condiciones las normas de calidad de aire de la ciudad de Buenos Aires y de la Provincia de Buenos Aires (Onursal y Gautam, 1997, Bogo y otros, 1999, 2001). En el área de jurisdicción provincial del AMBA no se realiza un monitoreo continuo de contaminantes y en general, los datos provenientes de las

pocas mediciones realizadas no se encuentran disponibles. Un estudio efectuado en San Miguel, en la zona oeste-noroeste del AMBA por Fagundez y otros (2001), comprendió el monitoreo de la calidad del aire utilizando la metodología de los tubos pasivos. Se midió el material particulado total en suspensión y algunos gases. Se encontraron variaciones en la concentración de material particulado total en suspensión entre  $0,257$  y  $0,033 \text{ mg cm}^{-2} \text{ mes}^{-1}$ , con una distribución espacial similar a la del  $\text{NO}_2$ . El  $\text{SO}_2$  tuvo en general valores bajos y bastante homogéneos.

Dentro de la ciudad de Buenos Aires hay dos estaciones meteorológicas y en el AMBA hay cinco, de las cuales tres se ubican en la zona norte, una en la zona noroeste y una en la zona sudoeste, quedando así la región sur desprovista de observaciones. Las estaciones pertenecen a la red del Servicio Meteorológico Nacional. La densidad de edificios en la ciudad no es uniforme y por lo tanto, la cantidad de estaciones meteorológicas no es óptima para obtener información adecuada de los campos de las variables meteorológicas relevantes (velocidad y dirección de viento, temperatura, humedad, precipitación) dentro del AMBA. Además, existe una única estación que realiza mediciones de altura ubicada en el entorno del AMBA. Esta es una estación sinóptica localizada aproximadamente a 30 km de la ciudad, en una zona que podría calificarse como representativa de área rural.

La brisa de río-tierra, favorece las condiciones de ventilación en las áreas cercanas a la costa dentro de la ciudad de Buenos Aires, aunque también puede producir recirculaciones de contaminantes. En un período anual, la frecuencia de ocurrencia de direcciones de viento desde el río hacia la ciudad es del 52% y la velocidad del viento en superficie es inferior a los 4 m/s en un 55% de las ocasiones (Mazzeo y Venegas, 2004). Se han realizado algunos estudios climatológicos acerca de las características de la ventilación en la ciudad, los cuales han determinado que existen elevadas frecuencias de ocurrencia de condiciones adversas para la dispersión de los contaminantes (Gassmann y Mazzeo, 2000, Ulke y Mazzeo, 1998, Ulke, 2000, 2004) especialmente durante los meses de invierno.

La intensidad de la isla de calor urbana fue estudiada desde el punto de vista climatológico por Camilloni y Barros (1994), Camilloni y Mazzeo (1987), Camilloni (1995) y Figuerola y Mazzeo (1998), entre otros. Estos últimos autores encuentran que la diferencia máxima de temperatura en la ciudad de Buenos Aires con respecto a las zonas rurales es de  $4,6^\circ \text{ C}$  con vientos débiles, mientras que con vientos intensos disminuye a  $3,6^\circ \text{ C}$ . Observan diferencias entre los días laborales y los fines de semana (diferencias de  $1^\circ \text{ C}$ ) y que además en el 20% de los casos analizados se da el efecto inverso de isla, es decir que la ciudad está más fresca que el entorno. También se han realizado estudios para determinar la ubicación y características

del frente de brisa en la ciudad. Mazzeo y Gassmann (1991), encuentran que el frente de brisa se ubicaría generalmente entre las estaciones meteorológicas Observatorio Central Buenos Aires y Ezeiza Aero del Servicio Meteorológico Nacional. Estos estudios darían indicios de co-localización de máximos de concentración de contaminantes.

Las emisiones locales en la ciudad de Buenos Aires, son las originadas en el intenso tránsito automotor e industrias, las que se encuentran localizadas en su mayor parte en la zona sur, lindante con el conurbano. En la zona costera se ubican también tres grandes centrales termoeléctricas. Entre los aportes a escala regional se destaca el transporte a grandes distancias de los productos de la quema de biomasa durante las temporadas secas de distintas regiones de Sudamérica. Estos tienen una región preferencial de salida hacia el Atlántico, pasando por el noreste de Argentina, Paraguay y sur del Brasil (Freitas y Silva Dias, 1995).

Según Gassmann (1998) y Gassmann y Mazzeo (2000), la región noreste de Argentina tiene capacidad de dispersión atmosférica reducida. Gassmann y Ulke (2008) estudiaron un caso de transporte de cenizas producidas en la quema de pastizales en el delta del Paraná que afectó la ciudad de Buenos Aires y algunos municipios del AMBA. Longo y otros (2006) han analizado el aumento en la carga de aerosoles en la atmósfera de la ciudad de Buenos Aires por productos de quema de biomasa en Sudamérica.

Las emisiones de complejos industriales comprenden una diversidad de partículas y gases dependiendo de cada proceso. En este trabajo se estudiarán los efectos producidos por el complejo industrial conformado por el Polo Petroquímico Dock Sud, que se encuentra al sudeste del AMBA, cerca del Río de la Plata. Dada la localización del complejo y del AMBA, la variedad de fenómenos meteorológicos anteriormente mencionados (capas límites internas, la isla urbana de calor, la circulación de brisa río-tierra, el pasaje de frentes o condiciones con dominio de un sistema anticiclónico) pueden modular las concentraciones resultantes.

La aplicación de sistemas acoplados de modelos meteorológicos y de dispersión es una metodología avanzada en el modelado de la calidad del aire (Russell y Dennis, 2000, Seaman, 2000, Schmitz, 2005). Los campos meteorológicos son los que determinan las características de transporte y dispersión turbulenta, las condiciones de remoción de los contaminantes de la atmósfera e intervienen en las reacciones químicas. En particular, la aplicación de modelos de pronóstico de alta resolución permite representar la mayor parte de los procesos capaces de modular la dispersión de contaminantes en una megaciudad como Buenos Aires.

Existen numerosos modelos de dispersión disponibles para utilizar en estudios de calidad del aire. Entre ellos se encuentra el modelo CALPUFF (Scire y otros, 2000) que en realidad es un paquete de programas conformado por un preprocesador de información meteorológica

que genera campos para transportar y dispersar los contaminantes (CALMET), un modelo de dispersión propiamente dicho (CALPUFF) y un posprocesador (CALPOST) que permite presentar las concentraciones en diversas escalas espaciales y temporales. Del mismo modo, existen numerosos modelos de pronóstico del tiempo que permiten generar campos que servirán como datos de entrada para el preprocesador meteorológico del CALPUFF. Entre ellos se encuentran el WRF (sus siglas en inglés: Weather Research and Forecasting) (Skamarock y otros, 2005) y el RAMS (sus siglas en inglés: Regional Atmospheric Modeling System) (Pielke y otros, 1992, Cotton y otros, 2003). El uso acoplado de modelos de predicción del tiempo con modelos de calidad de aire permite utilizar al sistema de modelado en la previsión de la calidad de aire (modo pronóstico) característica que reviste utilidad tanto en situaciones “normales” de emisiones como para el caso de eventos o accidentes de contaminación.

En este trabajo, se utiliza el modelo atmosférico regional BRAMS (sus siglas en inglés: Brazilian developments of the Regional Atmospheric Modeling System) acoplado con el modelo de dispersión CALPUFF, en dos estudios de caso y para dos configuraciones de entrada de información meteorológica. Se evalúan los resultados del sistema de modelado mediante la comparación con datos observacionales de calidad de aire.

*El objetivo principal del presente trabajo de Tesis fue el de implementar y aplicar un sistema de modelado de calidad del aire para determinar las concentraciones de contaminantes debidas a las emisiones de un complejo industrial y estudiar su posible impacto sobre zonas urbanas cercanas. Además se plantea la necesidad de explorar la habilidad de este sistema a fin de ser aplicado en modo pronóstico. Esto es, cuando se proporciona a un modelo de calidad de aire campos meteorológicos que provienen de un modelo atmosférico de previsión de alta resolución, se convierte en una herramienta de utilidad para aplicarse en la predicción de las concentraciones de contaminantes e identificación de períodos con calidad del aire más comprometida y zonas vulnerables.*

*Para ello, se cumplieron los objetivos específicos de analizar el desempeño del modelo atmosférico BRAMS en la estimación de variables de relevancia en los procesos de transporte y dispersión de los contaminantes en la atmósfera para, posteriormente, evaluar el desempeño del modelo de dispersión CALPUFF en la determinación de las concentraciones de contaminantes en el aire.*

Los modelos avanzados de dispersión son herramientas de mucha utilidad en el estudio y gestión de calidad del aire. No reemplazan a los datos observacionales, pero una vez determinado su desempeño satisfactorio, permiten analizar el impacto de diferentes factores en forma sistemática y consistente físicamente. La no-linealidad de los procesos impone que la herramienta utilizada para representar los mecanismos físicos sea lo más realista y adecuada posible. Es también necesario un balance entre un determinado grado de complejidad y sofisticación y los costos computacionales.

El sistema de modelado implementado posibilita incluir los últimos avances en el grado de conocimiento. Permite incorporar las variaciones espaciales y temporales del flujo y la influencia del terreno. También es de importancia que incluya reacciones químicas. Al no suponer condiciones estacionarias ni homogéneas, representa ciclos diurnos, capas límites internas, islas de calor urbana, en forma realista. De este modo, se espera que las concentraciones estimadas sean más representativas.

Es la primera vez que se encara en Argentina el uso de dos sistemas de modelado acoplados (un modelo atmosférico de alta resolución y un modelo de dispersión). Constituye una evolución en el grado de conocimiento sobre el desempeño de un sistema avanzado de modelado atmosférico y de contaminantes en la mesoscala atmosférica en el país. La investigación es de especial interés ya que el complejo industrial se encuentra dentro del Área Metropolitana de Buenos Aires, el mayor conglomerado urbano del país.

El período seleccionado abarca desde Octubre de 2001 a Enero de 2002 debido a la disponibilidad de datos de entrada y para evaluar el modelo de dispersión. Se cuenta con datos meteorológicos de superficie observados en un sitio cercano al complejo industrial y mediciones de concentraciones en cuatro puntos.

Se ejecuta BRAMS en un dominio que abarca el AMBA, Río de la Plata y zonas aledañas. Los datos topogeográficos son los disponibles en mejor resolución para Argentina. Con los campos meteorológicos y la información geofísica y emisiones se ejecuta CALPUFF. El dominio es determinado acorde al de BRAMS.

Para evaluar el desempeño de BRAMS y de CALPUFF se compara las variables modeladas con los datos. Se analiza el grado de representación de las condiciones atmosféricas y estudia los patrones de transporte y dispersión y su influencia en las concentraciones.

## **2. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN LA ATMÓSFERA**

### **2.1 Introducción**

Los contaminantes del aire son sustancias que, una vez presentes en la atmósfera en determinadas concentraciones, pueden resultar perjudiciales para los humanos, animales o vida vegetal, como así también para las propiedades, o interferir con su bienestar.

Los contaminantes pueden ser gases o partículas. Entre estos últimos se consideran tanto las partículas sólidas como las líquidas. A su vez se los clasifica como primarios y secundarios. Los primeros son aquellos que son emitidos por las fuentes y el efecto lo produce el mismo contaminante. Los contaminantes secundarios son los que se generan por reacciones químicas o fotoquímicas en la atmósfera a partir de los primarios.

El problema de la dispersión de los contaminantes en la atmósfera involucra a tres componentes: primero las fuentes de emisión, luego los receptores y entre uno y otro el medio que servirá de nexo entre ambos, que es la atmósfera. Las fuentes de emisión pueden clasificarse como antropogénicas o naturales. Las primeras se subdividen a su vez en fuentes móviles (automóviles, transporte público, aviones) o fijas (industrias, fuentes domésticas). Entre las segundas puede mencionarse las erupciones volcánicas, la vegetación, el suelo y las regiones oceánicas. Los receptores serán aquellos afectados por la contaminación, que como se mencionara previamente, pueden considerarse a los humanos, la vegetación, los animales o los bienes de las personas.

Dos factores principales determinan la cantidad de contaminación en un lugar, ellos son: la naturaleza de las emisiones y el estado de la atmósfera. Las emisiones ( $Q$ ) indican la tasa de descarga a la atmósfera de la masa de un contaminante desde una fuente en la unidad de tiempo. Para describir el estado de la atmósfera es necesario determinar el estado del flujo en los niveles que la atmósfera influye sobre la evolución de la nube de contaminantes. En general, estos niveles se encuentran dentro de la capa límite atmosférica. Esta capa es la que contiene alrededor del diez por ciento de la masa de la atmósfera y en la que las propiedades del flujo están determinadas por la influencia de la dinámica de la atmósfera libre y por la fricción aerodinámica entre la atmósfera y la superficie adyacente, pero también por la estratificación térmica del aire resultante de las diferencias entre la temperatura de la superficie y del aire. Una de las características distintivas de esta capa de la atmósfera es que el flujo se encuentra mayormente en estado turbulento. Los torbellinos turbulentos de naturaleza cuasi-estocástica intervendrán favoreciendo en mayor o menor medida a la

dispersión y dilución de los contaminantes en la atmósfera. La capa límite de la atmósfera responde a forzantes de la superficie en una escala temporal de alrededor de una hora o menos (Stull, 1988).

## 2.2 Estructura y Evolución de la Capa Límite Atmosférica

La Capa Límite Atmosférica (CLA) tiende a ser generalmente más alta en regiones de baja presión que en regiones de alta presión (Fig. 2.1). La subsidencia por encima del tope de la CLA y la divergencia de niveles bajos asociadas a los sistemas de alta presión desplazan el aire dentro de ella desde las regiones de alta presión hacia las regiones de baja presión. En éstas últimas, la convergencia en niveles bajos y los movimientos verticales ascendentes llevan el aire de la capa límite hasta grandes alturas a través de la tropósfera. En estas condiciones resulta difícil definir el tope de la CLA y en general, para su estudio, es usual considerar que este tope se encuentra en la base de las nubes.

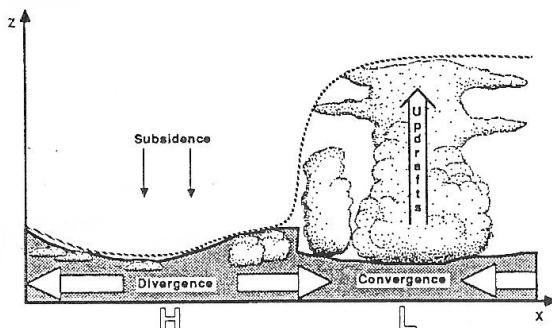


Figura 2.1: Esquema de la variación del espesor, en escala sinóptica, de una capa límite entre dos centros de baja (B) y alta (A) presión en superficie. La línea punteada muestra la máxima altura alcanzada por el aire modificado de superficie durante un período de una hora. La línea sólida encierra la región sombreada, la cual es mayormente estudiada por los meteorólogos de capa límite (de Stull, pág. 9).

Con sistemas de alta presión ubicados sobre el continente la CLA presenta una estructura bien definida que evoluciona con un ciclo diurno (Fig. 2.2) en respuesta a los forzantes de superficie. Las tres componentes principales de esta estructura son la capa mezclada, la capa residual y la capa límite estable.

Se denomina capa de superficie al espesor de aire en la parte inferior de la capa límite en donde los flujos turbulentos varían menos de un 10% con la altura respecto de su valor en superficie. Muy cerca de la superficie existe una subcapa laminar, cuyo espesor es del orden de cm y representa la última capa física de la atmósfera antes de alcanzar la superficie y en donde los transportes moleculares son el único mecanismo responsable de las transferencias de propiedades entre la superficie terrestre y la atmósfera.

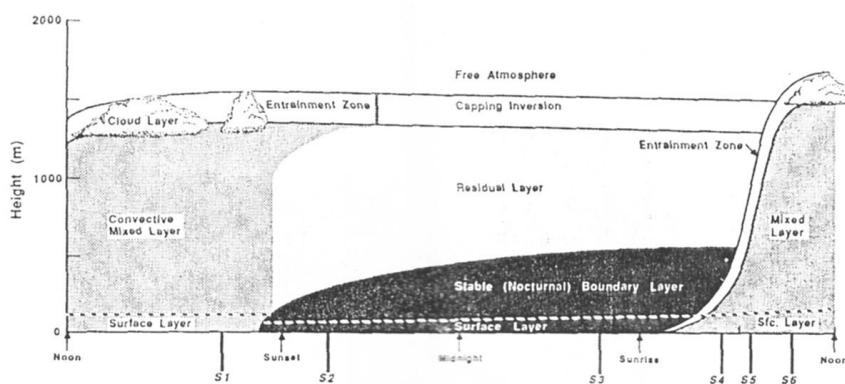


Figura 2.2: La capa límite en regiones de alta presión sobre una superficie continental está compuesta de tres partes principales: una capa mezclada muy turbulenta, una capa residual menos turbulenta que contiene la capa mezclada formada previamente y una capa límite nocturna estable que presenta turbulencia esporádica (de Stull, pág. 11).

### 2.2.1 Características de la Capa Mezclada y dispersión de contaminantes

La turbulencia en la capa mezclada está usualmente determinada por movimientos convectivos. El origen de estos movimientos incluye la transferencia de calor desde una superficie caliente, y/o el enfriamiento radiativo desde el tope de una capa nubosa. La primera situación crea “térmicas” de aire caliente que ascienden desde superficie siguiendo un proceso de expansión adiabático hasta alcanzar una capa estable que limita su movimiento vertical, mientras que la segunda crea “térmicas” de aire frío que descienden desde el tope de la nube siguiendo un proceso de compresión adiabático.

Aún cuando la convección es el mecanismo dominante para estos tipos de capa límite, se produce una cortante de viento en la capa de superficie y a través de la base de la capa mezclada que contribuyen a la generación de turbulencia mecánica.

En días con cielo despejado, el crecimiento de la capa mezclada está íntimamente ligado al calentamiento radiativo de la superficie. Comenzando alrededor de media hora después del amanecer, el espesor de la capa mezclada turbulenta comienza a crecer. Esta capa se caracteriza por una intensa mezcla en condiciones estáticamente inestables en las que las térmicas de aire caliente ascienden desde superficie (Fig. 2.3). La capa mezclada alcanza su profundidad máxima en las primeras horas de la tarde. Esta capa crece por el ingreso de aire menos turbulento que se encuentra por encima, y que una vez dentro de esta capa se mezcla con el aire de la capa límite debido a su estado turbulento.

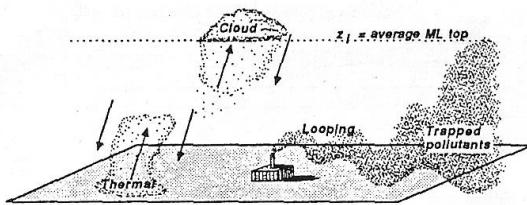


Figura 2.3: Idealización de las térmicas en una capa mezclada. Las plumas de contaminantes serpenteante de arriba hacia abajo en una capa mezclada y eventualmente pueden presentarse uniformemente distribuidas (de Stull, pág. 12).

La turbulencia resultante tiende a mezclar uniformemente calor, humedad y cantidad de movimiento en la vertical. Las plumas de contaminantes exhiben un movimiento característico describiendo meandros con ramas de ascenso y descenso con extensión vertical importante (Fig. 2.3) dentro de esta capa. Los contaminantes son transportados por los torbellinos más grandes y energéticos dentro del espectro turbulento, como pueden ser las térmicas. Debido a que el tope de la capa mezclada linda con una capa estable (atmósfera libre) existe una incapacidad de las térmicas de penetrar muy profundamente en la capa estable y por lo tanto ésta actúa como una “tapa” para la dispersión de contaminantes en la vertical. Es muy común en regiones de alta presión que los contaminantes queden atrapados debajo de una “capa de inversión” determinada por la subsidencia en niveles altos asociada a estos sistemas.

#### *2.2.2 Características de la Capa Residual y dispersión de contaminantes*

Alrededor de media hora antes del atardecer las térmicas dejan de formarse, produciendo un decaimiento de la turbulencia en la capa mezclada. La capa de aire resultante es llamada

usualmente Capa Residual (CR) y debe su nombre a que es el remanente de la turbulencia generada durante el período diurno y no es considerada capa límite, ya que su dinámica no responde a los forzantes de la superficie terrestre, de la cual se encuentra desacoplada.

Por ejemplo, en ausencia de advección, los trazadores pasivos dispersados durante el día dentro de la capa mezclada permanecerán dentro de la CR durante la noche. Los contaminantes no pasivos pueden reaccionar con otros durante la noche, creando o destruyendo especies. La CR posee una estratificación de tipo neutral, resultando en turbulencia isotrópica. Debido a ello, las plumas de contaminantes emitidas dentro de la CR tienden a dispersarse de manera similar en la dirección vertical y en la horizontal, creando una pluma en forma de cono (parte superior de la Fig 2.4).

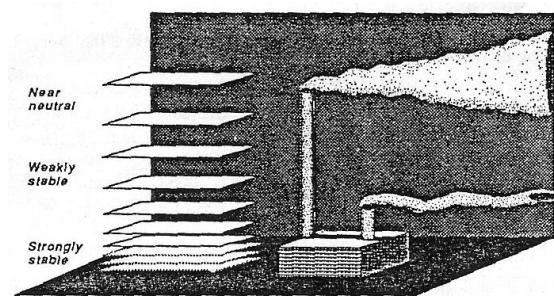


Figura 2.4: La estabilidad estática disminuye gradualmente con la altura en la capa límite nocturna, fundiéndose en una capa residual neutralmente estratificada, como está indicado en las superficies isoentrópicas de la izquierda. Las emisiones dentro del aire estable se difunden en la horizontal con una débil dispersión en la vertical. Las emisiones en la capa residual se dispersan con una tasa similar en la horizontal y en la vertical, otorgándole a la pluma de contaminantes una forma de cono (de Stull, pág 14).

Frecuentemente, la capa residual subsiste durante un período en la mañana antes de fundirse dentro de la nueva capa mezclada. En este lapso, la radiación solar puede disparar reacciones fotoquímicas entre los contaminantes que se encuentran allí.

### *2.2.3 Características de la Capa Límite Estable y dispersión de contaminantes*

A medida que la noche progresá, la porción inferior de la capa residual se transforma por su contacto con la superficie en una Capa Límite Estable (CLE). Ésta se encuentra caracterizada por aire estáticamente estable y una turbulencia esporádica de origen mecánico.

A pesar de que el viento a nivel del suelo es frecuentemente débil o nulo por la noche, el viento por encima puede acelerarse incluso a velocidades supergeostróficas en un fenómeno que se conoce como corriente en chorro de capas bajas. La altura típica de estos máximos de la velocidad del viento es de 300 a 400 m y generalmente determinan el tope de la CLE. El aire estáticamente estable tiende a suprimir la turbulencia, mientras que la corriente en chorro nocturna y las cortantes de viento que la acompañan tienden a generar turbulencia, debido a la inestabilidad dinámica. Como resultado, la turbulencia ocurre esporádicamente en explosiones de relativamente corta duración que causan mezcla a través de la CLE. Esta capa tiene un tope no muy bien definido que se desvanece suavemente dentro de la capa residual (Fig. 2.4). Usualmente, el tope de la CLE se define como el tope de la capa estable, o la altura donde la intensidad de la turbulencia es una pequeña fracción de su valor en superficie.

Los contaminantes emitidos dentro de la CLE se dispersan levemente en la vertical y más efectivamente en la horizontal. Este comportamiento se conoce como dispersión en forma de abanico y se muestra en la pluma en la parte inferior de la Figura 2.4. A veces, en noches de vientos débiles el efluente describe meandros en la horizontal mientras es transportado por el viento. La pluma de contaminantes en la capa residual puede dispersarse al punto donde la parte inferior de la pluma toca el tope de la CLE. La fuerte estabilidad estática de esta capa y la frecuente reducción de la turbulencia reduce la mezcla hacia abajo dentro de la CLE. El tope de la pluma continúa ascendiendo dentro del aire neutral de la CR. Esto se conoce como pluma elevada (Fig. 2.5).

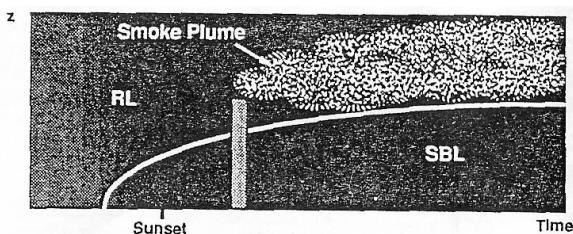


Figura 2.5: El efecto de pluma elevada ocurre cuando el tope de la pluma crece hacia arriba en la capa de aire neutral mientras que su parte inferior está delimitado por una capa estable (de Stull, pág 18).

Luego del amanecer una nueva capa mezclada comienza a crecer, alcanzando eventualmente la altura de la pluma elevada de la noche anterior. A esta altura, los contaminantes que se encuentran en niveles elevados se mezclan hacia el suelo mediante la

mezcla entre el aire de la CR y la nueva capa mezclada. La turbulencia en la capa mezclada favorece el transporte de los contaminantes hacia la superficie en un proceso que se conoce como fumigación (Fig. 2.6).

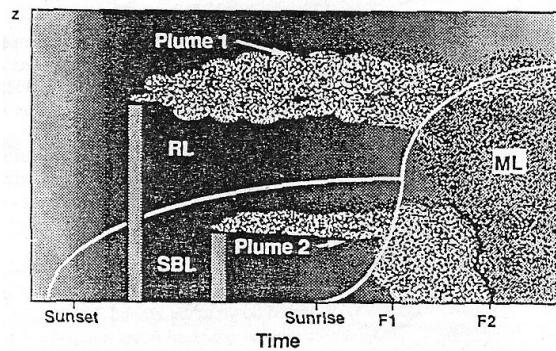


Figura 2.6: Esquema del proceso de fumigación, donde una capa mezclada en crecimiento se encuentra con plumas de contaminantes elevadas y los transportan hacia la superficie (de Stull, pág 18).

Un fenómeno análogo se produce cerca de las costas donde plumas elevadas, dentro de aire estable o neutral, corriente arriba de la costa son fumigadas al ser advectadas sobre una superficie más caliente que produce el crecimiento de una capa límite interna térmica.

### 2.3 Emisiones y dispersión de contaminantes en la atmósfera

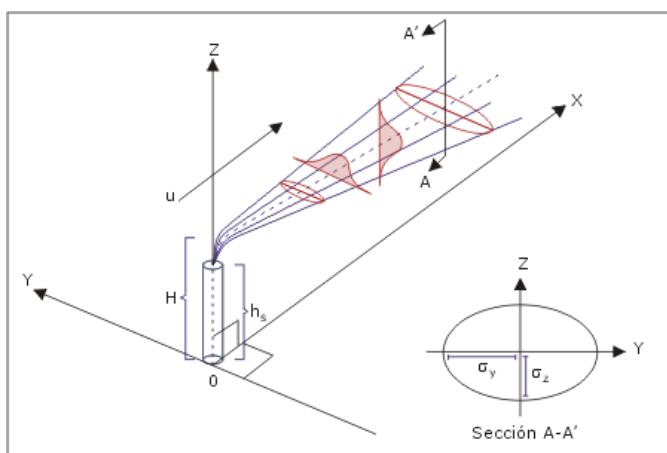
En el esquema (Fig 2.7) se muestra la relación entre las emisiones y los receptores, considerando a la atmósfera como el medio entre ambos. En los problemas de contaminación atmosférica, en primer lugar se estudia el ingreso de los contaminantes a la atmósfera y luego se consideran los mecanismos que gobiernan la dispersión, transformación y la eventual remoción de los contaminantes del aire. Por último se observa el efecto de las concentraciones sobre los receptores.



Figura 2.7: Relación entre las emisiones y los receptores, utilizando como medio a la atmósfera (adaptado de Oke, 1978 ).

Ciertas características de las emisiones son relevantes para determinar la contaminación resultante. Entre ellas se encuentra la tasa de emisión y la naturaleza física y química de los contaminantes. Pero por otro lado, es importante además conocer el tipo de fuente, el área de emisión, la duración de las descargas y la altura a la cual ocurre la inyección de los contaminantes (altura efectiva de emisión). Esta altura puede ser determinada a partir de información de la velocidad de salida y temperatura del efluente y el agregado de algunas características del estado del flujo atmosférico.

La Figura 2.8 ilustra la altura efectiva de emisión para el caso de una fuente puntual elevada. También se esquematiza la distribución ideal de la concentración del contaminante en las direcciones transversales a la de desplazamiento, con el máximo en el centro de la pluma.



$H$ : Altura efectiva de emisión

$h_s$ : Altura de la fuente

Figura 2.8: Pluma de contaminantes emitidos desde una fuente puntual elevada fija.

En relación a la componente atmosférica del proceso de la contaminación del aire, la estratificación térmica es importante porque define la estabilidad de la atmósfera y ésta, a su vez, controla la intensidad de la turbulencia y la altura de la capa límite. El movimiento del aire y la estabilidad de la atmósfera regulan la dispersión de los contaminantes en la vertical y la tasa de mezcla con el aire limpio. El campo de viento es crítico con respecto a la dispersión horizontal en la capa límite. La velocidad del viento determina tanto la distancia de transporte de los contaminantes a sotavento de la fuente como la dilución del contaminante. La intensidad del viento, en combinación con la rugosidad de la superficie establece la intensidad de la turbulencia mecánica. La dirección del viento es importante porque definirá la trayectoria general que seguirán los contaminantes, y su variabilidad determinará la extensión de la pluma en la dirección transversal a su eje, o dicho en otros términos, su dispersión.

Una vez suspendidos en la atmósfera, los contaminantes pueden experimentar transformaciones físicas y/o químicas. Estos cambios están relacionados con parámetros meteorológicos como la temperatura del aire, la intensidad de la radiación solar, la existencia de vapor de agua o gotas y la presencia o ausencia de ciertas sustancias en la atmósfera. De la misma forma, la eventual remoción de contaminantes por acción de procesos relacionados con la precipitación, por depósito gravitacional, o por adsorción e impacto sobre diferentes tipos de superficie, están vinculados con el estado de la atmósfera.

Es importante destacar que incluso si las emisiones para un área dada se mantuviesen constantes, la calidad del aire podría exhibir un amplio rango de configuraciones distintas. La variabilidad es introducida por los constantes cambios en el estado del tiempo que en consecuencia modifican la habilidad de la atmósfera para transportar, diluir, transformar y remover contaminantes. Generalmente, la atmósfera posee una gran capacidad para dispersar, pero en ciertos momentos y lugares esta facilidad puede verse comprometida. Bajo estas condiciones la contaminación del aire puede causar serios problemas en los receptores.

### *2.3.1 Emisiones*

A pesar de ser una trivialidad, es importante destacar que si no hay fuentes no hay emisiones, y en este caso no hay contaminación. Esto no significa que todas las emisiones son dañinas, de hecho debería tenerse en cuenta que la mayoría de las emisiones naturales son esenciales para mantener la vida (oxígeno, dióxido de carbono, compuestos de nitrógeno) y

que es, sólo cuando su concentración se vuelve muy alta que pueden ser clasificadas como contaminantes.

La legislación de la ciudad de Buenos Aires define como Nivel Guía o Estándar de Calidad de Aire *a los límites máximos legales correspondientes a concentraciones de contaminantes en el aire, durante un período de tiempo dado, con el fin de proteger en particular la salud humana. Debajo de estos límites no se producen efectos sobre la salud humana y el hecho de sobrepasar un valor límite no significa que habrá efectos directos sobre la salud sino que podría haberlos.*

Estas normas de calidad de aire, en particular la de la Provincia y la de la ciudad de Buenos Aires (Decreto 3395/06 de la Ley 5965 y 198/06 de la Ley 1356, respectivamente), se refieren a los principales contaminantes primarios (PM10, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, Pb) y el principal secundario (O<sub>3</sub>).

Por otro lado se define como Límite Máximo de Emisión a *la cantidad de contaminante permisible de ser liberado a la atmósfera. Los límites máximos son establecidos en función del contaminante, la clasificación de los usos pretendidos para diversas áreas afectadas por la emisión y dispersión de estos, y los niveles de calidad de aire pretendidos para esas áreas.*

Si bien la ciudad de Buenos Aires no tiene establecidos aún Límites de Emisión, la Provincia cuenta con Niveles Guía de Emisión para el ácido sulfúrico, amoníaco, cianuro de hidrógeno y cianuro, cloro, cloruro de hidrógeno, dióxido de azufre, fluoruro de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, trióxido de azufre, material particulado total, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

#### *Características de los principales contaminantes atmosféricos*

**Compuestos de azufre:** El azufre ingresa a la atmósfera en distintas formas especialmente como los gases dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) pero también como sulfuros y ácido sulfúrico y como sales sulfatadas en las partículas en suspensión conocidas como material particulado. Las emisiones naturales de los óxidos de azufre provienen principalmente de las erupciones volcánicas. En las emisiones de azufre antropogénicas, la de SO<sub>2</sub> es la más significativa, y se da principalmente como producto remanente de la combustión de combustibles que contienen azufre.

**Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>):** Las emisiones naturales de compuestos de nitrógeno provienen de la descomposición de materia orgánica en el suelo y en el océano. La mayoría de

las emisiones antropogénicas se originan en la combustión de combustibles bajo presión y calor resultando en la fijación del nitrógeno que compone el aire y del oxígeno para formar óxido de nitrógeno (NO), que es relativamente un gas menos dañino. Sin embargo, en la atmósfera el NO se oxida rápidamente dando lugar al dióxido de nitrógeno que es un gas más perjudicial. Las principales fuentes de óxidos de nitrógeno son los vehículos, la quema de carbón y gas natural y las fábricas de fertilizantes y explosivos.

**Óxidos de carbono:** El monóxido de carbono (CO) se produce durante cualquier combustión incompleta de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que contengan material carbonoso. Las fuentes naturales son relativamente pocas (erupciones volcánicas e incendios forestales) y la mayor fuente antropogénica es la combustión interna de los motores. Por lo tanto las emisiones se concentran a lo largo de autopistas y en calles con alto índice de tránsito vehicular.

**Hidrocarburos:** La mayoría de los hidrocarburos atmosféricos se originan de la descomposición natural de la vegetación. A pesar de que las emisiones antropogénicas son mucho menores que las naturales, la producción es muy importante porque además de ser potencialmente dañinos para la vegetación y los seres humanos, son compuestos altamente reactivos y pueden fácilmente formar “smog” fotoquímico. A nivel antropogénico los hidrocarburos son producidos en la combustión de combustibles fósiles, y en emisiones evaporativas de combustibles.

**Material particulado en suspensión (PM10):** Son partículas sólidas o líquidas con diámetro menor a 10  $\mu\text{m}$ , y que permanecen suspendidas durante un largo tiempo (de días a semanas). Los procesos de formación pueden ser aerosoles (mezcla heterogénea de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas) naturales o artificiales y pueden estar constituidos por distintos tipos de sustancias. Generalmente, existe una fracción inorgánica, compuesta por sulfatos, nitratos, hierro y plomo y una fracción orgánica, constituida por hidrocarburos aromáticos policíclicos. Alrededor del 90% de todas las partículas de la atmósfera son derivadas de fuentes naturales (erosión, incendios forestales, erupciones volcánicas, aerosol marino). Las fuentes antropogénicas se encuentran principalmente asociadas con procesos de combustión (quema de carbón y aceite domésticamente y en plantas generadoras de energía), actividades industriales, quema de residuos y emisión de los automotores.

**Ozono:** El ozono es un contaminante secundario que se produce por reacciones fotoquímicas en presencia de luz solar. Es el contaminante secundario más importante. Los contaminantes primarios que son precursores para la formación de ozono son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los compuestos orgánicos volátiles (hidrocarburos) (COVs). El ozono es un oxidante muy fuerte, capaz de atacar superficies, construcciones y otros materiales. Perjudica cosechas y bosques, dando lugar a grandes pérdidas económicas. Además es un contaminante que produce un serio problema para la salud pública.

### 2.3.2 Efectos de la Atmósfera

#### a) Turbulencia

El movimiento turbulento en la CLA es generado por la interacción entre el flujo atmosférico y la superficie terrestre. En particular, existen dos mecanismos distintos capaces de producir turbulencia dentro de la CLA: la diferencia de temperatura entre el suelo y la capa de aire por encima de él, la cual es responsable de un flujo de calor sensible entre la superficie y la atmósfera y la fricción entre el aire y la superficie, que ocasiona que la velocidad del viento disminuya en general con la altura cerca de la superficie y esta cortante origina un flujo de cantidad de movimiento entre el aire y la superficie. La combinación de estos dos mecanismos, llamados forzantes térmicos y mecánicos respectivamente, genera movimientos irregulares del aire los cuales son representados como torbellinos turbulentos. Estos torbellinos presentan un rango de tamaños que va desde los pocos milímetros al espesor de toda la capa límite (1-2 km).

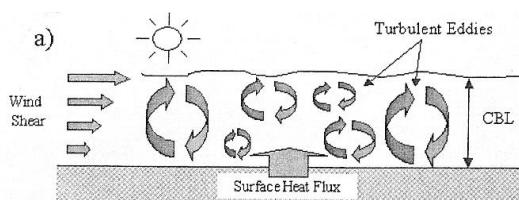


Figura 2.9: Ilustración esquemática de los mecanismos principales para la producción de la turbulencia en la CLA (de Dosio, 2005).

La Figura 2.10 ilustra la relación entre el tamaño de los torbellinos turbulentos y su eficiencia en la dilución de la concentración de los contaminantes o mezcla entre el material emitido que conforma una pluma de contaminantes y el aire limpio del entorno. Cuando una pluma de contaminantes es emitida dentro de la CLA, su estructura, forma y evolución están determinadas por dicha interacción. En particular los torbellinos que son mucho mayores en tamaño que la pluma, causan el “meandro”, que es el movimiento de mayor escala de la pluma como un todo, y el cambio de posición en la vertical de su centro de masa. Los torbellinos turbulentos que son mucho menores en tamaño que la pluma, por el contrario, son principalmente responsables del crecimiento instantáneo del espesor de la misma, debido a que generan el ingreso de aire dentro del cuerpo de la pluma y su consiguiente dilución, con la disminución de la concentración.

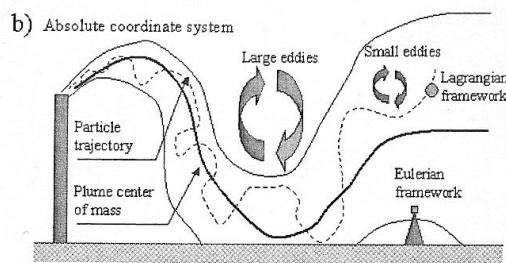


Figura 2.10. Representación idealizada de una pluma dispersándose en la CLA. Se encuentran ilustrados los diferentes efectos de los pequeños y grandes torbellinos en la evolución de la pluma (de Dosio, 2005).

#### *b) Estabilidad*

Los movimientos verticales de los contaminantes en la CLA se encuentran principalmente controlados por las condiciones de estabilidad prevalecientes, y por lo tanto por la estratificación térmica. Desde el punto de vista de la convección las mejores condiciones para la dispersión de contaminantes usualmente se dan cuando se tiene una fuerte inestabilidad estática y una capa mezclada profunda. Esta inestabilidad es característica en días soleados y especialmente en el verano. La convección es un mecanismo importante para difundir materiales en un volumen grande, y la profundidad de la capa mezclada determina el límite vertical para la dimensión de este volumen. Contrariamente, las peores condiciones para la dispersión ocurren cuando existe una inversión térmica y la capa límite es estable. La turbulencia se ve inhibida o sea que el movimiento turbulento tiende a suprimirse.

Existen diferentes formas de estimar la estabilidad dentro de la capa límite de la atmósfera, desde las más simples como las clases de estabilidad de Pasquill hasta las más complejas que presuponen la estimación de la longitud de Monin-Obukhov. La metodología depende esencialmente de la información disponible para determinar las condiciones de estabilidad, aunque debe en todos los casos representar el efecto de los mecanismos que generan o consumen energía turbulenta. De acuerdo a Pasquill (Pasquill y Smith, 1983) lo ideal es contar con estimaciones de la intensidad de la turbulencia, las cuales pueden relacionarse con las variaciones en las dimensiones características de la pluma, pero como en general no se dispone de estas mediciones, se utilizan formas alternativas.

Pasquill (1961) propuso una clasificación para determinar las condiciones de estabilidad en función de observaciones convencionales y dividió a la estabilidad en siete clases distintas que van desde marcada inestabilidad (A) hasta moderada estabilidad (F). Las diferentes clases de estabilidad se estiman en función de la velocidad del viento a 10 m y las condiciones diurnas de radiación solar o las condiciones nocturnas de nubosidad (Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Clases de estabilidad de Pasquill en función del la intensidad del viento y la radiación.

Velocidad del viento (m/s)	Condiciones diurnas Radiación solar			Condiciones nocturnas Nubosidad	
	Fuerte	Moderada	Débil	$\geq 4/8$	$\leq 3/8$
< 2	A	A - B	B	---	---
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Si bien esta clasificación de la estabilidad es útil para estimar algunos parámetros de la capa límite de la atmósfera cuando sólo se dispone de información meteorológica convencional, ella es una aproximación y como tal introducirá un error en los cálculos.

Es posible determinar la estabilidad a través del número de Richardson (Stull, 1988), el cual expresa la relación entre la producción de turbulencia por procesos de índole mecánica y

la producción/destrucción de turbulencia por procesos de índole térmica. Se define al número de Richardson en forma de flujo como:

$$R_f = \frac{(g/T_0)\overline{w'T'}}{\overline{u'w'}\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}}$$

donde  $g$  es la gravedad terrestre,  $T_0$  es la temperatura media en la capa de aire estudiada,  $\overline{w'T'}$  es proporcional al flujo vertical turbulento de calor sensible,  $\overline{u'w'}$  es proporcional al flujo vertical turbulento de cantidad de movimiento y  $\partial \bar{u} / \partial z$  es la cortante del viento medio. El término del divisor representa la transferencia de energía cinética del flujo medio al flujo turbulento y es de signo negativo. El numerador tiene signo positivo cuando la superficie está más caliente que el aire y negativo cuando está más fría que el aire. Por lo tanto,  $R_f$  permite determinar y cuantificar las condiciones de estabilidad.

De este modo,

$$\text{Si } \begin{cases} R_f > 0 & \text{estable} \\ R_f \approx 0 & \text{neutral} \\ R_f < 0 & \text{inestable} \end{cases}$$

Cabe destacar que cuando  $0 < R_f < 1$  la atmósfera es estable pero sigue siendo turbulenta, debido a la inestabilidad de origen dinámico.

Por otro lado, si se define a la velocidad característica (o velocidad de fricción) como

$$u_* = \sqrt{-\overline{u'w'}} \text{ y a la longitud de Monin-Obukhov como } L = \frac{-u_{*}^3}{\frac{g}{T_0} k \overline{w'T'}}, \text{ entonces se tiene:}$$

$$\begin{cases} L^{-1} > 0 & \text{estable} \\ L^{-1} \approx 0 & \text{neutral} \\ L^{-1} < 0 & \text{inestable} \end{cases}$$

Sin embargo, tanto para la determinación de  $R_f$  como de  $L$ , es preciso contar con mediciones que permitan calcular las covarianzas entre las perturbaciones turbulentas y se

plantea similar dificultad a la mencionada antes respecto a la determinación de la intensidad de la turbulencia.

### c) Efecto del viento en la difusión y el transporte

El movimiento atmosférico sirve tanto para difundir como para transportar el aire con contaminantes. Si el tamaño de los torbellinos es menor al de la pluma o nube de contaminantes éstos van a difundirla; si el tamaño es mayor entonces la transportarán.

Cuando el aire está en movimiento, los contaminantes son difundidos tanto en la dirección del viento como en la dirección perpendicular y vertical a él. En la Figura 2.11 se observa que para mayores intensidades de viento la concentración por unidad de volumen de aire deberá ser menor. Este es el concepto de dilución en la dirección a lo largo del viento que está directamente relacionado con su velocidad.

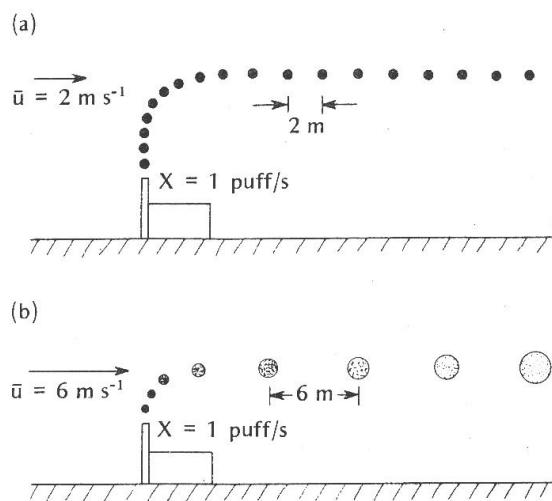


Figura 2.11: El efecto de la velocidad del viento sobre la concentración de los contaminantes. En ambos casos la tasa de emisión ( $X$ ) es de 1 “puff” por segundo, pero en (a) la velocidad del viento ( $\bar{u}$ ) es de 2 m/s, mientras que en (b) es de 6 m/s (de Oke, pág 279).

La velocidad del viento también gobierna la intensidad de la convección forzada generada en la capa límite tanto por la cortante interna entre dos capas de aire, como por la cortante

interna entre la capa de aire y los elementos rugosos de la superficie (es decir, la turbulencia mecánica). Mayor velocidad implica mayor actividad turbulenta. Los torbellinos generados de esta forma son característicamente pequeños y su acción en la pluma es la de diluirla producto de una rápida mezcla turbulenta con el aire limpio que la rodea (ello se ilustra en la Fig. 2.11 con el tamaño del “puff” y su coloración).

La dirección del viento es también importante en el transporte del efluente. La dirección determina la trayectoria seguida por los contaminantes luego de su emisión. Desde el punto de vista del receptor, ésta podría significar la diferencia entre una alta concentración de contaminantes o una concentración nula. A veces, una dirección particular de viento podría implicar la entrada de múltiples contaminantes debido a un alineamiento coincidente de las plumas correspondientes a varias fuentes. Este problema podría agravarse si se acumulan contaminantes que reaccionan entre sí dando lugar al desarrollo de contaminantes secundarios a sotavento de las fuentes de emisión.

Además de dispersar, el viento es también responsable de la distancia de transporte. Bajo condiciones de vientos intensos, el efluente puede ser transportado grandes distancias pero la concentración será más baja, de modo que produce relativamente pocas consecuencias. La mayor situación de contaminación potencial se dará entonces cuando existan vientos débiles, debido a que tanto el transporte horizontal como la difusión turbulenta estarán reducidos.

Los sistemas de circulación local (como brisas de mar y tierra, vientos de valle y de montaña y vientos de ciudad) no producen una reducción efectiva de la contaminación por tres razones. Primero, la velocidad de estas brisas es usualmente baja (menor a 7 m/s); segundo, son sistemas de circulación cerrados y tercero, exhiben, en general, una reversión diurna en la dirección del viento. Localidades dentro de una zona de circulación cerrada conducirán a una recirculación de los contaminantes y a un progresivo incremento de la contaminación a lo largo del tiempo. El sistema de viento generado por el mayor calentamiento de los núcleos urbanos, es particularmente peligroso porque el sistema está completamente auto-contenido sobre un área densamente poblada de fuentes. El flujo en capas bajas converge al centro térmico de la ciudad desde todas las direcciones, asciende, diverge por encima y luego se mueve hacia fuera para descender sobre el límite urbano/rural y reingresar nuevamente hacia el interior de la ciudad.

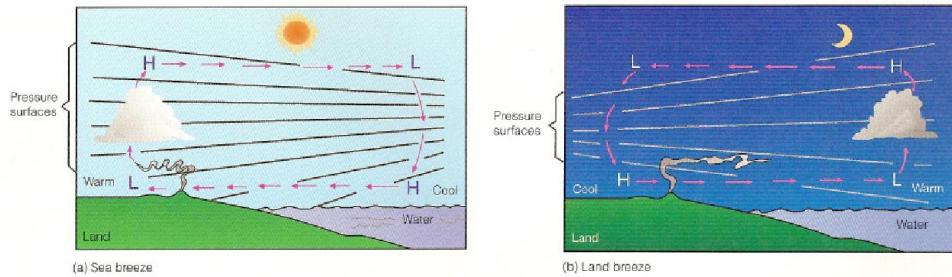


Figura 2.12: Brisa de mar (izquierda)/tierra (derecha): El gradiente de presión en superficie fuerza al aire a moverse desde el/la agua/tierra hacia la/el tierra/agua. (de Ahrens, 1993)

El calentamiento diferencial debido a heterogeneidad en las superficies, como por ejemplo tierra – agua (Fig. 2.12) o área rural – área urbana, producen regiones de convergencia/divergencia en superficie que generan circulaciones típicas desde áreas más frías hacia áreas más cálidas. En presencia de fuentes de emisión de contaminantes, la frecuencia de ocurrencia de estas circulaciones determina patrones predominantes de dispersión de contaminantes.

#### *d) Procesos de transformación de contaminantes*

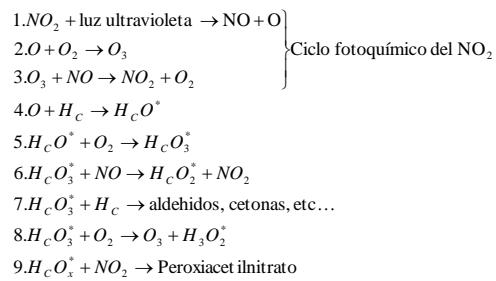
Existen dos problemas de transformaciones químicas de contaminantes en la atmósfera que son investigados con mayor profundidad: la transformación de óxidos de azufre que son los precursores del “smog” sulfuroso y la transformación de los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos que están ligados a la producción de “smog” fotoquímico.

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) es un contaminante primario principalmente generado en la quema de combustibles fósiles, pero en el aire éste puede oxidarse dando lugar al trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) el cual reacciona con el vapor de agua en presencia de sustancias catalizadoras para formar ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Subsecuentemente el ácido reacciona con otras sustancias para formar partículas de azufre (generalmente en fase líquida). Las condiciones ideales para esta cadena de eventos ocurren en áreas urbanas donde son quemados combustibles que contienen azufre y donde condiciones de dispersión reducida o inhibida coinciden con la formación de nieblas.

El “smog” fotoquímico se inicia por acción de la radiación solar del ultravioleta cercano sobre óxidos de nitrógeno y el proceso es favorecido por la presencia de hidrocarburos. La formación del “smog” fotoquímico está ligada a la ocurrencia natural del ciclo fotoquímico

del  $\text{NO}_2$  (Tabla 2.2). En presencia de radiación ultravioleta, el  $\text{NO}_2$  puede ser fotodisociado en NO y un átomo de oxígeno ( $\text{O}$ ) (radicales). Este último, altamente reactivo, se combina con una molécula del oxígeno presente en el ambiente para formar  $\text{O}_3$ . El ciclo se completa cuando la molécula de  $\text{O}_3$  reacciona con el NO remanente para formar  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_2$ .

Tabla 2.2: Esquema simplificado de las reacciones químicas involucradas en la formación de “smog” fotoquímico



El ciclo de  $\text{NO}_2$  por sí mismo no es capaz de explicar las altas concentraciones de  $\text{O}_3$  observadas en el “smog” fotoquímico debido a que tanto el  $\text{O}_3$  como el NO son formados y destruidos continuamente sin producción neta. Lo que se necesita es un proceso que desequilibre el ciclo convirtiendo NO en  $\text{NO}_2$  sin consumir una cantidad equivalente de  $\text{O}_3$ . Este proceso se explica a través de las reacciones que tendrá el NO con los hidrocarburos reactivos (en general compuestos aromáticos) (HC) liberados por los vehículos. Este ciclo se encuentra esquematizado en la Figura 2.13.

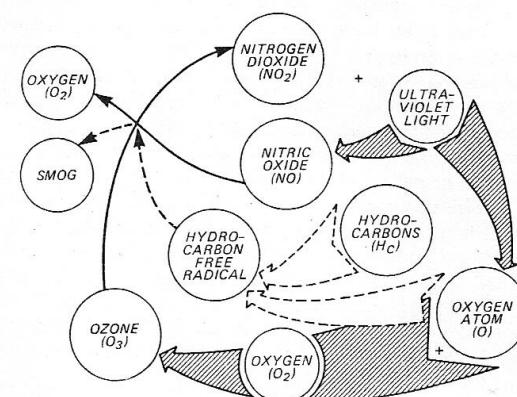


Figura 2.13: El ciclo fotolítico básico del  $\text{NO}_2$  y su ruptura debido a los hidrocarburos reactivos para formar “smog” fotoquímico (de Oke, pág 282)

#### e) Procesos de remoción de contaminantes

La atmósfera puede autodepurarse de diversas formas: por sedimentación, por depósito seco, y a través del lavado por acción de la precipitación (Ulke, 1992 y Martin P., 2005).

La sedimentación es la responsable de la remoción de las partículas de mayor tamaño, consideradas como aquellas que tienen un diámetro equivalente mayor a 1  $\mu\text{m}$ . Las partículas de diámetros mayores a 10  $\mu\text{m}$  se depositarán muy cerca de la fuente y poco tiempo después de su emisión. Aún en casos de turbulencia intensa ésta es capaz de mantener partículas de esos tamaños en suspensión por mucho tiempo, y su tasa de remoción está directamente relacionada con su tamaño, densidad, y con la intensidad del viento. Las partículas más pequeñas están influenciadas por la difusión turbulenta, que favorece la disminución o inhibición de su descenso por acción de la gravedad, y aquellas menores a 1  $\mu\text{m}$  de diámetro podrían teóricamente permanecer casi indefinidamente en suspensión. En la práctica, la mayoría de las partículas son removidas eventualmente por depósito seco, húmedo, o por depósito luego de su agregación en partículas más grandes. Los gases contaminantes pueden ser adsorvidos por partículas y ser removidos con ellas.

El depósito seco es un proceso de transferencia turbulenta y molecular en la última capa adyacente al suelo. El flujo vertical de depósito de contaminantes ( $F$ ) puede representarse por una expresión del tipo flujo-gradiente (flujo proporcional al gradiente de la propiedad transportada):

$$F = -K_F \left( \frac{\partial \bar{\chi}}{\partial Z} \right)$$

donde,  $K_F$  es el coeficiente difusividad turbulenta del contaminante en la atmósfera y  $\frac{\partial \bar{\chi}}{\partial Z}$  es el gradiente vertical de la concentración media de contaminantes. El proceso de depósito supone necesariamente un flujo con dirección a la superficie ya que ella actúa como un sumidero de contaminantes. Para una concentración dada la tasa bajo la cual éstos son depositados en la superficie depende del valor de  $K_F$  (es decir, de la intensidad de la turbulencia presente).

La precipitación es el mecanismo atmosférico más efectivo para remover gases y material particulado. Este proceso se subdivide a su vez en otros dos. El primero es la incorporación de gases o partículas contaminantes en gotas o cristales de hielo dentro de una nube. El segundo es el proceso de arrastre por debajo de la base de nube que se produce por impactación,

colisión o coalescencia de las gotas al precipitar. Las partículas y los gases son transportados dentro de las nubes por las ascendentes convectivas. Algunas de las partículas, principalmente las higroscópicas, se convierten en núcleos alrededor de los cuales se condensa o sublima el vapor de agua para formar una microgota o un cristal de hielo, la cual además puede crecer por colisión/agregación con otras gotas o cristales. Durante su vida dentro de la nube (o niebla) estas gotas capturan o adsorben otras partículas y gases. Eventualmente, si la gota o el germe de hielo crece lo suficiente, precipita transportando los contaminantes a la superficie y removiéndolos de la atmósfera. Por debajo de la base de la nube, la precipitación produce una remoción cuya eficiencia es mucho mayor que la del proceso de remoción de contaminantes dentro de la nube, y depende de la intensidad y densidad de precipitación, del tamaño y las cargas eléctricas de las gotas y de la concentración de contaminantes.

#### **2.4 Modelado de la dispersión de contaminantes: modelos eulerianos y lagrangeanos**

Un modelo de difusión de contaminantes es un conjunto de ecuaciones que consideran las emisiones, las condiciones meteorológicas y del terreno y permiten obtener la distribución espacial tridimensional de concentración de contaminantes en función del tiempo y en particular en las posiciones en que se encuentran los receptores (Fig. 2.14).

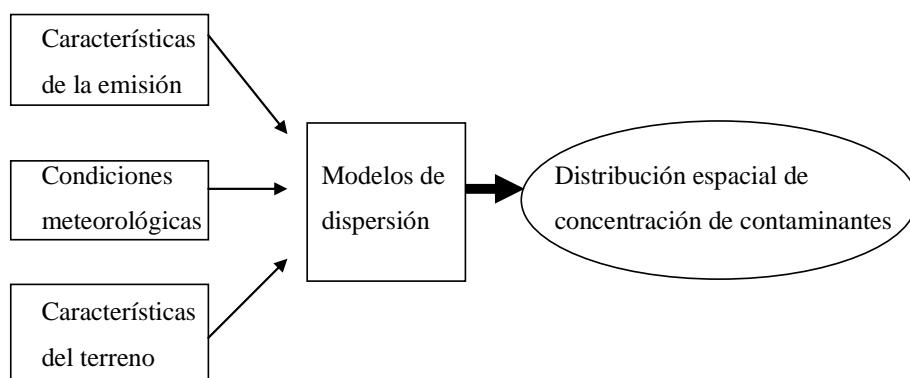


Figura 2.14: Esquema del proceso de modelado de la dispersión de contaminantes

Una pluma de contaminantes dispersándose en la atmósfera puede ser descripta como un conjunto de partículas que se mueven dentro de un flujo. Cada partícula sigue una trayectoria que es determinada por una combinación entre el viento medio y las características locales del flujo turbulento.

Usualmente, tanto las propiedades de dispersión, como la concentración de contaminantes, son calculadas o medidas en puntos fijos en el espacio (marco fijo de referencia). Por ejemplo, la concentración de un contaminante a una cierta distancia de la fuente de emisión es calculada midiendo el número de partículas que al mismo tiempo ha alcanzado el punto de medición. Esta aproximación, conocida como aproximación Euleriana, es mayormente utilizada en experimentos a campo, así como también en experimentos de laboratorio o en modelos numéricos eulerianos, así como en redes de monitoreo de calidad del aire.

Alternativamente, es posible calcular las características de la dispersión de una pluma en un marco de referencia que se mueve junto con la partícula. En otras palabras, cada partícula es considerada en forma separada, y cada trayectoria es seguida singularmente. Este método, conocido como aproximación Lagrangeana, es la aproximación más natural para investigaciones teóricas de la dispersión turbulenta debido a que permite relacionar el desplazamiento de las partículas con las propiedades de sus velocidades turbulentas.

Entonces, los modelos eulerianos describen la concentración estadística en términos de las velocidades eulerianas del fluido, esto es, velocidades medidas o calculadas en puntos fijos del espacio. Esta formulación es muy utilizada por dos motivos fundamentales: la información de velocidades necesaria para calcular las concentraciones mediante modelos coincide con las observaciones realizadas con un anemómetro y las expresiones matemáticas son directamente aplicables a situaciones en las cuales se consideren procesos de transformaciones químicas. Sin embargo tiene el serio problema matemático de la necesidad de ecuaciones de cierre para la turbulencia, las cuales llevan a formular, en general, hipótesis de simplificación muy fuertes. La mayoría de los modelos utilizan ecuaciones de cierre de primer orden o de orden 1,5. El modelado con técnicas de cierre de segundo orden permite la descripción física en mayor detalle, pero requiere un análisis numérico más extenso y presenta el inconveniente de la especificación de una cantidad de coeficientes de naturaleza empírica.

Por otro lado la aproximación Lagrangeana describe la concentración de un contaminante en términos de las propiedades estadísticas de los desplazamientos de las partículas del fluido. En este caso se salva el problema del cierre de las ecuaciones, con lo cual son matemáticamente más tratables. El principal escollo consiste en que es necesario conocer las condiciones del flujo en cada punto para poder calcular las distribuciones de probabilidad requeridas para la soluciones.

Algunos modelos utilizan una mezcla de tratamiento euleriano y lagrangeano, donde por ejemplo, la dispersión del contaminante es calculada asumiendo la difusión tanto de un “puff” como de una partícula. Si se define:

*Partícula*: Este elemento (particular) es una porción de masa de contaminante. Se emite un número fijo de partículas que se mueven debido a la influencia del viento y poseen una componente de desplazamiento media y otra aleatoria. Nunca crecen ni se dividen.

*“Puff”*: Este elemento es una bocanada circular tridimensional que tiene una distribución de concentración vertical y horizontalmente definidas. Los “Puffs” crecen horizontal y verticalmente de acuerdo a las reglas de dispersión y se dividen si su tamaño es muy grande.

*Híbrido*: Este elemento corresponde a un objeto bidimensional (masa plana, espesor vertical nulo) el cual posee una distribución horizontal de tipo “puff”. Para simular la distribución vertical se utiliza un número fijo de estos elementos que funcionan como partículas. En la dimensión horizontal estos elementos crecen de acuerdo a las reglas de dispersión y se dividen si su tamaño es muy grande.

Entonces, un “puff” que sigue una trayectoria simple no puede representar adecuadamente el crecimiento de una nube de contaminantes cuando el campo de viento varía en el tiempo y el espacio. En estas situaciones, un “puff” simple debe dividirse en un número de “puffs” diferentes o se debe realizar una simulación usando muchas partículas. Por lo tanto, en el modelo “puff”, éstos se expanden hasta que superan el tamaño de la grilla meteorológica (tanto horizontal como verticalmente) y luego el “puff” se divide en múltiples nuevos “puffs”, cada uno con su respectiva masa de contaminantes. En el modelo de partículas, un número fijo inicial de partículas es advectado sobre el dominio del modelo por la componente media del viento y por la turbulencia. La configuración usual consiste en una distribución de “puff” en la dirección horizontal y una dispersión de partículas en la vertical. De esta manera, la mayor exactitud en la parametrización de la dispersión vertical del modelo de partículas se combina con la ventaja de tener un número de partículas en expansión constante representando la distribución de contaminantes.

### **3. CLIMATOLOGÍA DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN EL AIRE DE LA CIUDAD DE BUENOS AIRES Y SUS ALREDEDORES**

En este capítulo, se presentará una breve descripción de las características climatológicas de las variables meteorológicas que tienen incidencia en la dispersión y transporte de contaminantes en la atmósfera, sean éstas directamente observadas como la intensidad y dirección del viento u obtenidas a partir de variables observadas como es el caso de la estabilidad atmosférica, la altura de la capa de mezcla y el índice de ventilación.

#### **3.1 Antecedentes**

En Argentina y más particularmente en Buenos Aires, se han realizado varios estudios relacionados con las condiciones meteorológicas que favorecen situaciones adversas de contaminación atmosférica. Como se ha mencionado la altura de la capa límite atmosférica es una de las variables con mayor incidencia en la determinación de la capacidad de la atmósfera para recibir y dispersar eficientemente contaminantes de naturaleza antrópica. Los primeros trabajos en el país fueron realizados por Mazzeo y otros (1973) en el que determinaron valores medios estacionales de altura de capa de mezcla máxima a partir de 5 años de radiosondeos diarios observados en estaciones aerológicas ubicadas a lo largo del territorio argentino y dependientes del SMN. Posteriormente, Scian y Quinteros (1975) estudiaron con mayor detalle la altura de la capa límite en Buenos Aires y Piccolo (1982) estudió la influencia del mar en el desarrollo de las capas límites internas en la ciudad de Bahía Blanca. Más tarde, Gassmann y Mazzeo (2000) presentan un nuevo estudio para todo el país de la altura de la capa límite máxima diurna junto con estimaciones del viento transporte en la capa y del índice de ventilación. Ellos observaron que la región del NE argentino presentaba mayores probabilidades de ocurrencia de condiciones adversas para la ventilación atmosférica, con índices de ventilación bajos (inferiores a  $6000 \text{ m}^2/\text{s}$ ), especialmente durante el período invernal. En esta región se ubica el cordón industrial más importante del país (Rosario-Buenos Aires). Posteriormente Gassmann y Mazzeo (2001) realizan un estudio de la altura de la capa límite estable nocturna, estimada a partir de un modelo de balance de energía térmica para una superficie rural. Este modelo fue aplicado para distintas ciudades del país, entre las que se encontraba el entorno rural del AMBA.

Durante la estación cálida, el posicionamiento del anticiclón semipermanente de Atlántico Sur sumado a los efectos costeros en el campo de temperatura facilita la generación de circulaciones locales que favorecen la ocurrencia de viento desde esas direcciones (sector N→E) (desde el río hacia la ciudad). Durante la estación fría, las direcciones de viento prevalecientes siguen siendo del sector noreste pero en menor medida que durante la estación cálida. El comportamiento más homogéneo y el relativo incremento de las frecuencias de viento del sector SO-NO están relacionados con un incremento en el pasaje de los sistemas sinópticos transientes en esta región como resultado del desplazamiento de los sistemas semipermanentes hacia el Ecuador (Ulke, 2000).

En relación a las condiciones de estabilidad, durante el período cálido, los factores gobernantes son vientos moderados a leves, una gran insolación y una pequeña fracción de cobertura nubosa, que favorece la mezcla turbulenta y las condiciones inestables. Mientras que durante el período frío, las condiciones estables resultan de una menor insolación y una mayor cobertura nubosa, y de velocidades de viento relativamente más importantes asociadas al patrón climático. Una característica adicional es el impacto de las noches largas, responsables de la mayor contribución de condiciones estables en la mañana temprano y en horas de la tarde.

### **3.2 Viento: intensidad y dirección**

Para realizar la caracterización de esta variable en el área de estudio considerada, se utilizaron las estadísticas climatológicas del período 1991-2000, provistas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, sin fecha de publicación oficial), para las estaciones Aeroparque Aero (34.34 S, 58.25 O), Observatorio Central Buenos Aires (34.35 S, 58.29 O), y Ezeiza Aero (34.49 S, 58.32 O).

En la Figura 3.1, se observa que en las tres estaciones las direcciones más frecuentes del viento en 10m son las que provienen del cuadrante NE-SE.

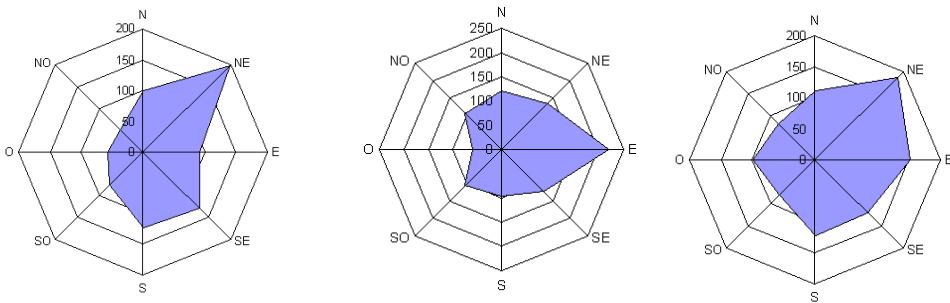


Figura 3.1: Frecuencia anual de direcciones de viento en escala de 1000 para las estaciones Observatorio Central Buenos Aires, Aeroparque Aero y Ezeiza Aero (de izquierda a derecha).

En cuanto a la velocidad media del viento a 10m, la Tabla 3.1 indica que ésta se encuentra alrededor de los 3-4m/s para las tres estaciones meteorológicas, presentando los mayores valores durante el período cálido.

Tabla 3.1: Velocidad media del viento a 10 metros para el período 1991/2000

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Anual
OCBA	4.0	3.9	3.7	3.6	3.5	3.7	3.7	3.8	3.9	4.0	4.1	4.0	3.8
Aeroparque Aero	4.6	4.4	4.1	4.0	3.7	3.8	3.8	3.8	4.3	4.5	4.8	4.8	4.2
Ezeiza Aero	4.1	3.9	3.6	3.7	3.4	3.7	3.8	3.9	4.2	4.3	4.2	4.1	3.6

### 3.3 Estabilidad atmosférica

Ulke (2000), en un estudio de las condiciones de contaminación potencial en la Ciudad de Buenos Aires, encontró que anualmente, las clases de estabilidad más frecuentes, en orden decreciente, son las condiciones atmosféricas neutrales, condiciones atmosféricas débilmente inestables y las condiciones inestables. Este era un resultado esperado ya que en ese estudio sólo se consideraron períodos diurnos. Más allá del hecho de que las condiciones neutrales son las más frecuentes de acuerdo al esquema definido por Pasquill (1961), el resultado se obtiene a partir del estudio del patrón climatológico de Buenos Aires teniendo en cuenta el viento en superficie, la insolación y la cobertura nubosa. El viento medio en la región varía en un rango de 4-5m/s, con los mayores valores en verano y las condiciones de cobertura nubosa media son moderadas (entre 3 y 5 octavos). Esto explicaría la poca frecuencia de condiciones extremadamente inestables.

### **3.4 Altura de la capa límite atmosférica**

La altura de la capa límite atmosférica en condiciones diurnas está íntimamente asociada a la estabilidad de origen térmico debido a que la mezcla convectiva es más eficiente que la mezcla mecánica, las propiedades se homogenizan mejor debido a que la anisotropía en la convección favorece los movimientos verticales, mientras que la anisotropía por cortante favorece los horizontales.

Para la Ciudad de Buenos Aires durante las horas diurnas la altura máxima media anual de la capa límite atmosférica tiene valores menores a 1200 m (Gassmann, 1998). Las menores alturas medias de capa límite durante el día se dan en invierno, mientras que las mayores se darán en verano. Las variaciones diurnas muestran las menores alturas de capa límite durante el día en las horas de la mañana y las mayores a las 14-15 hora local y una tasa de decrecimiento luego de la puesta del sol menor que la tasa de crecimiento observada durante la mañana. Las máximas alturas diarias varían entre 2000m y 4500m, mientras que las más bajas se encuentran en un rango de 50 a 60 m (Ulke y Mazzeo, 1998).

### **3.5 Ventilación**

El índice de ventilación es una medida de la capacidad de autodepuración de la atmósfera. Se define como

$$I = V_T Z_i$$

Donde  $Z_i$  es la altura de la capa de mezcla. Holzworth (1967) desarrolló un método para estimar la altura máxima de la capa mezclada para un día determinado utilizando, la temperatura observada del aire en distintos niveles a las 12 UTC (Universal Time Coordinated) (radiosondeo) y la temperatura máxima observada en superficie. Luego, la altura máxima de la capa mezclada es estimada como la altura que alcanza una parcela de superficie con la temperatura máxima diaria observada que se inestabiliza expandiéndose adiabáticamente hasta equilibrar su temperatura con la del entorno.

La velocidad del viento transporte  $V_T$  se define como el promedio vertical del viento en la capa mezclada de altura  $Z_i$

$$V_T = \frac{\int_{z_0}^{Z_i} u(z) dz}{Z_i - z_0}$$

Si se analizan las unidades de este índice: [  $I$  ] = m/s \* m =  $m^2/s = m^3/(m \cdot s)$

Entonces, el índice de ventilación puede comprenderse cualitativamente como la cantidad de metros cúbicos de aire que se mueve por unidad de longitud y tiempo en la dirección del viento medio. Da una idea de la capacidad de ventilación que tiene la atmósfera en una determinada región.

Este índice tiene un valor crítico de 6000  $m^2/s$  o el cumplimiento conjunto que  $Z_i \leq 1500m$  y  $V_T \leq 4m/s$  (Holzworth, 1972), e indica que si el índice para una determinada región es menor a este valor, entonces se considera que las condiciones meteorológicas potencian el riesgo de la región para tener episodios de contaminación, siempre y cuando existan emisiones de contaminantes a la atmósfera. La atmósfera no tendrá en esos casos la capacidad de autodepurarse, al menos por acción del viento.

Los límites de altura de capa de mezcla y de velocidad de viento transporte asociados a este valor crítico corresponden a una altura de 1500 m y una velocidad 4 m/s.

En la Ciudad de Buenos Aires, durante el período frío se observa una alta frecuencia de valores de índice de ventilación en rangos menores a los 6000  $m^2/s$  en las direcciones de viento más frecuentes, esto se debe a que los valores máximos de alturas de capa de mezcla durante esa estación del año son menores, en general, a los 1500 m y a relativamente bajos valores de viento transporte asociados a las direcciones prevalecientes del viento (Gassmann y Mazzeo, 2000). Durante el período cálido las frecuencias de índices de ventilación inferiores a 6000  $m^2/s$  disminuyen principalmente debido a alturas de capa de mezcla más altas producto de un mayor calentamiento y de un mayor contenido de humedad en el aire, así como de una mezcla turbulenta más vigorosa (Ulke, 2000).

## **4. ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA DE DOCK SUD (Pdo. De Avellaneda, Pcia. de Buenos Aires)**

### **4.1 Introducción**

En el año 2001 la Agencia de Cooperación Internacional del Japón en Argentina (JICA) y la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación firmaron un convenio en conjunto con la empresa Dock Norte para iniciar acciones conjuntas para realizar un estudio sobre la calidad de aire ambiente en la zona del complejo industrial Dock Sud, en el partido de Avellaneda, con el fin de determinar una Línea de Base de la contaminación en esa área urbana. Como resultado de este trabajo se publicó un informe de carácter público denominado “El estudio de línea de base de concentración de gases contaminantes en atmósfera en el área de Dock Sud en Argentina” realizado por la empresa Dock Norte (disponible en versión digital).

El estudio tuvo por objeto, entre otras cosas, realizar un monitoreo de contaminantes en la zona y la aplicación de un modelo de dispersión de contaminantes (ISC3ST) para analizar la distribución de las concentraciones de los contaminantes en aire emitidos por las siguientes fuentes fijas: las chimeneas de las empresas del polo petroquímico Shell, Dapsa y Meranol y las centrales térmicas Dock Sud (ubicada en la zona de estudio) y Central Costanera, ubicada fuera del polo pero de fuerte influencia en la zona debido a los vientos dominantes y a la altura de sus chimeneas.

### **4.2 Descripción del Complejo Industrial**

La localidad de Dock Sud (Fig 4.1), se encuentra a 4 km del centro de la Ciudad de Buenos Aires, en el partido de Avellaneda. Se halla delimitada por el Río de la Plata, el arroyo Sarandí, el Río Matanza–Riachuelo y el Canal Dock Sud. Cuenta con una población que representa el 7% de los habitantes del partido.

En el área de Dock Sud se emplaza uno de los mayores polos petroquímicos de la Argentina, y en su interior alberga dos zonas diferenciadas por su actividad: el puerto y la zona industrial, que abarca 380 hectáreas y concentra actualmente alrededor de 42 empresas. En la periferia de dicho polo se encuentra Villa Inflamable, centro urbano caracterizado por el bajo nivel adquisitivo de sus habitantes y condiciones precarias de vivienda así como también de servicios municipales. En la zona tienen asiento un total de 31 escuelas públicas y privadas

de los 3 niveles educativos (preescolar, primario y secundario) y 9 unidades sanitarias. Del total de denuncias ambientales recibidas por el municipio en 2000, el 21% provino de esta área. Durante la campaña también se obtuvieron numerosas denuncias realizadas mayormente por los vecinos del lugar en las que la causa más común fueron los olores.



Figura 4.1: Imagen del polo petroquímico y Villa inflamable (área coloreada en azul).

#### *Distribución de empresas en el Polo Petroquímico Dock Sud*

##### **Petroquímicas**

En ese lugar, al momento del estudio, se encontraban emplazadas las refinerías de petróleo Dapsa y Shell Capsa, que por otro lado almacenaban derivados del petróleo en tanques diseñados para tal fin. El insumo principal utilizado es petróleo crudo y los productos derivados por la refinación son naftas, solventes, gas oil, diesel oil, fuel oil, residuos asfálticos, aceites, grasas y carga de cracking (mecanismo de escisión o descomposición de hidrocarburos de alto peso molecular en moléculas más pequeñas), ácido sulfúrico, soda cáustica, anilina, zinc y litio.

Existían en ese momento en el lugar varias plantas de recepción de petróleo y de sus derivados como las empresas EG3 SA, Sea Tank Coastal Petroleum Argentina S.A., Sol Petróleo SA, YPF SA. La empresa Sea Tank sólo comercializaba hidrocarburos livianos y naftas. El resto trabajaba con kerosene, gas oil, naftas, solventes, alifáticos y aromáticos y en el caso de YPF gas butano y propano líquido.

#### ***Plantas de tratamiento químico***

La planta Meranol se dedicaba a la manufactura de productos químicos. Entre las sustancias que se manipulaban para su producción se encontraba ácido sulfúrico, buxita, clorato de potasio, alquilbenceno lineal, pigmentos amarillos y rojos, soda cáustica, sulfato de aluminio líquido y sólido.

#### ***Otras plantas***

Algunas industrias se dedicaban únicamente a la recepción y almacenaje de productos químicos tales como Antivari SA, Distribuidoras Químicas Sa, Exolgan, Indupa, Productora Argentina de Melaza SA, Tagsa, Union Carbide Argentina SA., Valentín Balcarse SA, Mecorcarga, Maruba. Entre los elementos comercializados por estas empresas se encontraban principalmente las siguientes sustancias: acrilonitrilo, cloroformo, tolueno y disocianato.

#### ***Central Termoeléctrica***

Central Dock Sud es la única central dentro del polo. Esta central posee turbinas que se encuentran preparadas para quemar dos tipos de combustibles: gas natural y gasoil, siendo el primero el combustible base. Las potenciales emisiones que puede presentar una central térmica de estas características son la de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas.

#### ***Otras industrias***

En Dock Sud se emplazaban otras industrias que manufacturan aceites, gasas y jabones como las empresas Tenanco, Materia Hnos. SA, Orvol SA, Unilever Argentina SA y Coco Oil. Estas empresas utilizaban como insumos productos de baja combustión, sebo vacuno, aceites y olinas vegetales.

Mención aparte merece la empresa Tri-Eco S.A., dedicada a la eliminación de residuos peligrosos por incineración. De la combustión de estos materiales es de esperar que se

producen emisiones de dos tipos de sustancias cloradas que aparecieron entre los hidrocarburos medidos en una campaña exploratoria de salud realizada en una muestra de población infantil de Dock Sud. Los miembros que llevaron adelante ese proyecto solicitaron a la empresa datos acerca de sus emisiones pero no obtuvieron respuesta.

Como se mencionara previamente, en el estudio realizado por Dock Norte fueron consideradas únicamente las chimeneas de las empresas del polo petroquímico Shell, Dapsa y Meranol y las centrales térmicas Dock Sud y Central Costanera. No se tuvieron en cuenta fuentes fijas tales como los tanques de almacenamiento de productos petroleros y químicos existentes en la zona, ni las eventuales emisiones fugitivas resultantes de la operación de las instalaciones así como carga y descarga de buques, o algunas otras chimeneas que no han sido detectadas o declaradas.

#### **4.3 Ubicación de las estaciones de monitoreo**

Las estaciones de monitoreo de la calidad de aire fueron 4 y tuvieron la siguiente ubicación (Fig. 4.2):

- 1- Prefectura Puerto Dock Sud
- 2- Club Atlético Dock Sud
- 3- Calles Góngora y Galileo (Villa Inflamable)
- 4- Prefectura Boca Riachuelo



Figura 4.2: Posición de las estaciones de monitoreo en Dock Sud

#### **4.4 Contaminantes muestreados: Características sobresalientes de la calidad del aire en Dock Sud**

La Tabla 4.1 indica los contaminantes muestreados por cada una de las estaciones de monitoreo de calidad de aire.

Tabla 4.1: Gases monitoreados por cada una de las estaciones de monitoreo

Gases monitoreados	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	H <sub>2</sub> S (ppm)	PM10 (mg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (ppm)	VOCS (ppm)	CO (ppm)
Estaciones de monitoreo							
1	X	X	X	X			
2	X	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X			
4	X	X			X	X	X

Si bien en el año 2003, JICA presentó un estudio de evaluación de daños en la salud debido a la exposición a la contaminación producida por el Polo Petroquímico y este dio como resultado que la comunidad de Villa Inflamable se encuentra en alto riesgo por la presencia habitual en la zona de 17 gases tóxicos y de metales pesados; al analizar los datos de calidad del aire en las 4 estaciones (Figs 4.3 a 4.6), obtenidos en este estudio de JICA, se observó que en ningún momento del periodo en que se realizaron las mediciones de

concentraciones de SO<sub>2</sub> y NOx los valores superan los estándares de calidad de aire normados para el SO<sub>2</sub>, aunque sí se observa que en algunas ocasiones el NOx sobrepasa los niveles guía de la Ley 1356 de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Sin embargo, es de remarcar que la selección del período de estudio (primavera-verano) no resultó ser la más adecuada de acuerdo a los resultados obtenidos a partir de los estudios previos realizados para el área (Ulke y Mazzeo, 1998; Ulke, 2000; Gassmann y Mazzeo, 2000; Gassmann y Mazzeo, 2001).

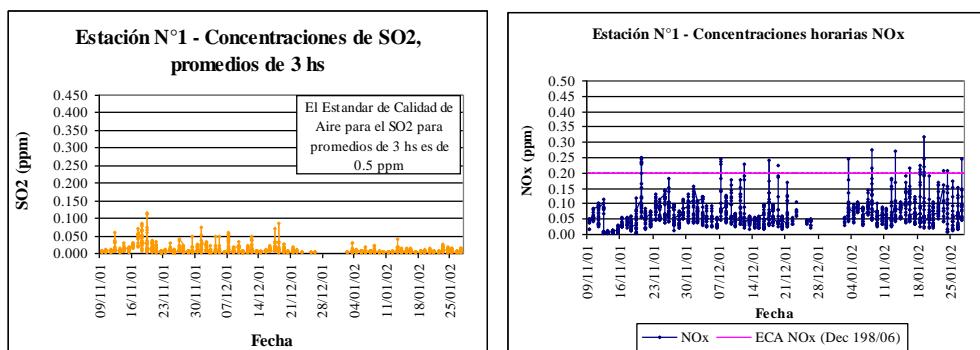


Figura 4.3: Concentraciones de SO<sub>2</sub> (izquierda) y NOx (derecha) para la estación de monitoreo N°1. ECA NOx: Estándar de Calidad de Aire para NOx.

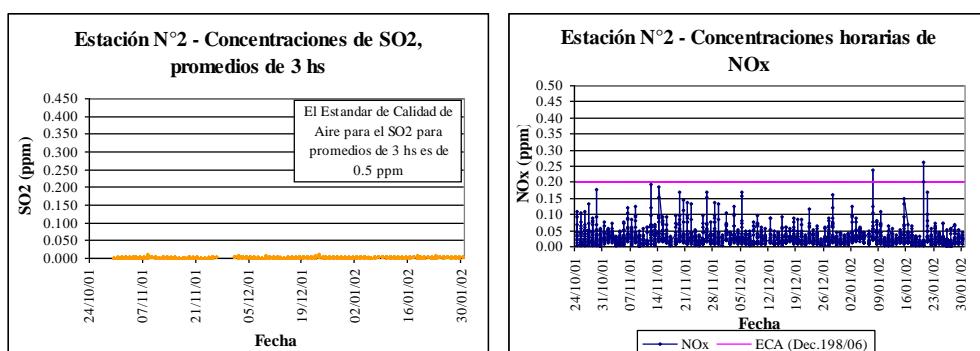


Figura 4.4: Concentraciones de SO<sub>2</sub> (izquierda) y NOx (derecha) para la estación de monitoreo N°2. ECA NOx: Estándar de Calidad de Aire para NOx.

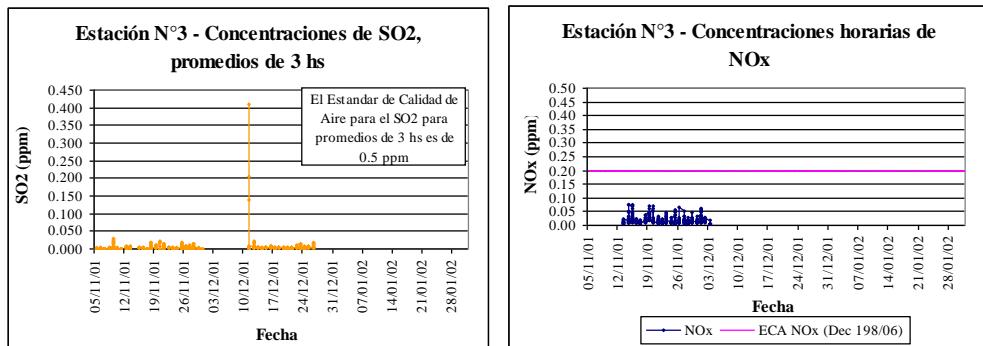


Figura 4.5: Concentraciones de SO<sub>2</sub> (izquierda) y NOx (derecha) para la estación de monitoreo N°3.  
ECA NOx: Estándar de Calidad de Aire para NOx.

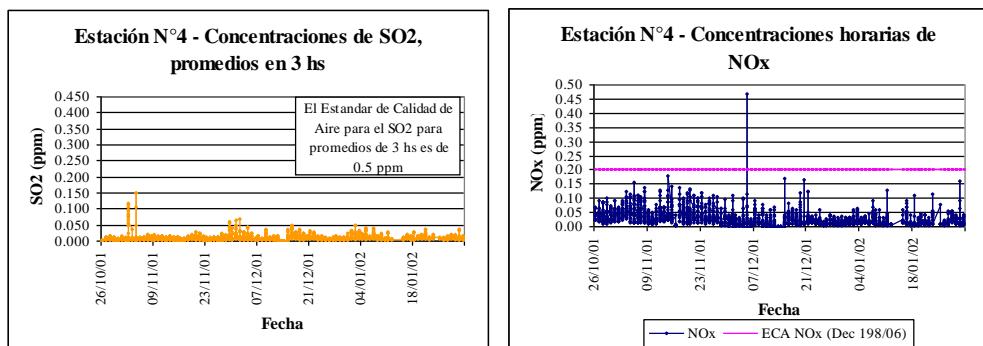


Figura 4.6: Concentraciones de SO<sub>2</sub> (izquierda) y NOx (derecha) para la estación de monitoreo N°4.  
ECA NOx: Estándar de Calidad de Aire para NOx.

## **5. APLICACIÓN DEL MODELO CALPUFF**

Para este trabajo se ha aplicado el modelo CALPUFF desarrollado por Scire y otros (2000). A continuación se hará una descripción de los submódulos que componen este modelo para simular el transporte y dispersión de contaminantes.

### **5.1 Descripción de submódulos del CALPUFF**

El modelo de dispersión CALPUFF necesita como datos de entrada los campos meteorológicos obtenidos con un preprocesador meteorológico (CALMET), que a su vez ha compatibilizado esa información con un módulo de posicionamiento geográfico de archivos de uso de suelo y topografía. A continuación se hará una breve descripción de los distintos submódulos utilizados previamente para poder ejecutar luego el modelo de dispersión y finalmente post-procesar los campos de concentración adecuadamente.

#### *5.1.1 Módulo Topografía y Uso de suelo*

El módulo de topografía (TERREL) es un pre-procesador que extrae y da un nuevo formato a los datos de elevación del terreno de acuerdo a las opciones seleccionadas por el usuario (dominio, resolución, retícula, etc.) y a los datos de entrada que se utilicen, ya que admite varias opciones de fuentes de datos. En el presente estudio, uno de los conjuntos de datos disponibles para Sudamérica, y en particular para la zona de estudio, es el que proporciona el archivo de datos GTOPO30 de la USGS (U.S. Geological Survey), que tiene una resolución de 900 metros. Para el dominio considerado en este estudio se consideraron los archivos que corresponden a los cuadrantes resaltados en la Figura 5.1, los cuales fueron representados en planimetría con la proyección Universal Transverse Mercator (UTM). El posicionamiento altimétrico fue ajustado considerando el elipsoide y geoide de referencia dado por el Sistema de Cobertura Global WGS84.

El TERREL tiene la capacidad de producir campos discretos de elevaciones de terreno en puntos de retícula. Para ello, promedia todos los datos puntuales de terreno que caen dentro de cada elemento de retícula y obtiene la elevación en el centro. Las características de la grilla son especificadas por el usuario. En el presente trabajo, se consideró una grilla de 235 km en dirección longitudinal y 205 km en dirección latitudinal.

El TERREL produce un archivo de salida con datos de terreno que es compatible con el preprocesador de datos meteorológicos CALMET.

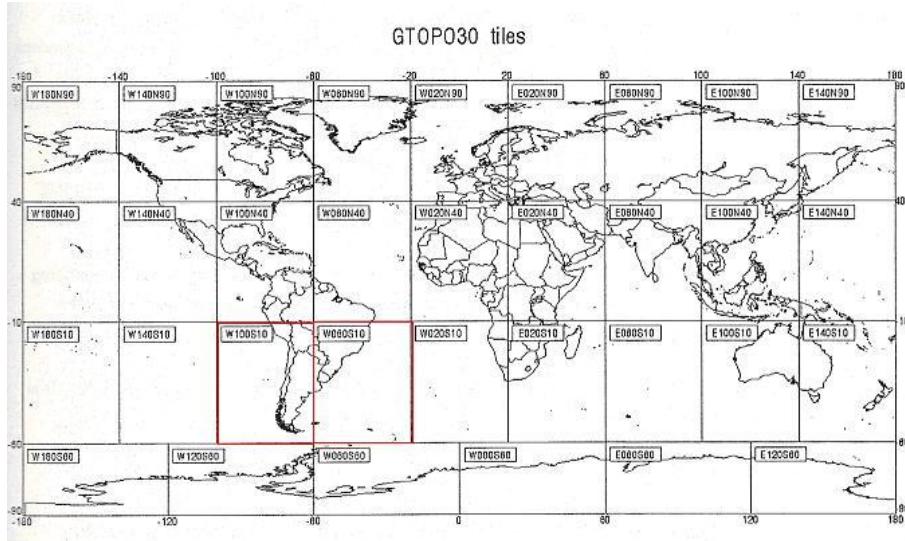


Figura 5.1: Campos de elevación del terreno para todo el mundo

El modelo cuenta con un preprocesador de uso de suelo, el CTGPROC, que se encarga de obtener y procesar los datos de uso y cobertura de suelo (LULC, Land Use Land Cover) en una Composición de Grilla por Tema (CTG), esto quiere decir que los usos de suelo se encuentran separados en archivos por temática. El código de uso de suelo suele estar definido en el punto central de cada celda, las cuales en general están espaciadas 200 metros en ambas direcciones, tanto este-oeste como norte-sur. La representación en el plano siguió la proyección UTM.

Los datos de uso y cobertura de suelo se descargan de la página Web de la USGS y tienen una resolución de 900 metros para nuestra región. En este caso el archivo disponible para América del Sur fue sólo uno, indicando la falta de generación de bases de datos apropiadas para nuestra zona. En este estudio fueron utilizados dos archivos de uso y cobertura de suelo, uno en el que se indica el uso de suelo rural y otro para usos de suelo urbanos ([http://www.src.com/datasets/datasets\\_lulc.html#USGS\\_CTG\\_LULC\\_DATA](http://www/src.com/datasets/datasets_lulc.html#USGS_CTG_LULC_DATA)).

Finalmente, existe un post-procesador de estos datos, MAKEGEO, que genera el archivo GEO.DAT, el cual provee los datos geofísicos de entrada que requiere el modelo CALMET. Estos datos incluyen parámetros de superficie característicos relevantes para el cálculo de los

transportes turbulentos en la interfase suelo-atmósfera, como por ejemplo: rugosidad de la superficie, albedo, índice de área foliar, etc, y flujos de calor incluyendo el antropogénico. Este post-procesador requiere como entrada los archivos producidos por el TERREL y por el CTGPROC.

El MAKEGEO calcula las fracciones de uso de suelo en las celdas de la retícula, las categorías de uso de suelo dominantes, le asigna distintos pesos a los parámetros de uso de suelo y regenera mapas a nuevas categorías de LULC si se desea.

La Figura 5.2 muestra el campo de uso de suelo generado por el MAKEGEO para el dominio seleccionado para la aplicación del modelo. Se puede observar el posicionamiento tanto en coordenadas UTM como en coordenadas geográficas (latitud, longitud).

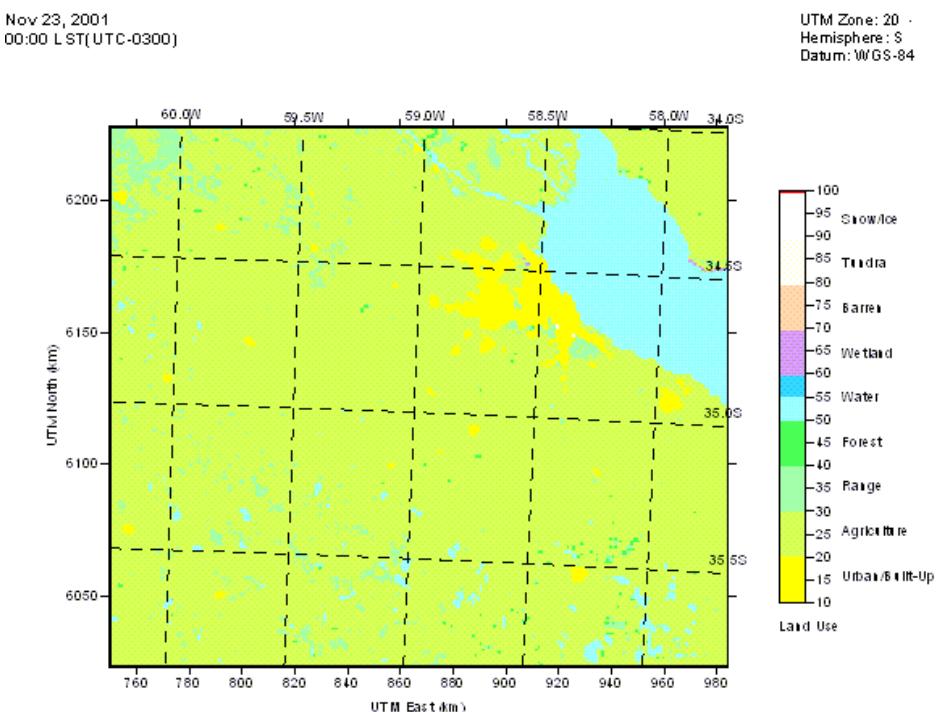


Figura 5.2: Campo de uso de suelo en la región comprendida para este estudio

### 5.1.2 Módulo Preprocesador Meteorológico CALMET

El pre-procesador meteorológico CALMET produce a partir de datos meteorológicos provenientes de distintos tipos de archivos de entrada (datos o salidas de modelos) los campos

meteorológicos necesarios para las simulaciones de dispersión de contaminantes. Para generar estos campos tiene en cuenta a su vez los datos de uso de suelo y topografía, junto a la información geofísica que se encuentra almacenada en el archivo GEO.DAT. El dominio y grilla horizontal vienen determinados también por este archivo.

En el archivo control del CALMET se definen datos de entrada que caracterizan a la simulación particular que se hará con el modelo, como fecha y hora de comienzo y finalización de la simulación, el huso horario, el tipo de archivo de datos meteorológicos usados por el pre-procesador (salida de modelo o dato observacional) y definición de la grilla vertical. El tope del dominio de resolución se fijó considerando la máxima altura de la capa límite en el día considerado. Esta altura se determinó en base a las salidas del modelo atmosférico BRAMS y se dividió el dominio vertical en 12 capas con mayor resolución cerca del suelo.

El modelo CALMET está diseñado para utilizar sólo observaciones meteorológicas rutinarias y disponibles de superficie y de altura, aunque también permite utilizar datos especiales de entrada. Por ejemplo, requiere como mínimo dos radiosondeos diarios, pero si se tienen radiosondeos a intervalos más frecuentes (incluso arbitrariamente espaciados), éstos pueden ser utilizados por el modelo. Las observaciones meteorológicas de superficie se encontrarán en un archivo de datos de superficie (SURF.DAT). Por otro lado, el CALMET contiene una opción que permite utilizar las salidas de modelos de pronóstico de alta resolución (Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model, MM5 o Regional Atmospheric Model System, RAMS), entre otros, como campos meteorológicos de entrada. Esta opción permitiría utilizar un sistema acoplado de modelo atmosférico y de dispersión en modo de pronóstico de la calidad del aire.

El CALMET lee observaciones horarias en superficie de velocidad y dirección del viento, temperatura, cobertura nubosa, altura de base de nube, presión en superficie, humedad relativa y tipo de precipitación (esto es opcional, si se considera el depósito húmedo). Por otro lado, la información de altura requerida por CALMET deberá incluir perfiles verticales de velocidad del viento, dirección, temperatura, presión y altura sobre el nivel del mar.

El CALMET incluye un generador de campos de viento aplicando métodos de análisis objetivo y parametrizaciones que permiten simular flujos en laderas, efectos cinemáticos y de bloqueo del terreno, y un procedimiento de minimización de la divergencia, así como también un submodelo micrometeorológico para representar las capas límites sobre superficies de tierra o agua.

El módulo de generación de campos de viento usa una aproximación en 2 pasos (Figura 5.3).

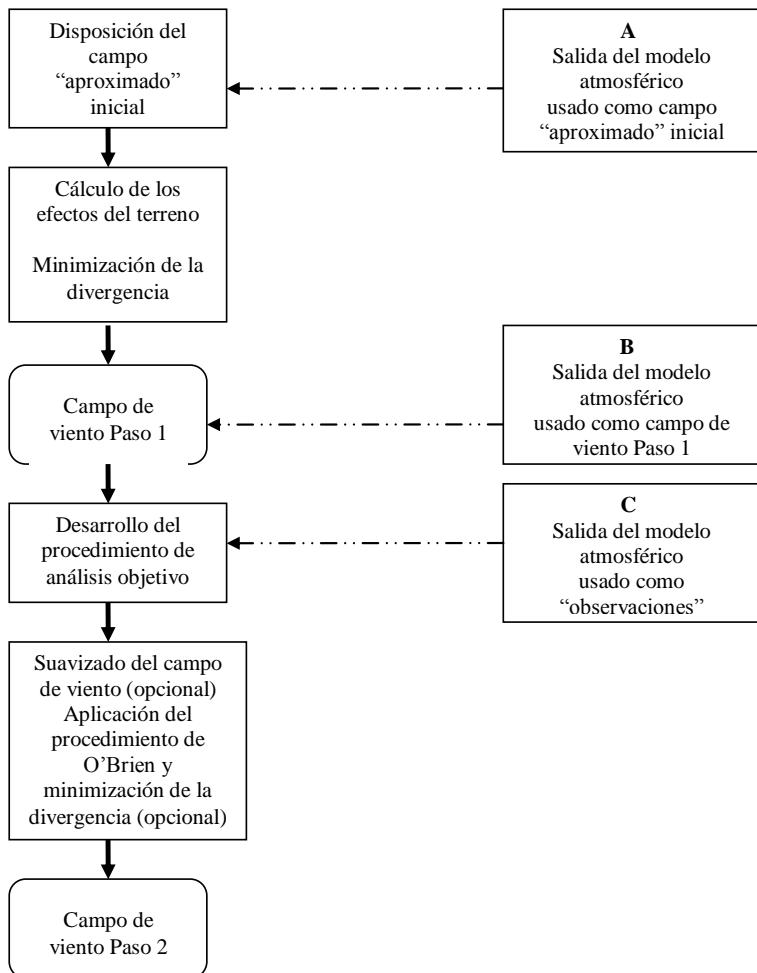


Figura 5.3: Diagrama del modelo de obtención del campo de viento del CALMET. Los vientos derivados del modelo atmosférico pueden ser introducidos como campo “aproximado” inicial **A** ó como campo de viento paso 1 **B**. Los datos del modelo atmosférico pueden ser tratados también como observaciones **C**.

En el primer paso se ajusta un campo de viento “aproximado” inicial a los efectos cinemáticos del terreno, los flujos en laderas y los efectos de bloqueo del terreno (topografía compleja), en caso de existir, para producir el campo de viento “Paso 1”. El segundo paso consiste en un procedimiento de análisis objetivo para introducir datos observacionales en el campo de viento “Paso 1” para luego producir el campo de viento final. La información

proveniente de los campos resultantes del modelo atmosférico puede ser introducida en el CALMET de 3 formas distintas: como reemplazo para el campo de viento “aproximado” inicial, como reemplazo para el campo de viento Paso 1 o como “observaciones” en el procedimiento de análisis objetivo.

En el caso del presente estudio, los campos meteorológicos provistos por el BRAMS fueron introducidos como campo de viento “aproximado” inicial.

#### Metodología de análisis en el Campo de viento Paso 1

*Efectos cinemáticos de terreno:* Se utiliza la aproximación de Liu y Yocke (1980) para evaluar estos efectos. Con los vientos en el dominio computacional seleccionado en la aplicación, se calcula la velocidad vertical forzada por el terreno, sujeta a una función exponencial de decaimiento dependiente de la estabilidad. Los efectos cinemáticos del terreno en las componentes horizontales del viento son evaluados utilizando un esquema de minimización de la divergencia para el campo inicial “aproximado” del viento. El esquema de minimización de la divergencia es aplicado iterativamente hasta que la divergencia tridimensional sea menor a un valor umbral.

*Flujos sobre laderas:* Los flujos sobre laderas son calculados en base a la parametrización de flujo ascendente definido por Mahrt (1982). El movimiento de este tipo de flujo está dominado por el empuje térmico, el cual es balanceado por una débil advección de cantidad de movimiento, arrastre de la superficie, y el ingreso de aire desde la atmósfera superior en el tope de la capa del flujo de la ladera. El flujo de ladera se parametriza en términos del terreno, distancia a la cima y flujo de calor sensible local.

*Efectos de bloqueo:* Los efectos termodinámicos de bloqueo del terreno sobre el flujo de aire están parametrizados en términos del número de Froude local (Allwine y Witheman, 1985). Si el número de Froude en un punto de grilla particular es menor a un valor crítico y el viento tiene una componente cuesta arriba, la dirección del viento es ajustada en forma tangente al terreno.

## Metodología de análisis en el Campo de viento Paso 2

El segundo paso incluye la introducción de datos observacionales en el campo del Paso 1 a través de un procedimiento de análisis objetivo. Se usa un esquema de interpolación de la inversa del cuadrado de la distancia, en el cual pesan más los datos observados en la vecindad de la estación de observación, mientras que el campo de viento del Paso 1 domina el campo de viento interpolado en áreas donde no hay datos observacionales. El campo de viento resultante está sujeto a: un suavizado o un ajuste opcional de la velocidad de viento vertical basado en el método de O'Brien (1970) y a una minimización de la divergencia para producir un campo de viento final Paso 2.

*Submodelo micrometeorológico:* CALMET utiliza dos submodelos para describir la estructura vertical y características de la capa límite: uno sobre tierra y otro sobre agua. En este trabajo sólo se hará especialmente referencia al submodelo sobre tierra.

*Modelo micrometeorológico sobre tierra:* Sobre superficies de tierra, se usa el método de balance de energía de Holtslag y van Ulden (1983) para calcular los campos horarios de flujo de calor sensible, velocidad de fricción en superficie, longitud de Monin-Obukhov y la escala de velocidad convectiva. Las alturas de la capa de mezcla son determinadas por los valores horarios calculados de flujos de calor sensible en superficie y las temperaturas observadas en los radiosondeos, a través del método modificado por Maul (1980) basado en Carson (1973). El modelo también calcula los campos de las clases de estabilidad de Pasquill-Gifford y las tasas de precipitación horaria.

*Modelo micrometeorológico sobre agua:* El modelo CALMET utiliza un método para calcular las variables micrometeorológicas sobre superficies de agua, basado en la diferencia de temperatura entre el agua y el aire.

*Submodelo de capa límite:* CALMET permite elegir distintos submodelos para determinar la altura de la capa límite tanto para el continente como para el océano. Para este trabajo se ha seleccionado la metodología sugerida por Batchvarova y Gryning (1994), basado en el flujo de calor sensible en superficie.

### *5.1.3 Módulo modelo de dispersión CALPUFF*

El CALPUFF es un modelo de transporte y dispersión de contaminantes que advecta contaminantes emitidos por las fuentes consideradas, simulando los procesos de dispersión y transformaciones a lo largo de la dirección de transporte. Se trata de un modelo lagrangeano no estacionario que advecta “puffs” continuos los cuales contienen una cantidad discreta de contaminantes. Estos “puffs” son descriptos a través de una distribución gaussiana. El modelo permite obtener campos horizontales de concentraciones de contaminantes en varios niveles verticales y considerar varias especies simultáneamente. Puede usar como variables de entrada los campos meteorológicos tridimensionales generados por el modelo CALMET.

El CALPUFF contiene algoritmos para efectos del “lavado” producido por los edificios cercanos a la fuente, elevación de la pluma por empuje térmico o forzante mecánico, penetración parcial de la pluma en capas de inversión elevadas, interacciones con el terreno en la escala sub-reticular así como también remoción de contaminantes (por depósito seco o por remoción húmeda), transformaciones químicas, cortante vertical del viento, transporte sobre el agua y efectos de interacción con la costa. Permite ubicar fuentes puntuales de emisión y también de área. La mayoría de los algoritmos contiene opciones para tratar procesos físicos en diferentes niveles de detalle dependiendo de la aplicación del modelo.

*Depósito seco:* El CALPUFF posee un módulo basado en la analogía eléctrica que utiliza resistencias para el cálculo de tasas de deposición seca de gases y partículas en función de parámetros geofísicos, condiciones meteorológicas y especies contaminantes. El programa permite al usuario modificar las velocidades de depósito a lo largo del día para ser usadas con uno o más contaminantes en lugar del modelo de las resistencias (es decir para un estudio de sensibilidad) ó para despreciar completamente el submodelo de depósito seco si la especie en cuestión no se encuentra sujeta a remoción seca.

*Depósito húmedo:* El CALPUFF utiliza coeficientes de lavado empíricos para calcular los flujos de depósito húmedo debido al efecto de la precipitación. Los coeficientes de lavado se presentan en función del contaminante y del tipo de precipitación (i.e., precipitación líquida o sólida).

*Transformaciones químicas:* El CALPUFF incluye una opción que permite parametrizar efectos de transformaciones químicas usando un esquema de 5 especies ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{\pm}$ ,  $\text{NO}_x$ ,

$\text{HNO}_3$  y  $\text{NO}_3^-$ ) empleado en el modelo MESOPUFF II, un esquema modificado de 6 especies ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$  y  $\text{NO}_3^-$ ) adaptado del método RIVAD/ARM3, ó un grupo de especies determinado por el usuario con tasas de transformación que varían a lo largo del día. En este trabajo, las concentraciones se estimaron con los mecanismos MESO-PUFF II.

*Tratamiento de terreno complejo en escala sub-reticular:* El módulo de terreno complejo en CALPUFF está basado en una aproximación utilizada en el Modelo de Dispersión de Terreno Complejo (CTDMPLUS) (Perry y otros, 1989). La posibilidad de que la pluma impacte en una colina en la escala de la sub-grilla es evaluada usando una línea de corriente divisoria ( $H_d$ ) para determinar qué material contaminante es desviado a los costados de la colina (debajo de  $H_d$ ) y qué material es advectado por encima de la colina (a alturas mayores que  $H_d$ ). Los “puffs” individuales son separados en tres secciones para estos cálculos como se muestra en la Figura 5.4.

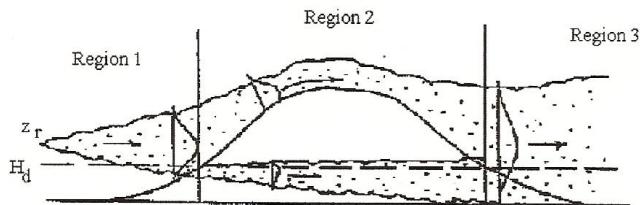


Figura 5.4: Ilustración de las regiones en que se separa el flujo por encima y por debajo de la línea de corriente divisoria de altura  $H_d$  y descripción cualitativa de la distribución de los contaminantes alrededor de una colina.

*Funciones de exploración de “puff”:* El CALPUFF incluye un grupo de rutinas para el muestreo de “puffs”, las cuales buscan solucionar las dificultades computacionales generadas en la aplicación de un modelo de este tipo en sitios cercanos a la fuente de emisión. Utiliza una función de exploración de “puff” elongado (“slug”) en lugares cercanos a la fuente en caso de condiciones meteorológicas que varían rápidamente. Durante condiciones menos demandantes se aplica una función de “puff” integrada. Ambas técnicas reproducen exactamente el resultado de una pluma continua bajo condiciones de estado estacionario.

*Efecto de la cortante del viento:* El CALPUFF contiene un algoritmo opcional para la bifurcación del “puff” que permite simular efectos de la cortante del viento en un “puff”

individual (Fig. 5.5). En los “puffs” generados a partir del “puff” original ocurren distintas tasas de transporte y dispersión, las cuales bajo ciertas condiciones, pueden incrementar substancialmente la tasa de crecimiento horizontal efectiva de la pluma.

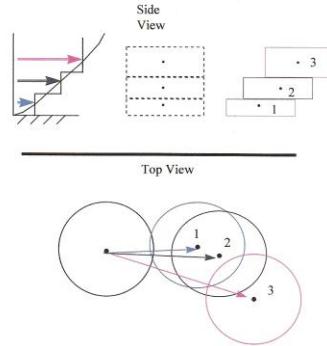


Figura 5.5: Mecanismos de división de un “puff” y los efectos resultantes en su transporte

*“Downwash” por edificios:* Los modelos de Huber y Snyder (1982) y Schulman y Scire (1980) están incorporados en el CALPUFF. El modelo provee una opción para usar alguno de los dos modelos para todas las chimeneas o ir eligiendo uno u otro para cada chimenea y para cada sector de viento. Ambos algoritmos han sido implementados de manera tal de permitir el uso de las dimensiones específicas del edificio en la dirección del viento. La Figura 5.6 ilustra los efectos de flujo alrededor de un edificio.

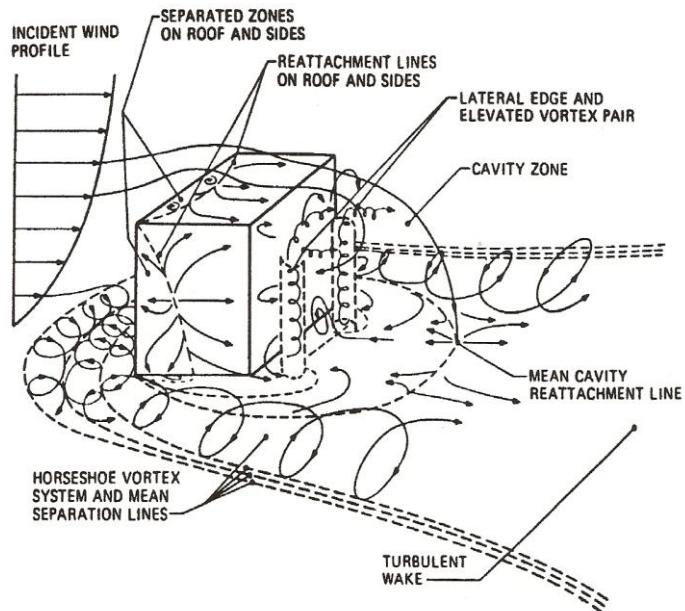


Figura 5.6: Flujo alrededor del edificio (de Hosker, 1984)

*Efectos sobre el agua y de interacción con la costa:* Debido a que el CALMET contiene algoritmos para la capa límite sobre el agua y sobre tierra, los efectos de dispersión, del transporte de la pluma y de depósito sobre un cuerpo de agua pueden ser simulados con el CALPUFF. La formulación del CALPUFF está diseñada para manejar cambios espaciales en condiciones meteorológicas y de dispersión, incluyendo cambios abruptos como los que ocurren en las costas de grandes cuerpos de agua.

*Coeficientes de dispersión:* El CALPUFF provee distintas opciones para el cálculo de los coeficientes de dispersión, incluyendo el uso de mediciones de turbulencia ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_w$ ); de la teoría de la semejanza para estimar  $\sigma_v$  y  $\sigma_w$ ; de estimaciones de flujos de calor y cantidad de movimiento; de los coeficientes de Pasquill-Gifford (PG) o McElroy-Pooler (MP) y como última opción las ecuaciones de dispersión basadas en el Modelo de Dispersión de Terreno Complejo (CDTM). El CALPUFF también brinda opciones para aplicar correcciones sobre los tiempos de promedio o ajustes del parámetro de rugosidad para los coeficientes de PG.

#### *5.1.4 Módulo Post-procesador de los campos de concentraciones*

El programa CALPOST es un post-procesador diseñado para promediar y extraer los resultados de concentraciones o flujos de depósitos húmedo y seco basados en la información horaria almacenada en el archivo de salida del CALPUFF. Puede seleccionarse un amplio rango de tiempos de promedio y los resultados pueden ser presentados en diferentes formatos (tablas y gráficos). El programa incluye, entre otras cosas, las siguientes opciones:

- Seleccionar el período a procesar, los tiempos de promedio, las especies químicas y las unidades en las que se informarán las concentraciones o los flujos de depósito.
- Incluir receptores en forma de grilla, receptores discretos y receptores en terreno complejo en cualquier combinación; seleccionar subconjuntos de los receptores en forma de grilla y discretos; producir archivos de series de tiempo de concentraciones/flujos de depósito promediados para días particulares seleccionados por el usuario y producir archivos gráficos de concentraciones/flujos de depósito para un día particular.

## **5.2 Casos de estudio**

### *5.2.1 Selección de casos de estudio*

Para este trabajo se seleccionaron dos casos de estudio diferentes. El primero correspondió a una situación meteorológica asociada al pasaje de un frente frío sobre el AMBA. En el segundo caso, se eligió un día en el cual las condiciones meteorológicas estuvieron dominadas por un sistema de alta presión ubicado sobre la provincia de Buenos Aires. El objetivo fue el de determinar la influencia de distintos entornos sinópticos en la dispersión de los contaminantes.

La primera situación corresponde al día 23 de noviembre de 2001, en este caso, con un forzante sinóptico importante, las condiciones del tiempo eran inestables y con vientos intensos, por lo que es de esperar la obtención de concentraciones de contaminantes menores. En este día se registraron precipitaciones acumuladas diarias que variaron entre 28 y 47 mm en las estaciones meteorológicas del AMBA.

El día 15 de enero de 2002 corresponde a una situación en la que un anticiclón se encontraba situado sobre la región de estudio. Se eligió este caso en particular debido a que un sistema de alta presión se caracteriza por condiciones de buen tiempo, divergencia de vientos en superficie, baja velocidad del viento o calma y subsidencia en altura. Todas estas características dan como resultado, generalmente, un bajo índice de ventilación favoreciendo la probabilidad de valores altos en la concentración de contaminantes.

El modelo CALMET fue corrido con dos tipos de datos meteorológicos distintos para ambas situaciones sinópticas. Por un lado se utilizaron datos meteorológicos provenientes de observaciones en superficie que fueron complementados con datos meteorológicos de altura de los radiosondeos de Ezeiza y, por otro lado se alimentó al CALMET con los resultados de simulaciones del modelo atmosférico BRAMS, los cuales debieron ser adaptados a un formato apropiado para que pudiesen ser leídos por el CALMET.

### *5.2.2 Campos meteorológicos obtenidos de BRAMS*

El modelo BRAMS (versión brasileña del modelo RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)) fue desarrollado en la Universidad de Colorado, Estados Unidos (Pielke y otros, 1992; Cotton y otros, 2003) y adaptado como resultado de investigaciones y aplicaciones en Brasil, mayormente en la Universidad de San Pablo y en el Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Este modelo ha sido aplicado en el estudio de distintos fenómenos en Sudamérica y Argentina (Ulke y otros, 2001; Nicolini y otros, 2002; Nicolini y otros, 2005 a y b; Ruiz, 2004; Salio y otros, 2005; Saulo y otros, 2007, García Skabar, 2007). Ha demostrado habilidad en la representación de circulaciones inducidas por la inhomogeneidad del terreno.

El modelo es no-hidrostático y tiene capacidad de anidado interactivo en dos vías. De esta manera, representa fenómenos atmosféricos en diferentes escalas, ya sea en forma explícita o mediante parametrizaciones. Los procesos físicos que se encuentran representados por distintas parametrizaciones, incluyen radiación, convección, turbulencia e interacción con la superficie.

En el presente trabajo, se utilizó coordenada vertical que sigue el terreno (Trípoli y Cotton, 1982). En las retículas de menor resolución, la convección profunda se parametrizó utilizando la formulación de Grell con cierre de Grell (Grell, 1993; Grell y Devenyi, 2002) y la convección somera mediante la representación desarrollada por Souza y Silva (2002). Los

procesos radiativos se simularon mediante la formulación de Chen y Cotton, (1988). Los procesos en la interfase suelo-atmósfera se representan en BRAMS mediante un modelo de pronóstico de la temperatura y del contenido de humedad del aire, de la cobertura vegetal y del suelo. Incluye además los intercambios de energía y agua entre las distintas componentes y con la atmósfera (Walko y otros, 2000). La turbulencia sub-reticular se simuló con los esquemas de Mellor y Yamada (1982) en la vertical y de Smagorinsky (1963) en la horizontal. La microfísica se trató con un modelo “bulk” de siete categorías. Esto es importante en el primer estudio de caso, ya que se produjo precipitación, la cual es utilizada en el proceso de remoción húmeda de los contaminantes.

Las simulaciones se configuraron con tres retículas anidadas con resoluciones horizontales de 40, 10 y 2,5 km respectivamente y 35 niveles en la vertical. La capa más cercana a la superficie tuvo un espesor de 20 m y los espesores se aumentaron de modo de lograr una buena resolución vertical en la capa límite atmosférica. El tope del modelo se fijó en 19 km. En el suelo se utilizó 9 niveles, hasta una profundidad de 2 m. Las simulaciones se realizaron en proyección estereográfica polar, con el polo coincidiendo con el centro del dominio. La Figura 5.7 ilustra las regiones abarcadas por cada retícula.

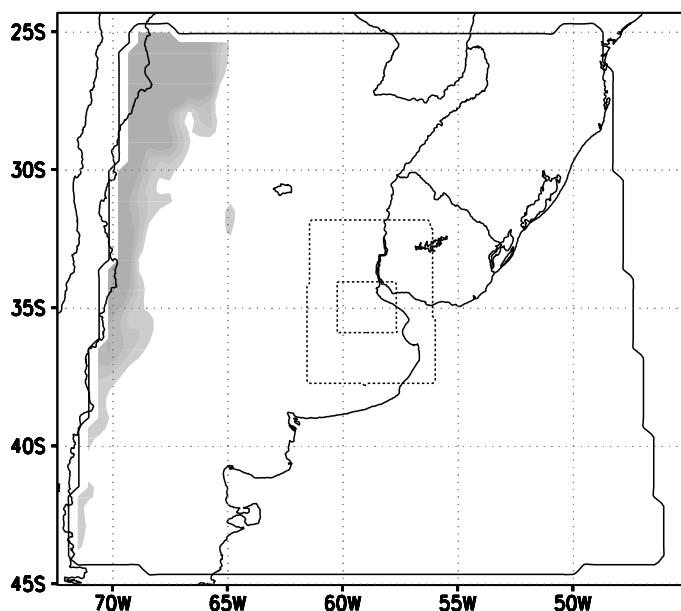


Figura 5.7: Límites de los dominios utilizados (los dominios internos corresponden a las regiones de alta resolución) y topografía en m (sombreado) para alturas mayores a 1500m. Resolución: dominio externo 40km, dominio intermedio 10km, dominio interno 2,5km.

Las condiciones meteorológicas iniciales y de contorno se obtuvieron del sistema Global Data Assimilation System (GDAS) del National Centers for Environmental Prediction (NCEP), los cuales tienen una resolución horizontal de 1° y vertical de 26 niveles y temporal de 6 horas. Los datos de topografía, con una resolución de 30'', provienen del United States Geological Survey (USGS). Los archivos de uso de suelo o cobertura vegetal, con resolución de 1 km, son del International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) (<http://edcdaac.usgs.gov/glccc>). Los tipos de suelo son de la FAO/UNESCO (Food and Agricultural Organization/United Nations Educational Scientific and Cultural Organization) (<http://daac.gsfs.nasa.gov>), con una resolución de 50 km. El modelo BRAMS puede ser inicializado considerando un contenido de humedad heterogéneo en todo el dominio. Los datos provienen de un modelo que la evalúa en base a la precipitación observada por sensores remotos (Gevaerd y Freitas, 2006). Se consideró datos de la temperatura de la superficie del mar semanal de los archivos Optimum Interpolation Weekly Sea Surface Temperature V2 de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Las simulaciones se extendieron por 48 horas. En ambos estudios de caso se consideraron diferentes horas para comenzar la simulación numérica a fin de analizar el impacto de las condiciones iniciales en la representación del estado atmosférico en el día en que interesaba aplicar el modelo de dispersión. Los campos obtenidos con BRAMS que se utilizan en este trabajo corresponden, en el caso del 23 de noviembre de 2001, a la corrida se inicializó a las 00 UTC mientras que en el del 15 de enero de 2002, a la que comenzó a las 12 UTC del 14 de enero. Si bien se conoce que los análisis de las 12 UTC cuentan con mayor cantidad de observaciones de altura asimiladas en la región, en el caso del 23 de noviembre, los campos modelados presentaron mayor consistencia con los análisis realizados en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2001, 2002).

Los campos de variables relevantes para estudiar si BRAMS representaba adecuadamente el entorno sinóptico se muestran para la retícula de menor resolución (40 km), algunos resultados en la retícula intermedia (10 km) contribuyen a la interpretación del comportamiento de las plumas de contaminantes, mientras que los resultados obtenidos en el dominio de mayor resolución (2,5 km) se utilizan como datos de entrada al CALMET, luego de colocarlos en el formato adecuado. Esto incluye la transformación a la retícula y a la proyección utilizada por CALPUFF y se realizó con un programa adaptado para procesar las salidas de BRAMS.

### *5.2.3 Datos observados en estaciones SMN*

Se utilizaron datos meteorológicos de observaciones horarias en superficie de módulo y dirección del viento, temperatura, humedad relativa, presión, altura de base de nube y nubosidad correspondientes a las estaciones Palomar ( $34^{\circ}36'S$ ;  $58^{\circ}36'O$ ), San Fernando ( $34^{\circ}16'S$ ;  $58^{\circ}21'O$ ), Aeroparque Aero, Ezeiza Aero , Observatorio Central, La Plata ( $34^{\circ}57'S$ ;  $57^{\circ}54'O$ ), Don Torcuato ( $34^{\circ}17'S$ ;  $58^{\circ}22'O$ ) y San Miguel ( $34^{\circ}32'S$ ,  $58^{\circ}40'O$ ) del Servicio Meteorológico Nacional (Fig. 5.8). Se realizó un análisis de consistencia de los datos sin encontrar ningún dato erróneo en los dos días de estudio.

Para los datos de altura, el programa cuenta con un pre-procesador que extrae y procesa datos de viento y temperatura, cuyo formato se corresponde con los datos de radiosondeo NCDC TD-6201 ó NCDC CD-ROM FSL (<http://raob.fsl.noaa.gov/Welcome.cgi>). En la estación meteorológica Ezeiza Aero se realiza un único radiosondeo por día a las 12 UTC, pero el modelo CALMET requiere como mínimo 2 observaciones por día. Los perfiles verticales de las distintas variables correspondientes a las 00 UTC fueron obtenidos de las salidas post-procesadas de los archivos FNL disponibles en NOAA para el Hemisferio Sur (Stunder, 1997). Los archivos denominados en forma abreviada FNL son los que provee el ARL (Air Resources Laboratory) de la NOAA. En este laboratorio se utilizan las salidas del GDAS y se encuentran disponibles para las cuatro horas sinópticas. A partir de estos archivos es posible extraer los valores de las componentes del viento, geopotencial, temperatura, humedad relativa y velocidad vertical, en 13 niveles estándar de presión.

Ene 15, 2002  
00:00 LST(UTC-0300)

Surf Sta, Upper Air Sta

UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84

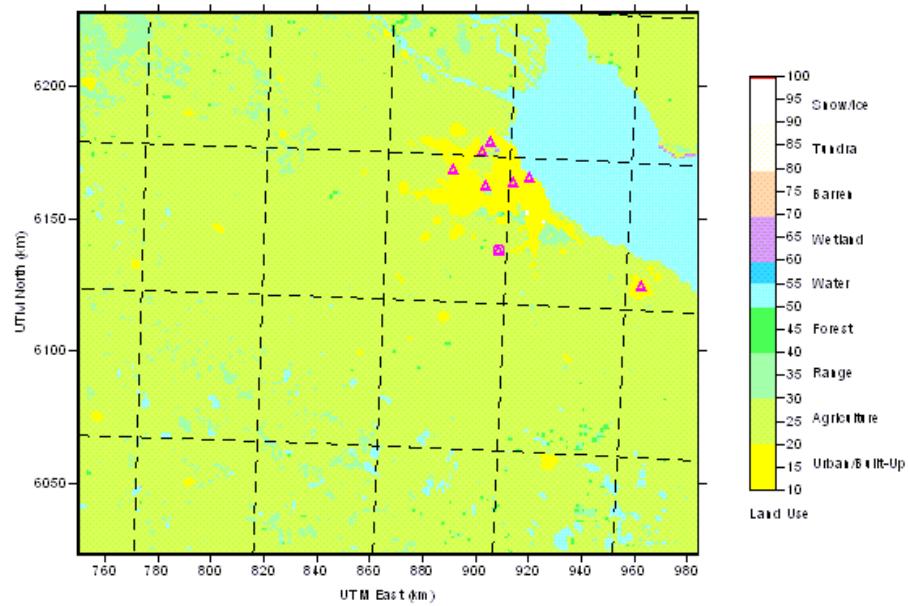


Figura 5.8: Ubicación de las estaciones de superficie dentro de la grilla de estudio.

### 5.3 Fuentes de Emisión

Se consideraron únicamente fuentes puntuales continuas fijas de emisión, específicamente, 37 chimeneas pertenecientes a las empresas del polo petroquímico conformado por las empresas Shell, Dapsa y Meranol y las centrales térmicas Dock Sud (ubicada en la zona en estudio) y Central Costanera (fuera del polo petroquímico pero de fuerte influencia sobre la región)(Fig. 5.9).



Figura 5.9: Ubicación de las fuentes puntuales de emisión (rojo) y estaciones de monitoreo de calidad de aire (amarillo) consideradas en el presente estudio.

La Tabla 5.1 indica las emisiones gaseosas de cada una de las 37 fuentes puntuales así como las características de las fuentes necesarias para el modelado.

Tabla 5.1: Ubicación y características de cada una de las fuentes de emisión

Fuente	Coordenadas UTM (ref. 20)			Te mp (K)	Ve l sal (m/s)	Di am (m)	NOx (g/s)	SO x (g/s)
	ES (Km)	TE (Km)	NOR TE (Km)					
costal	927 .36	6158. 77	86. 7	401 .0	8.6	6. 43	156.8 000	
costa2	927 .40	6158. 72	86. 7	401 .0	3.3	6. 43	93.50 00	
costa3	927 .43	6158. 61	97. 5	399 .0	14. 2	4. 80	187.1 000	
costa4	927 .53	6158. 59	154 .4	394 .0	10. 8	5. 42	143.0 000	
costa5	927 .48	6158. 71	50. 0	381 .0	7.4	6. 89	12.94 00	
costa6	927 .61	6158. 64	50. 0	311 .0	12. 6	7. 41	23.80 00	
costa7	927	6158.	50.	311	12.	7.	23.80	

	.64	62	0	.0	6	41	00	
Dock S1	927	6155.	45.	378	14.	7.	29.25	
	.00	59	0	.0	9	20	00	
Dock S2	927	6155.	45.	378	14.	7.	29.25	
	.04	60	0	.0	9	20	00	
chi1	928	6155.	90.	571		4.	5.773	9.6
	.44	11	0	.0	7.1	22	0	640
chi2	928	6155.	30.	477	12.	1.	6.235	3.2
	.33	36	0	.0	6	93	2	176
chi3	928	6155.	30.	491		1.	5.352	2.4
	.34	35	0	.0	9.3	70	5	120
chi4	928	6155.	40.	521	40.	2.	17.35	9.6
	.35	34	0	.0	8	80	40	802
chi5	928	6155.	38.	491		1.	0.142	0.0
	.15	58	0	.0	2.7	80	4	085
chi6	928	6155.	38.	491		1.	0.120	0.1
	.11	61	0	.0	2.7	80	4	204
chi7	928	6155.	38.	491		1.	0.166	0.2
	.10	62	0	.2	2.7	80	8	456
chi8	928	6155.	23.	484		1.	0.022	0.0
	.16	55	0	.2	1.5	17	2	033
chi9	928	6155.	23.	484		1.	0.046	0.0
	.17	55	0	.2	2.4	17	0	311
chi10	928	6155.	23.	484		1.	0.073	0.0
	.17	55	0	.2	2.4	17	0	169
chi11	928	6155.	23.	484		1.	0.024	0.0
	.17	55	0	.2	1.5	17	2	057
chi12	928	6155.	104	608	13.	1.	0.667	0.1
	.05	49	.0	.2	7	10	6	793
chi13	928	6155.	80.	497		2.	2.270	0.6
	.48	23	0	.2	8.5	09	6	135
chi14	928	6155.	80.	543		2.	2.302	0.7
	.47	24	0	.2	7.7	25	8	562
chi15	928	6155.	80.	551	13.	2.	14.73	5.5
	.54	16	0	.2	1	25	50	188
chi16	928	6155.	40.	650		1.	0.423	0.0
	.64	11	0	.0	6.2	30	5	056
chi17	928	6155.	40.	801	11.	1.	1.190	1.3
	.22	42	0	.0	8	44	8	661
chi18	928	6155.	40.	100	17.	1.	1.687	2.7
	.40	24	0	7.0	8	20	7	943
chi19	928	6155.	30.	473		1.	0.026	0.0
	.25	05	0	.2	0.8	80	4	143
chi20	928	6155.	45.	623		1.	0.165	0.0
	.22	01	0	.2	3.8	19	2	266
chi21	928	6154.	45.	623		1.	0.123	0.0
	.20	99	0	.0	2.2	45	2	270
chi22	928	6154.	45.	623		1.	0.164	0.0
	.20	99	0	.0	3.3	19	1	925

mera1	927 .35	6155. 93	64. 0	.313 .0	37. 1	0. 60		2.0 957
Dap1	928 .41	6154. 13	15. 0	425 .0		0. 2.4	0.031 70	9
Dap2	928 .79	6154. 48	14. 5	338 .9		0. 2.8	0.103 70	1
Dap3	928 .80	6154. 46	14. 5	425 .3	3.9	0. 70	0.027 4	
Dap4	928 .72	6154. 36	23. 0	659 .0		2. 0.5	0.017 00	1
Dap5	928 .93	6154. 57	15. 0	485 .1		0. 2.6	0.031 70	9
Dap6	928 .91	6154. 59	15. 0	703 .4		0. 2.3	0.030 70	0

Los contaminantes considerados para este estudio fueron NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> (cuya emisión se consideró igual a las emisiones declaradas de SOx) y se estudió el comportamiento de estos gases una vez emitidos a la atmósfera frente a las dos situaciones sinópticas seleccionadas.

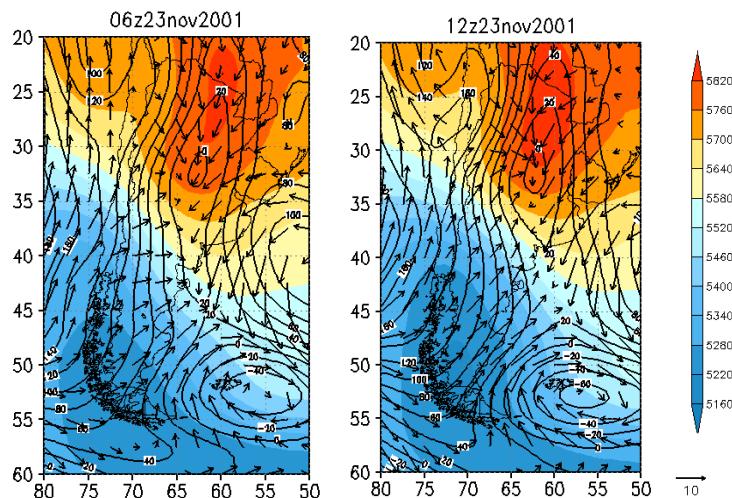
## 6. RESULTADOS

El análisis de la situación sinóptica de los días seleccionados se realizó a partir de los reanálisis del National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Kalnay y otros, 1996) (disponibles en [www.cdc.noaa.gov](http://www.cdc.noaa.gov))).

### 6.1 Estudio de Caso día 23 de Noviembre del 2001

#### 6.1.1 Análisis de la situación sinóptica

La Figura 6.1 presenta el campo de altura geopotencial y el viento correspondientes a la superficie isobárica de 1000 hPa y el campo de espesores 500/1000 hPa cada 6 horas.



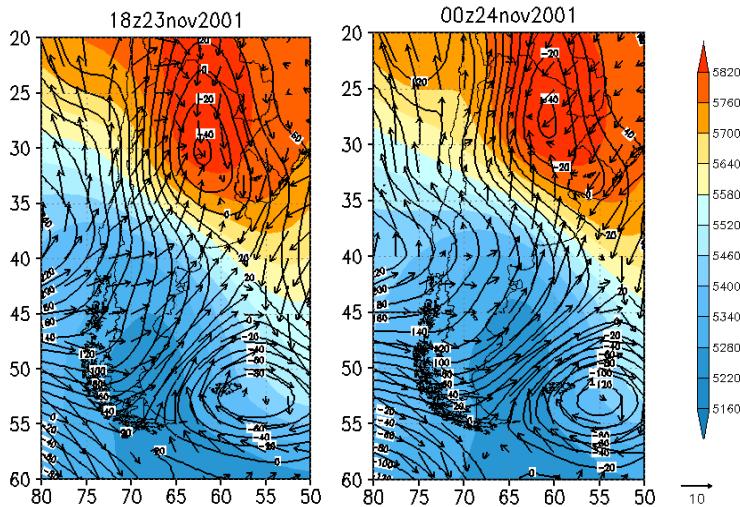


Figura 6.1: Geopotencial (mgp) (contorno) y viento (m/s) (vector) en 1000 hPa y espesor 500/1000 (mgp) (sombreado).

El geopotencial de 1000 hPa muestra dos intensos sistemas de baja presión, uno en el noreste argentino que alcanza valores menores a -40 mgp y el otro se encuentra ubicado en el sudoeste del océano Atlántico y alcanza valores de -120 mgp. Estos sistemas se irán intensificando y desplazando hacia el este con el transcurso del día a medida que ingresa al continente un anticiclón proveniente del océano Pacífico. En el campo de espesores 500/1000 hPa, se observa una zona baroclínica que indica la posición de un frente frío que progresó hacia el noreste. El campo de viento en 1000 hPa ubica la posición del frente en esa superficie isobárica.

El mapa sinóptico de superficie para las 12 UTC de este día producido por el Servicio Meteorológico Nacional muestra total coincidencia con el campo correspondiente obtenido para la misma hora a partir de los reanálisis del NCEP.

De acuerdo a lo informado por el SMN en sus boletines diarios, la precipitación acumulada entre el 23 a las 12 UTC y el 24 a las 12 UTC, fue de 43 mm en Ezeiza, 33mm en La Plata, 28 mm en Palomar, 39 mm en Don Torcuato, 30 mm en San Miguel, 37 mm en Aeroparque y 47 mm en Observatorio Central Buenos Aires.

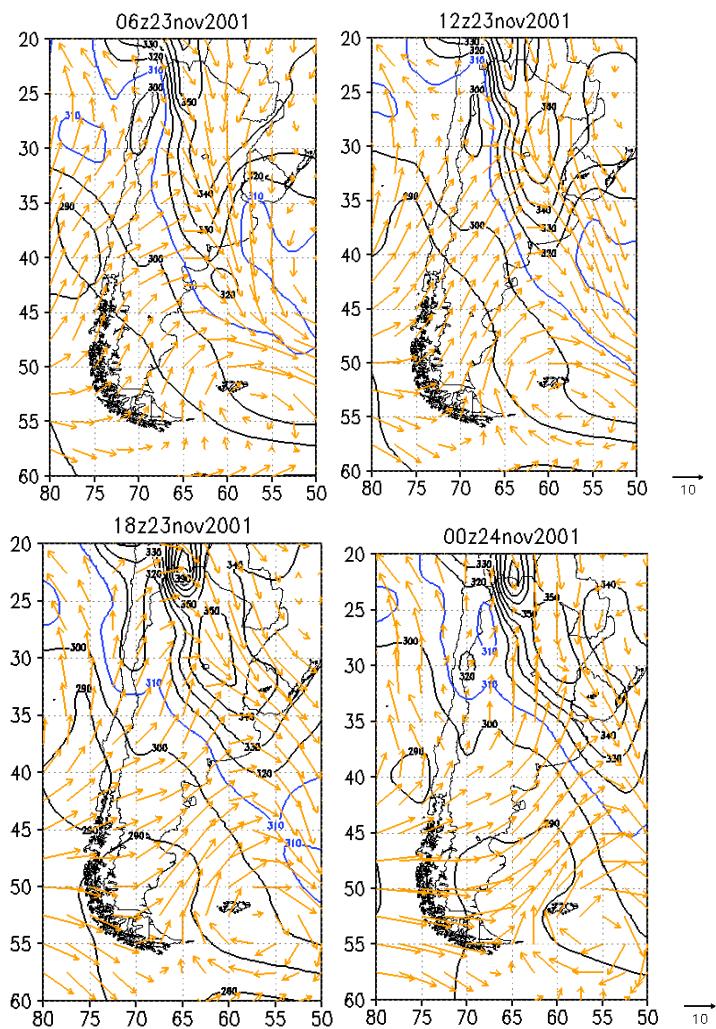


Figura 6.2. Temperatura potencial adiabática equivalente (K) (contorno) y viento en 850 hPa (m/s) (vector).

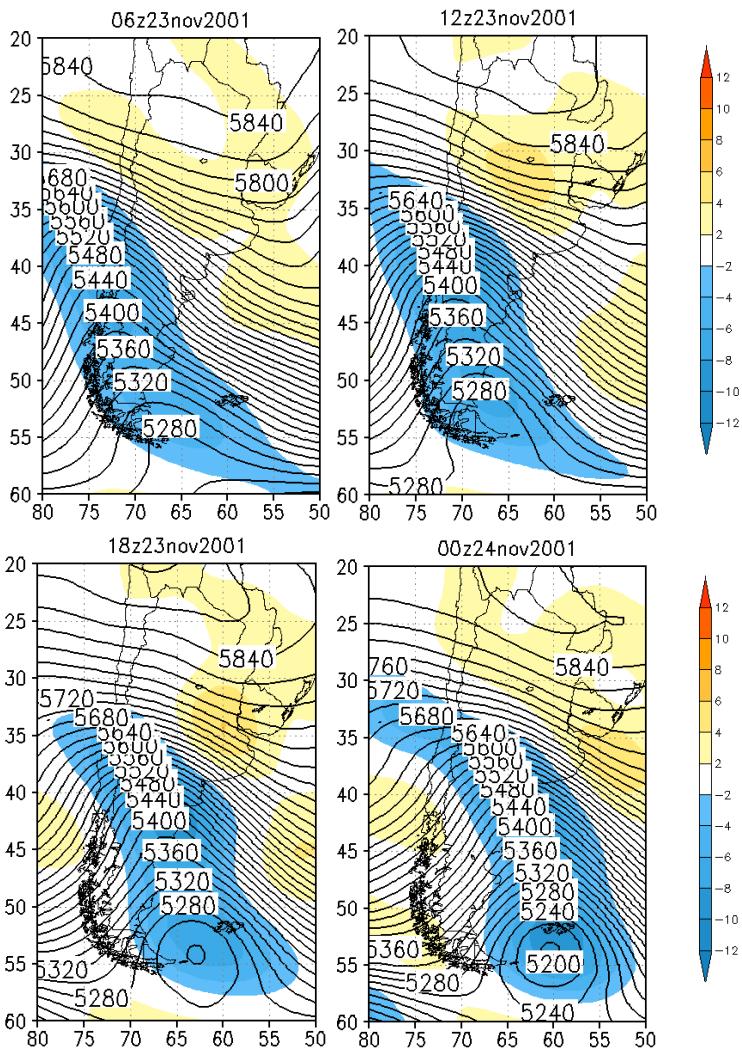


Figura 6.3: Geopotencial (mgp) (contorno) y vorticidad  $\times 10^{-5}$  (1/s) (sombreado) en 500 hPa

Durante este día, en el nivel de 850 hPa (Fig. 6.2), se observa un importante gradiente de temperatura potencial adiabática equivalente. Las isoentrópicas marcan la región de mayor contraste entre las masas de aire, sobre el centro y norte del país en dirección NO–SE. Este gradiente se encuentra asociado al mencionado frente frío que se puede ubicar en los campos de 1000 hPa (Fig. 6.1) en la región donde se quiebran los contornos y se produce la convergencia del viento en superficie. Este apretamiento de isoentrópicas (Fig. 6.3), con la masa de aire cálida y húmeda por delante del frente y la fría y seca por detrás, se intensificará con el transcurso del día a medida que el frente se desplaza hacia el NE, indicando que la zona

frontal atravesará la región de estudio el día 23 entre las tres de la tarde y nueve de la noche hora local, provocando así una rotación del viento en superficie (Fig. 6.1) que al comienzo del día posee una dirección noreste y una vez que se produce el pasaje del frente adquiere una dirección sud-sudoeste.

En 500 hPa (Fig. 6.3) el campo de geopotencial muestra una vaguada en altura asociada a la zona barocílnica de superficie pero desplazada hacia el oeste respecto de ésta, generando así una advección diferencial de vorticidad ciclónica que dará lugar a la intensificación de los sistemas de baja presión en superficie. Esta vaguada se intensifica con el transcurso del día a medida que se desplaza hacia el este.

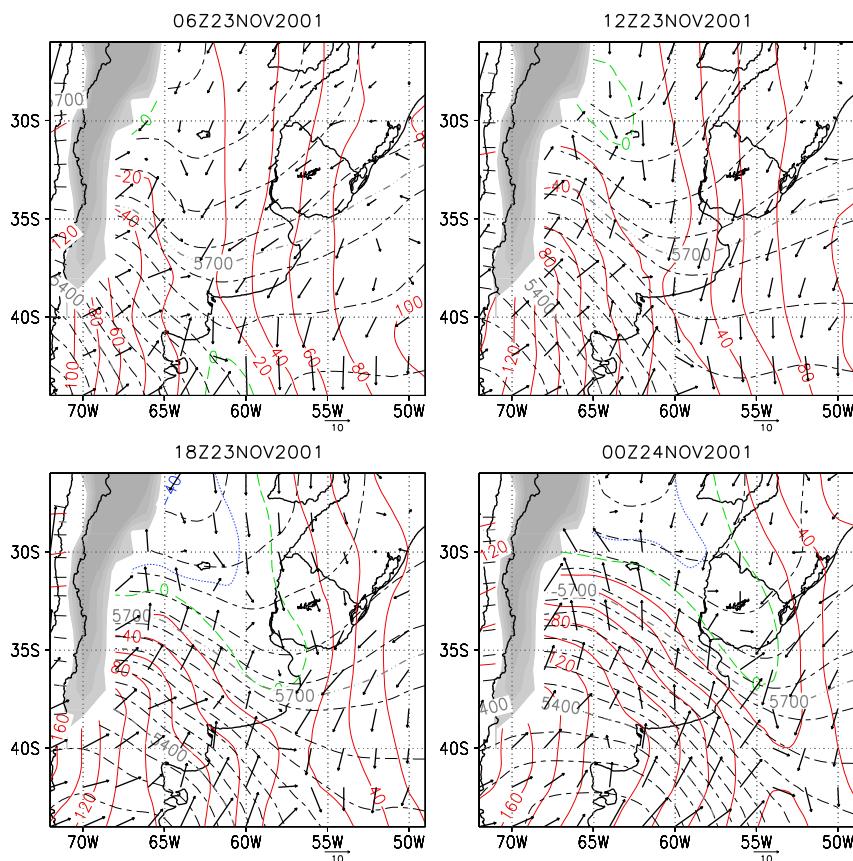


Figura 6.4: Geopotencial (mgp) (contorno color) y viento (m/s) (vector) en 1000 hPa y espesor 500/1000 (mfp) (contorno negro y gris).

Los campos de superficie obtenidos con BRAMS (Fig. 6.4) muestran concordancia con los de la Figura 6.1. La región de bajas presiones del continente se ubica levemente hacia el

noroeste y con menor intensidad en relación a la que se obtiene con los reanálisis. También simula adecuadamente el desplazamiento hacia el NE del anticiclón postfrontal. Los espesores 500/1000 hPa se encuentran ubicados en similar región y la progresión de la zona baroclínica asociada al frente es coincidente con la obtenida a partir de los reanálisis. El viento en escala sinóptica en el nivel de 1000 hPa en la zona de estudio y en las primeras horas de la simulación proviene del NE y luego rota hacia el NNE. En las horas de la tarde rota hacia el NO, hasta que con la llegada del frente frío gira al sud-sudoeste.

En el nivel de 850 hPa, se aprecia la zona de contraste entre masas de aire (Fig. 6.5). La progresión hacia el sudeste de la masa cálida y húmeda es mayor con BRAMS que lo que muestran los reanálisis, así como también los valores de la temperatura potencial adiabática equivalente. El viento en este nivel era del NO sobre la región de interés hasta que con el pasaje de la zona frontal rota al SW.

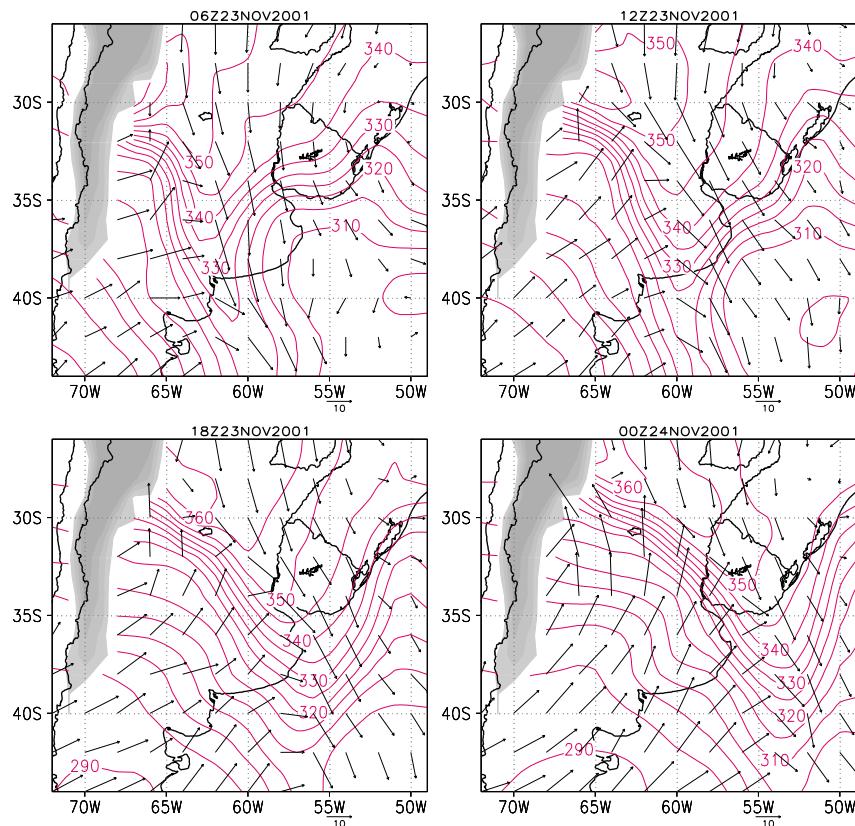


Figura 6.5. Temperatura potencial adiabática equivalente (K) (contorno) y viento en 850 hPa (m/s) (vector).

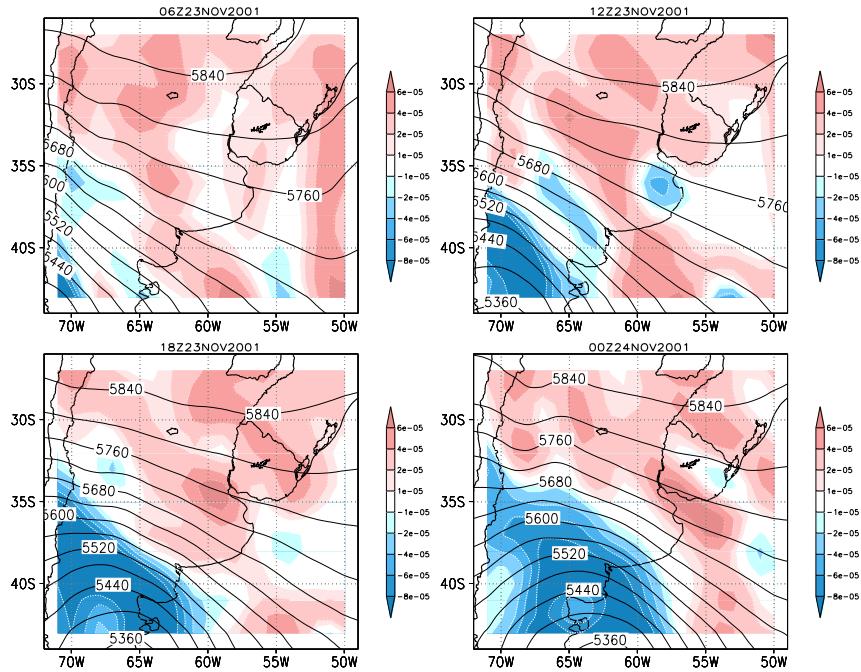


Figura 6.6: Geopotencial (mgp) (contorno) y vorticidad (1/s) (sombreado) en 500 hPa

En niveles medios de la atmósfera, el campo de geopotencial (Fig. 6.6) presenta también semejanza con el proveniente de los reanálisis en cuanto a la posición e intensidad de la vaguada asociada a la región baroclínica. Aparecen ondas cortas en los contornos debido a la mayor resolución del modelo en comparación con los reanálisis.

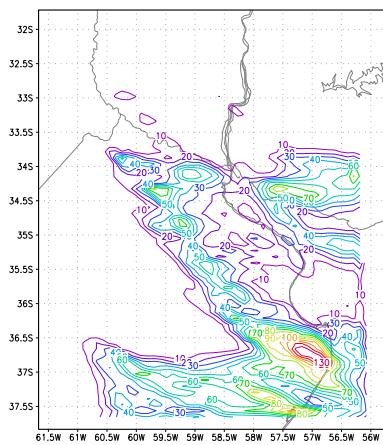


Figura 6.7: Distribución espacial de la precipitación diaria acumulada entre las 12 UTC del día 23 de noviembre y las 12 UTC del 24 de noviembre de 2001.

Si se comparan los valores de precipitación acumulada diaria estimados por BRAMS en la región del AMBA (entre 10 y 30 mm) con los observados (entre 28 y 47 mm), se aprecia una subestimación, que podría estar relacionada con una ubicación más hacia el Oeste de la zona frontal y de los máximos de precipitación (Fig. 6.7).

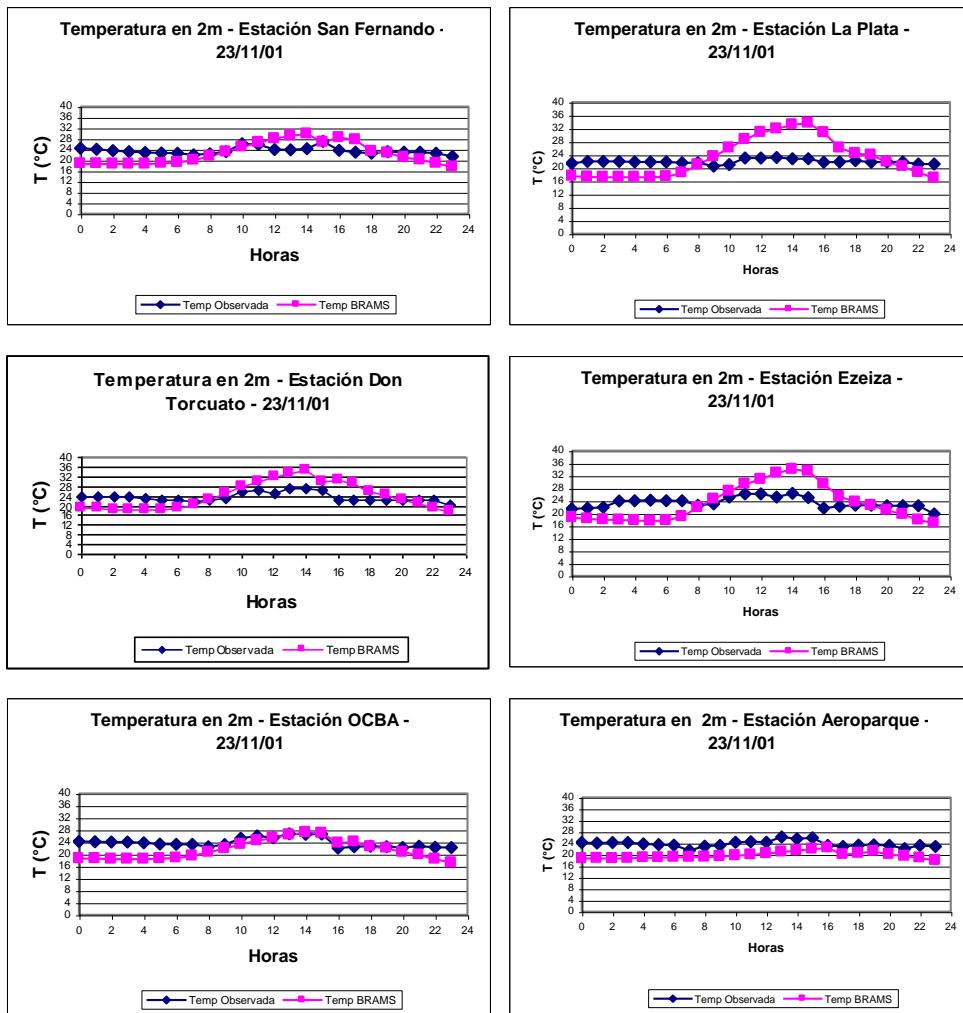


Figura 6.8: Series temporales de temperatura en superficie, para el día 23 de Noviembre, con datos observacionales y resultantes de BRAMS para las estaciones de San Fernando, La Plata, Don Torcuato, Ezeiza, OCBA y Aeroparque.

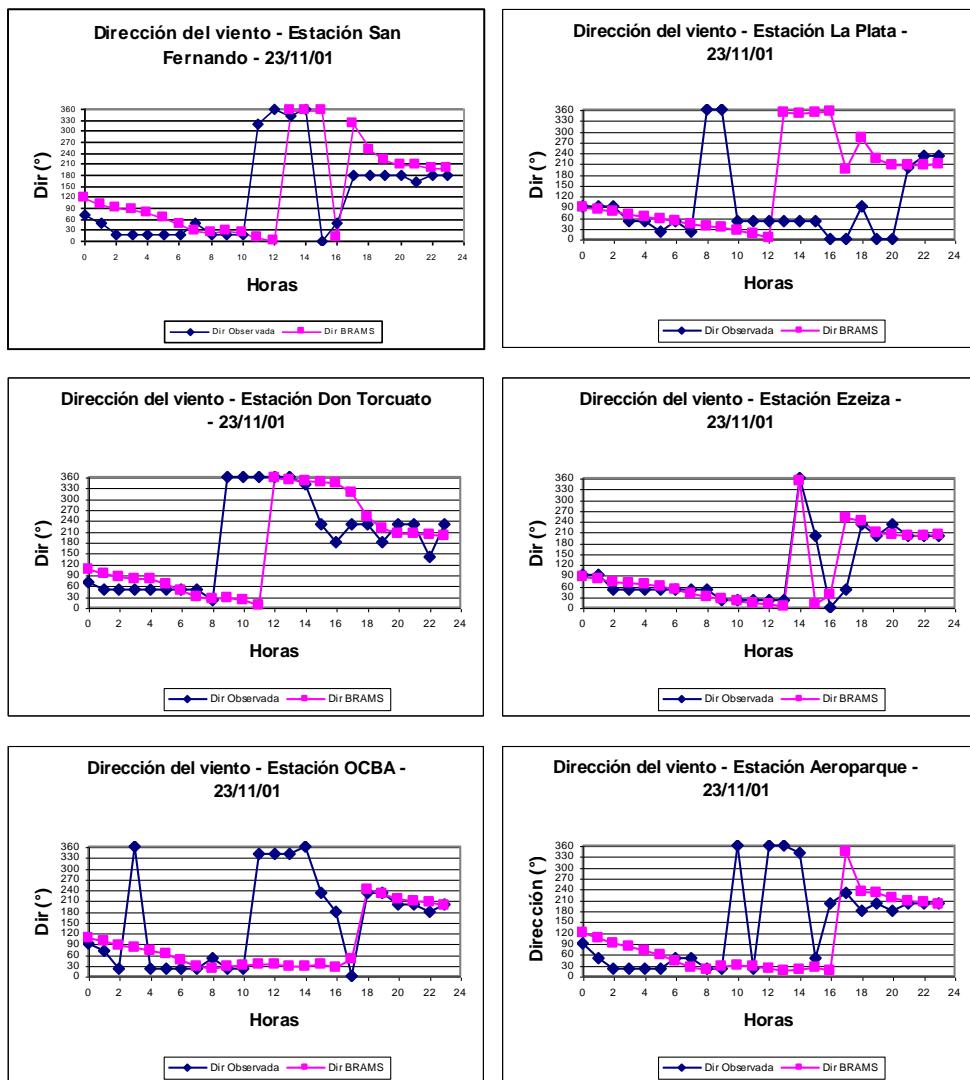


Figura 6.9: Series temporales de dirección del viento, para el día 23 de Noviembre, con datos observacionales y resultantes de BRAMS para las estaciones de San Fernando, La Plata, Don Torcuato, Ezeiza, OCBA y Aeroparque.

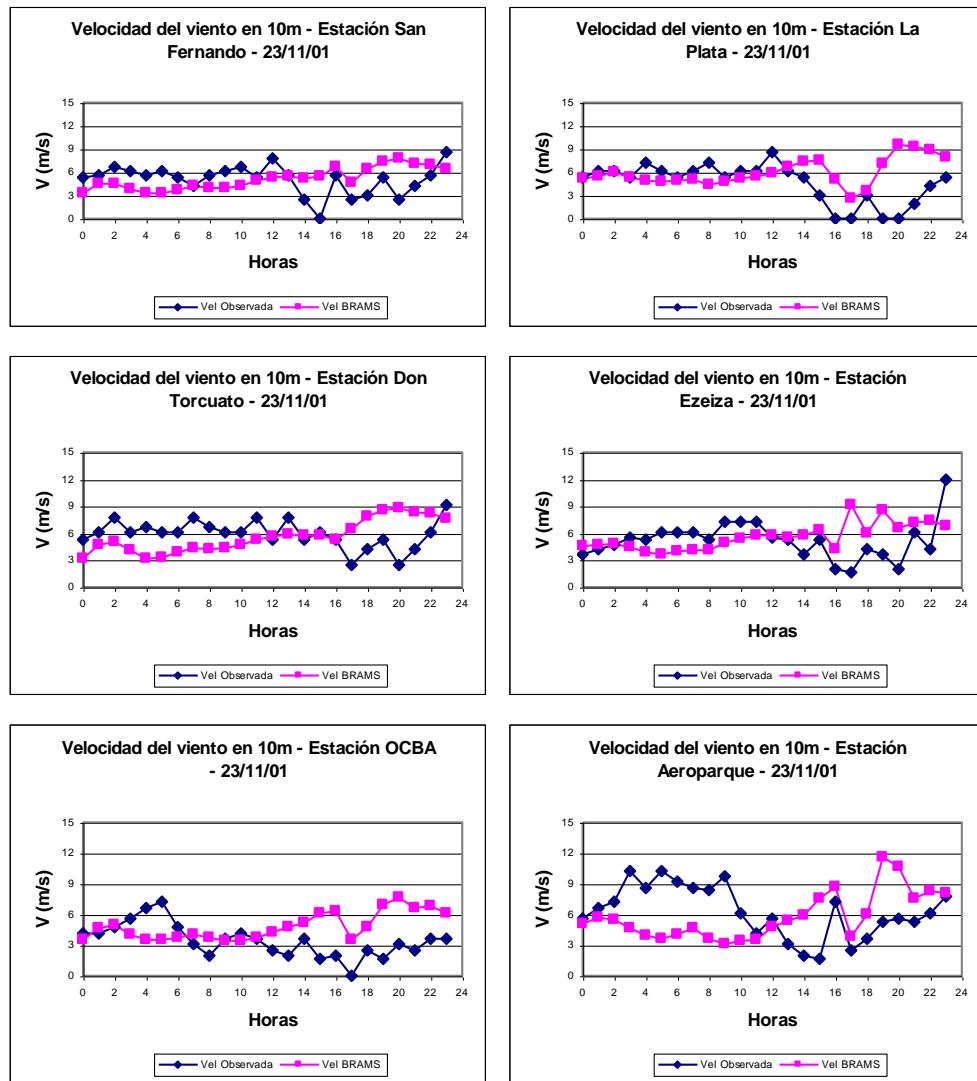


Figura 6.10: Series temporales de intensidad del viento, para el día 23 de Noviembre, con datos observacionales y resultantes de BRAMS para las estaciones de San Fernando, La Plata, Don Torcuato, Ezeiza, OCBA y Aeroparque.

Para el día 23 de noviembre, las ondas diarias de temperatura obtenidas a través del BRAMS y las observadas (Fig. 6.8) presentan algunas diferencias. Para todas las estaciones el modelo BRAMS sobreestima la temperatura mínima, y en las estaciones San Fernando, La Plata, Don Torcuato y Ezeiza sobreestima también la máxima. En Observatorio Central a la hora de la temperatura máxima ambas series (BRAMS y observada) coinciden y en Aeroparque el valor de la temperatura estimada por el modelo es, a lo largo de todo el día, inferior al observado.

En lo que respecta al comportamiento de la dirección del viento para el día 23 de noviembre (Fig. 6.9), se observa que para las estaciones San Fernando, Don Torcuato y Ezeiza, las direcciones estimadas por el BRAMS se aproximan en buena medida a las observadas. Alrededor de las 15 horas, en la estación Don Torcuato, el modelo estima un viento nor-noroeste mientras que los datos evidencian un viento sud-sudoeste.

Si bien a simple vista pareciera que para las estaciones Aeroparque y Observatorio los datos estimados por el modelo no coinciden con lo observado entre las 10 y las 14hs, el viento se mantiene del norte en ambos casos con una leve componente oeste para los datos observados y este para las direcciones estimadas. La estación La Plata sí presenta un comportamiento bastante distinto en la dirección del viento a partir de las 7hs.

En cuanto a la intensidad del viento (Fig. 6.10) se ve que, en las estaciones San Fernando, La Plata, Don Torcuato y Ezeiza, el modelo subestima la velocidad observada por la mañana y hasta el mediodía. Por la tarde las observaciones registran una disminución en la intensidad del viento mientras que el modelo estima un aumento en la intensidad.

En las estaciones Observatorio Central y Aeroparque, el comportamiento de las ondas a grandes rasgos es similar, es decir, en horas de la mañana el modelo subestima las intensidades de viento, mientras que hacia la tarde noche, en mayor o menor medida, las sobreestima.

En los campos simulados en el primer dominio anidado (no se muestran), se observa que el viento en la capa más cercana a la superficie es inicialmente del este y luego rota al NE y al norte. A las 14 UTC continua rotando hacia el NO y a las 19 UTC, la zona frontal, con orientación NO-SE se desplaza hacia el AMBA. El campo de movimiento se encuentra claramente perturbado por la presencia del frente y la actividad convectiva asociada. A las 20 UTC (Fig. 6.11 izq.) dicha zona se encuentra sobre la región de estudio. A las 22 UTC el frente en superficie ya atravesó el Río de la Plata y sobre AMBA el viento es el SO.

El campo de temperatura (Fig. 6.11 der.) por su parte muestra también las perturbaciones asociadas al entorno meteorológico relativamente complejo del caso seleccionado. La zona sobre el río presenta un mínimo de temperatura igual que la región frontal, debido a la presencia de nubosidad. Entre ambas regiones se aprecia una lengua de aire caliente asociada al flujo prefrontal. En consecuencia, los campos cercanos a la superficie se encuentran claramente perturbados por la actividad frontal, y es entonces esperable que el modelo presente diferencias con la información observada.

En cuanto a la velocidad de propagación del frente las simulaciones lo muestran perfectamente posicionado cuando se lo compara con el análisis de las 12 UTC del día 24 realizado por el SMN.

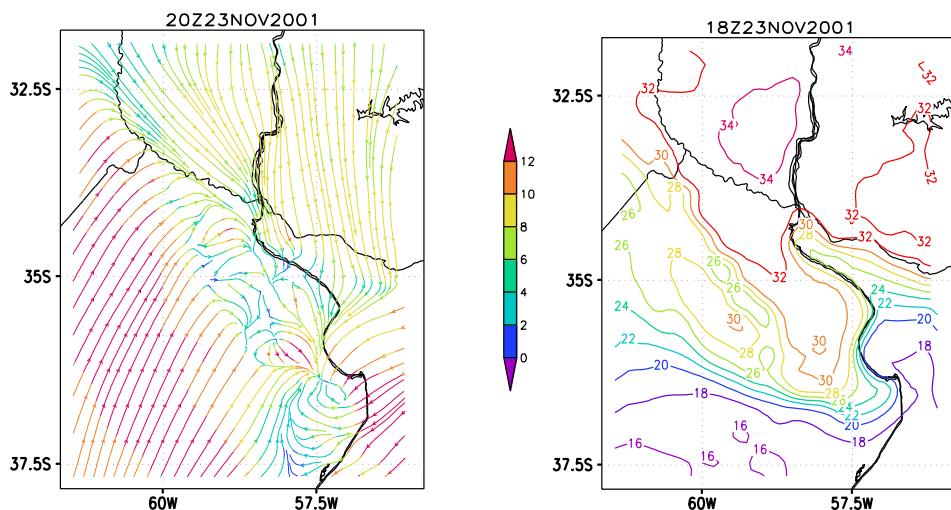


Figura 6.11: Campos de líneas de corriente para las 17 hora local (izquierda) y de temperatura para las 15 hora local (derecha), en la retícula de 10km

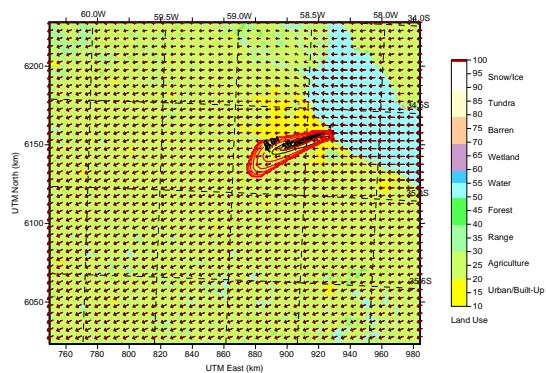
### *6.1.2 Simulación de la dispersión de contaminantes*

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones mediante el modelo CALPUFF, para las concentraciones de NOx y SO<sub>2</sub> en superficie.

El período que abarca la simulación es de 24 horas, entre las 00 y las 23 hora local. El dominio del modelo cubrió 235 km en la dirección zonal y 205 km en la dirección meridional. La resolución horizontal fue de 1 km y se discretizó en 12 niveles en la vertical (20, 50, 75, 100, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 2500 y 3000 m) además de la superficie para calcular depósito.

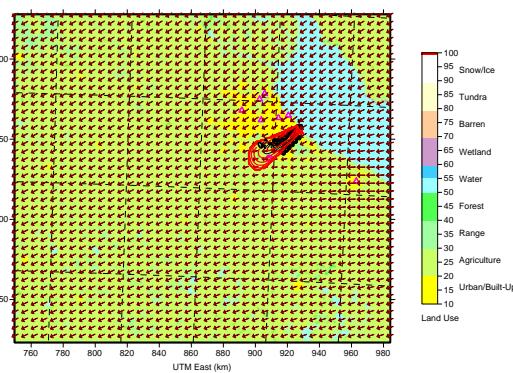
Nov 23, 2001  
00:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)



Nov 23, 2001  
00:00 LST(UTC-0300)

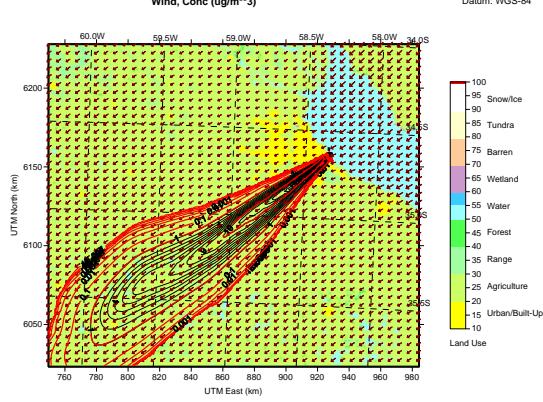
Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m\*\*3)



Nov 23, 2001  
03:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)

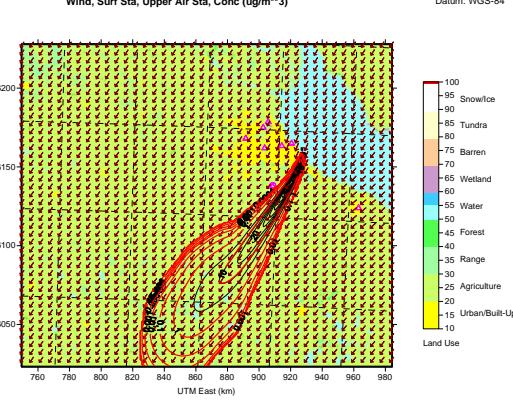
UTM Zone: 20 · Hemisphere: S · Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
03:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m\*\*3)

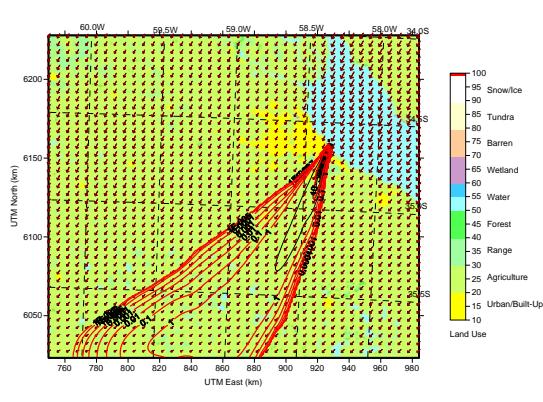
UTM Zone: 20 · Hemisphere: S · Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
06:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)

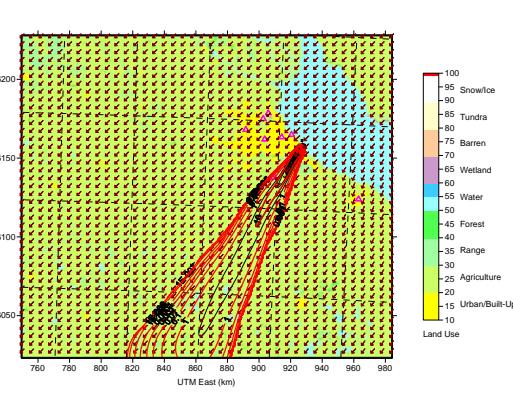
UTM Zone: 20 · Hemisphere: S · Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
06:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m\*\*3)

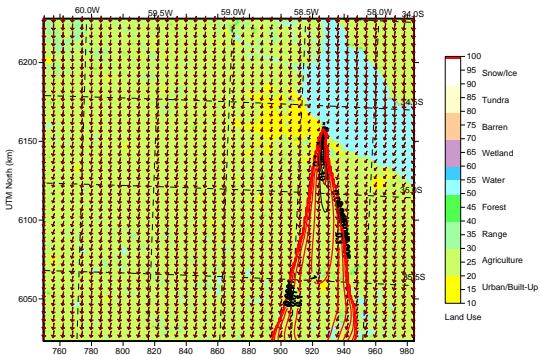
UTM Zone: 20 · Hemisphere: S · Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
09:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)

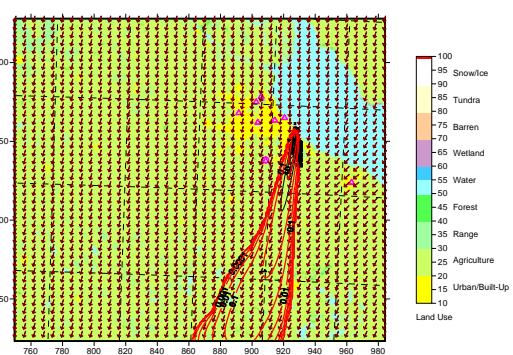
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
09:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m\*\*3)

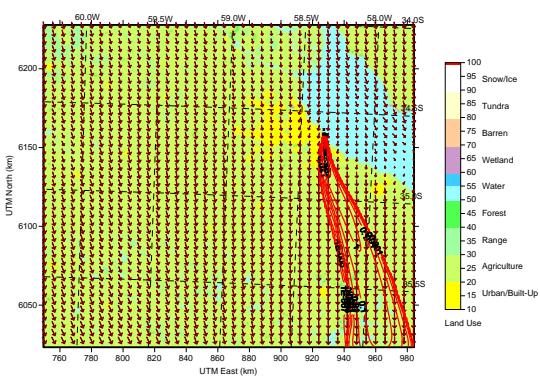
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
12:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)

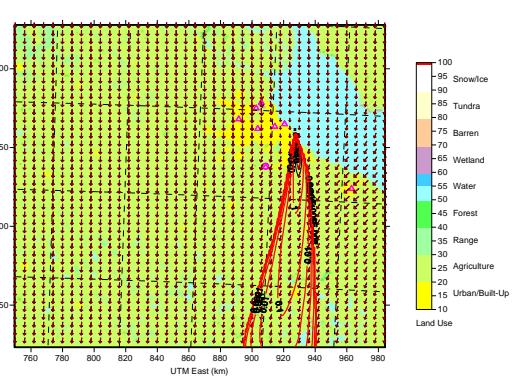
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
12:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m\*\*3)

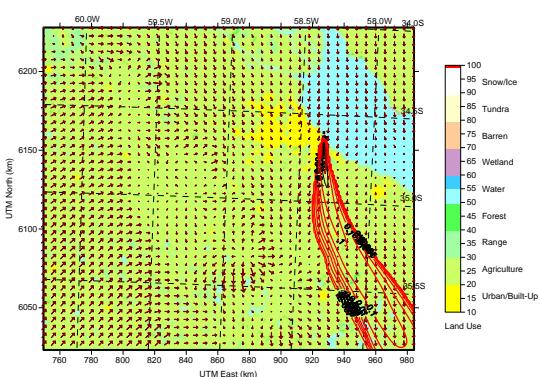
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
15:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)

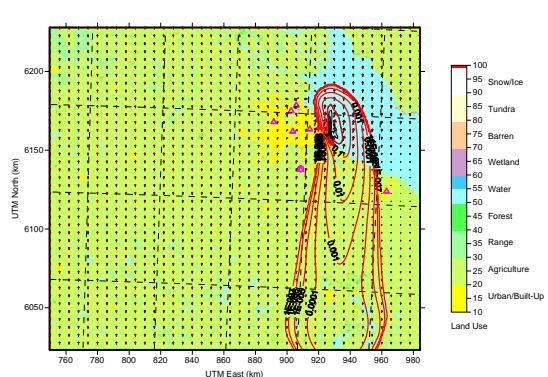
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
15:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m\*\*3)

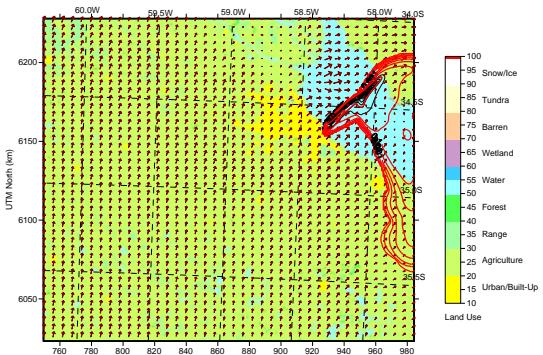
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
18:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)

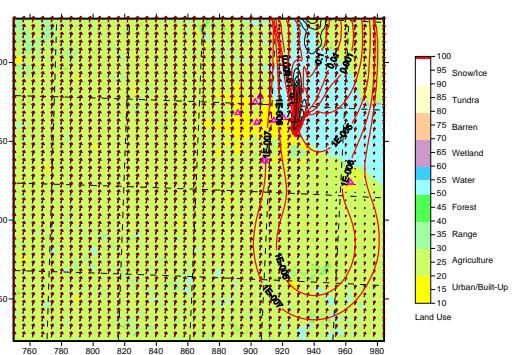
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
18:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m\*\*3)

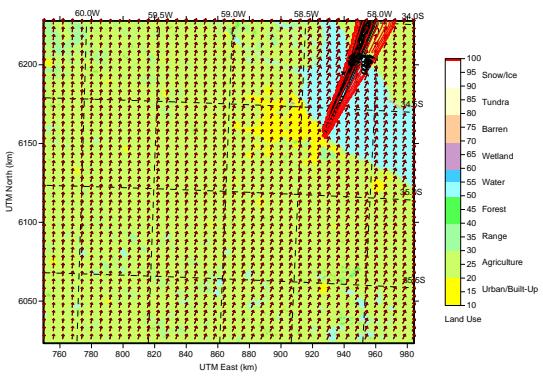
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
21:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)

UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
21:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m\*\*3)

UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84

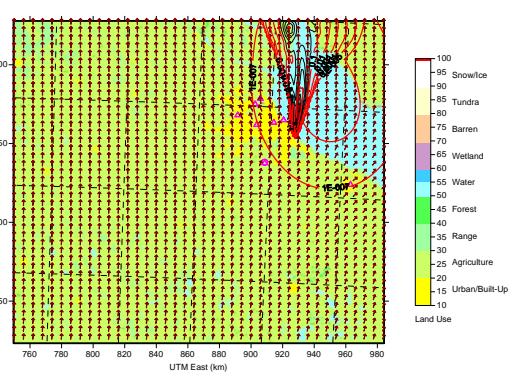
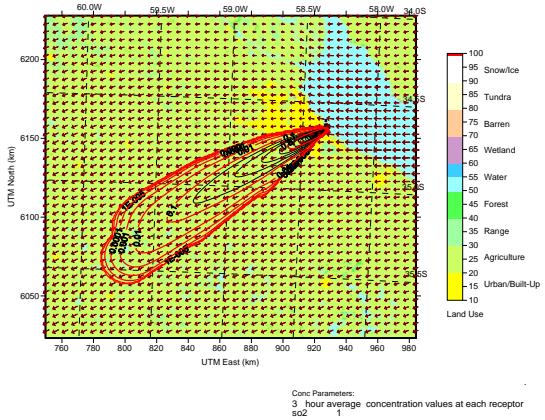


Figura 6.12: Concentraciones horarias de NO<sub>x</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (contornos) y viento (m/s) en superficie (vectores) para el día 23 de noviembre de 2001. Panel izquierdo: corrida #1. Panel derecho: corrida #2.

Nov 23, 2001  
00:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

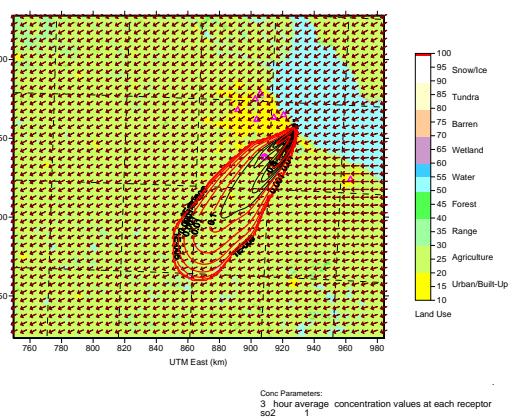
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
00:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
03:00 LST(UTC-0300)

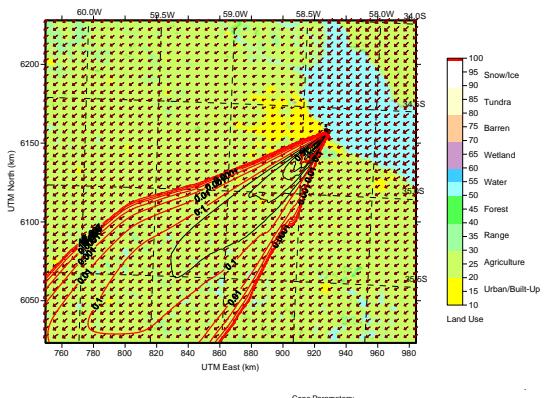
Wind, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84

Nov 23, 2001  
03:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
03:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84

Conc Parameters:  
3 hour average concentration values at each receptor  
so2 1

Conc Parameters:  
3 hour average concentration values at each receptor  
so2 1

Nov 23, 2001  
06:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84

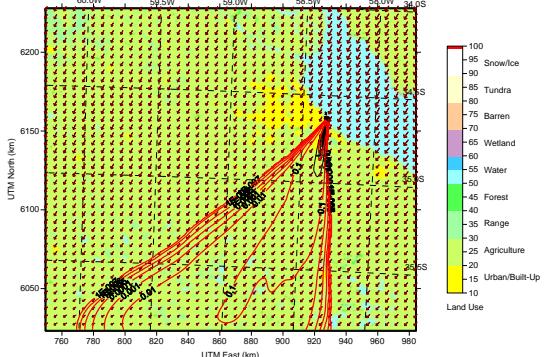
Nov 23, 2001  
06:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84

Conc Parameters:  
3 hour average concentration values at each receptor  
so2 1

Conc Parameters:  
3 hour average concentration values at each receptor  
so2 1



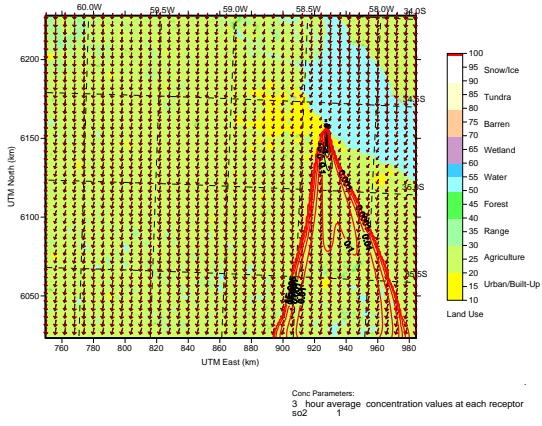
Conc Parameters:  
3 hour average concentration values at each receptor  
so2 1

Conc Parameters:  
3 hour average concentration values at each receptor  
so2 1

Nov 23, 2001  
09:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

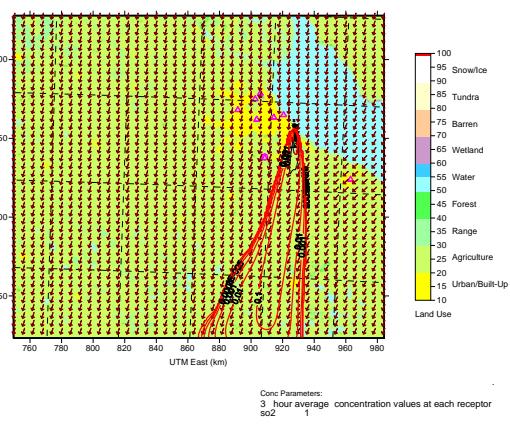
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
09:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

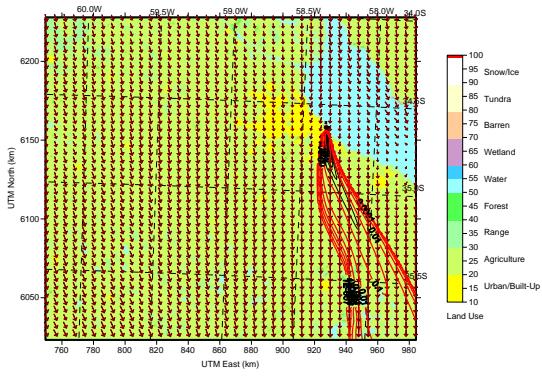
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
12:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

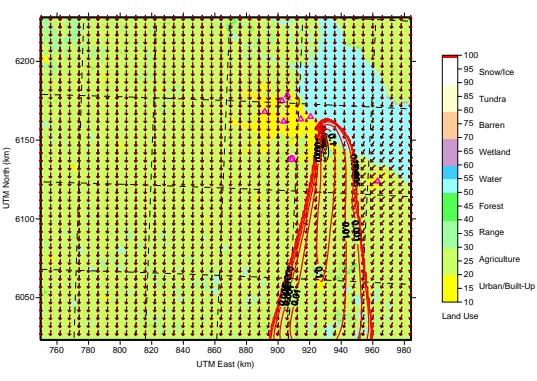
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
12:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

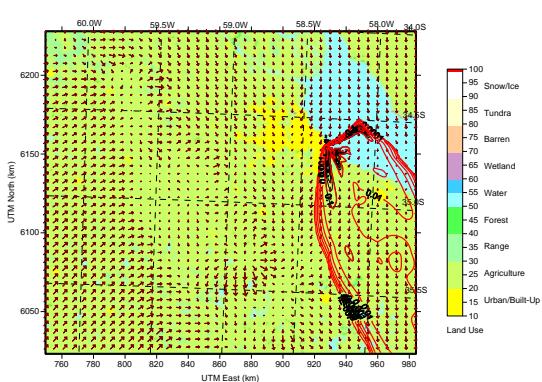
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
15:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

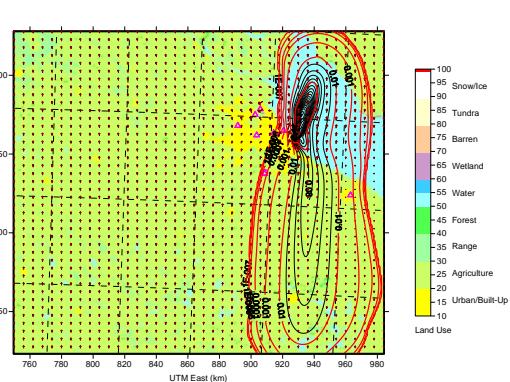
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Nov 23, 2001  
15:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



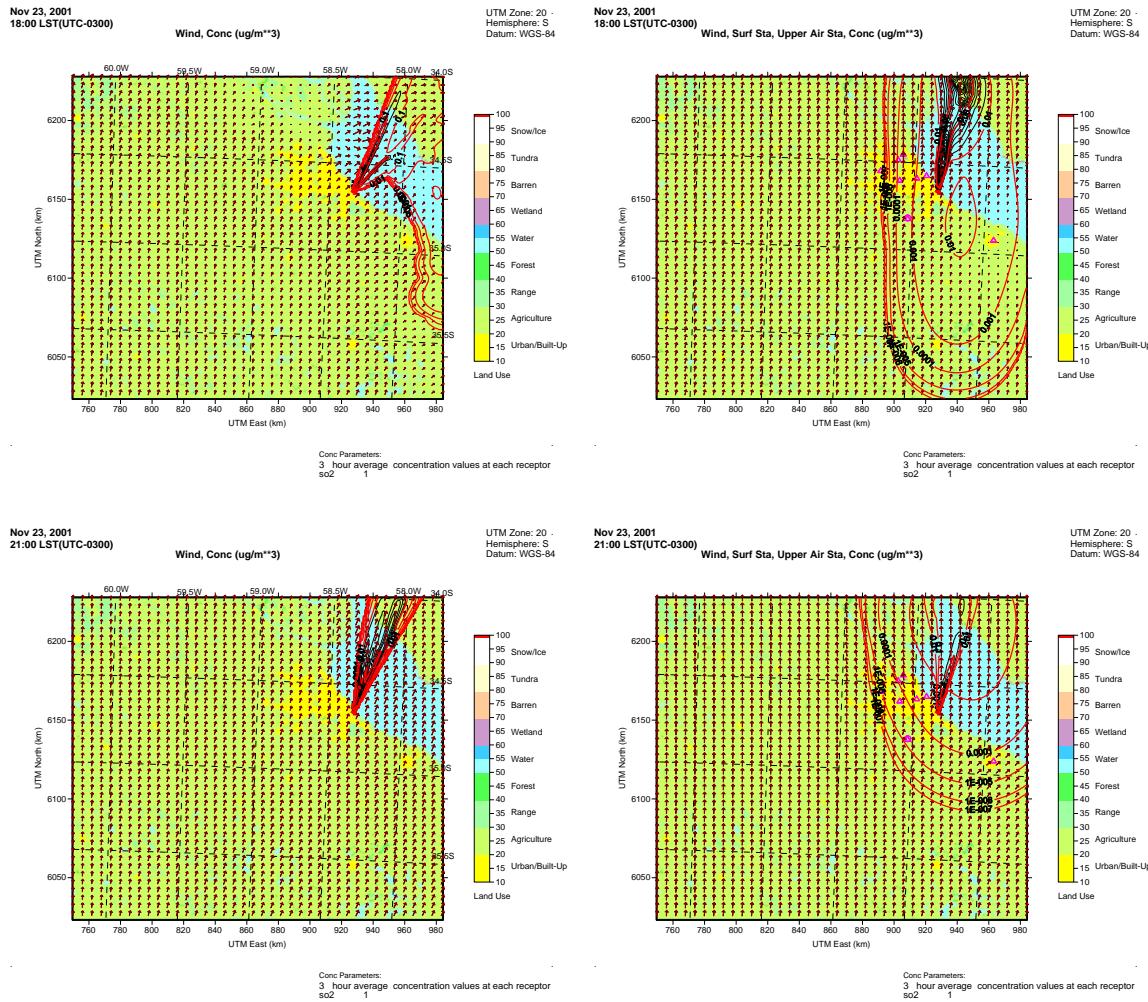


Figura 6.13: Campos de concentración de SO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (contornos) promediados en 3 hs y viento (m/s) en superficie (vectores), para la hora correspondiente al gráfico, para el día 23 de noviembre de 2001. Panel izquierdo: corrida #1. Panel derecho: corrida #2.

Se realizaron dos simulaciones alternativas, con campos de viento obtenidos utilizando los valores en puntos de retícula provenientes del modelo BRAMS en alta resolución (2,5 km) (corrida #1) y por otro lado, los que se obtienen a partir de los datos observados en la superficie y altura (corrida #2).

Las Figuras 6.12 y 6.13 presentan los campos horarios y trihorarios de viento en superficie y de concentración de los contaminantes NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, respectivamente.

Analizando la corrida #1 para el caso de los NO<sub>x</sub> (Fig. 6.12), inicialmente se observa un viento en superficie del Este en la Ciudad de Buenos Aires y Gran Buenos Aires y más al Sur el viento adquiere una débil componente N. Debido a este campo de viento, la pluma de contaminantes se dispersa hacia el SO. Para las horas subsiguientes el viento se mantiene aproximadamente de la misma dirección por lo que no se observa una rotación de la pluma, la cual alcanza el extremo opuesto del dominio considerado dentro de las primeras horas de la simulación. Si bien la pluma se ve extensa, si se analizan los valores de concentración en el límite exterior de la pluma, se observa que éstos son de 0,0001 µg/m<sup>3</sup>, representando valores realmente bajos que no producirán efectos nocivos sobre las personas.

Con el correr de las horas la pluma va rotando hacia el Sur por acción del viento y aproximadamente a las 13 hs (no se muestra) se observa el ingreso de una zona de convergencia de vientos en superficie que estará asociada al pasaje del frente frío. En virtud del viento con dirección sudoeste por detrás del frente, la pluma se dispondrá inicialmente en forma paralela al frente, como puede observarse a las 15 hs, para luego rotar hacia el NE. Si se analizan los valores de la concentración de la pluma, se ve, como era de esperar, la distribución típica de una pluma gaussiana, con máximos en el centro. Si se tiene en cuenta que el estándar de calidad de aire tanto para la Provincia como para la Ciudad de Buenos Aires para el NO<sub>x</sub> es de 376 µg/m<sup>3</sup>, se puede ver que los valores estimados por el modelo CALPUFF se encuentran muy por debajo de este nivel, incluso en el centro de la pluma.

Si se realiza el mismo análisis para la corrida #2, se ve que la pluma presenta un comportamiento similar al de la corrida #1. Esto estaría indicando una buena relación entre los campos meteorológicos provenientes de la salida del BRAMS y de los datos meteorológicos observacionales tanto de altura como de superficie.

Se puede observar que la pluma inicialmente se encuentra un poco más inclinada hacia el Sur que en la corrida #1, y que luego, a lo largo de las horas, el comportamiento de la pluma es muy similar al descripto en la corrida #1, la pluma rota hacia el Sur y, contrariamente a lo

que ocurre en la corrida #1, a las 13 hs no se evidencia la presencia de ninguna zona de convergencia en superficie. Esto se debe a la falta de datos observacionales en el área que aporten información al modelo acerca del ingreso del frente en la región de estudio. Esta zona sí se evidenciará a las 14 hs (no se muestra) cuando el frente en superficie alcanza las estaciones meteorológicas que se encuentran al SO de la ciudad y éstas registran la rotación del viento. Finalmente la pluma rotará hacia el Norte.

Si bien la dirección y forma de la pluma es bastante similar en ambas salidas, la correspondiente a la corrida #1 es más elongada que la de la corrida #2, esto se debe a que los vientos en la primera son más intensos y provocan que la pluma alcance zonas más lejanas. Por este mismo motivo, si se compara la concentración en un punto para ambas salidas, se encontrará que la concentración para la corrida #2 es mayor, ya que en este caso los contaminantes se dispersan menos y quedan más concentrados.

En el caso de la concentración de SO<sub>2</sub> en superficie, se presentan campos promedios trihorarios debido a que el Estándar de Calidad de Aire para el SO<sub>2</sub> en la Provincia y en la Ciudad de Buenos Aires están fijados para un promedio mínimo de 3 horas y su valor es de 1309 g/m<sup>3</sup>.

Al comparar los campos (Fig. 6.13) con los resultantes de las salidas del modelo para el NOx (Fig. 6.12) puede apreciarse que la forma, disposición, alcance y espesor de la pluma es similar para ambas corridas, y se observa que se modifican los valores de las concentraciones en superficie. Esto era esperable debido a que tanto las emisiones como los procesos de transformación que sufren los contaminantes una vez emitidos a la atmósfera son diferentes para cada uno de los distintos gases y a que se trata de promedios cada tres horas.

La trayectoria, dirección y alcance de la pluma durante todo el día para las corridas #1 y #2 son análogos para ambos contaminantes.

Teniendo en cuenta el valor crítico de concentración de SO<sub>2</sub> en superficie, por debajo del cual no se producen efectos sobre la salud humana, se observa en base a los campos resultantes tanto de la corrida #1 como de la #2, que este valor no se supera en ningún lugar ni momento. Esto no implica que este valor en la realidad no pueda superarse, ya que hay que tener en cuenta dos cosas: la primera es que en este estudio sólo se consideraron 37 fuentes puntuales, que no conforman todo el universo de las emisiones en la zona de Dock Sud y la segunda es que se utilizó un modelo, con todas las aproximaciones y suposiciones que ello implica, para estimar las concentraciones a nivel del suelo.

Las Figuras 6.14 y 6.15 ilustran la comparación entre los valores horarios de concentración de NOx obtenidos en las estaciones de monitoreo y los resultantes del modelo CALPUFF.

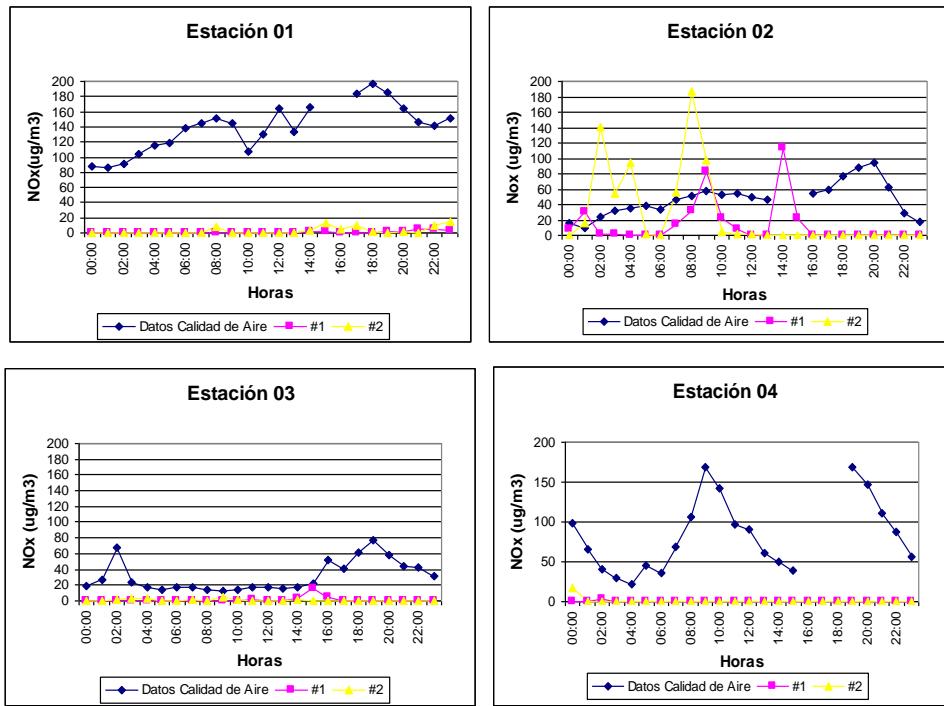


Figura 6.14: Concentraciones de NOx en superficie para las mediciones de calidad de aire (azul), los valores estimados por el modelo CALPUFF para la corrida #1 (rosa) y para la corrida #2 (amarillo)

Las Figuras 6.14 ilustran la comparación entre los valores horarios de concentración de NOx observados en las estaciones de monitoreo y los estimados con el modelo CALPUFF. Se observa claramente que las concentraciones observadas son mucho mayores que las estimadas por el modelo en todas las estaciones. Las emisiones de NOx están principalmente relacionadas con las emisiones de los automotores, cualquiera sea el tipo de combustible que utilicen. Estas fuentes no fueron consideradas en el modelo y de acuerdo a resultados obtenidos por otros autores (Venegas y Mazzeo, 2006 y Mazzeo, Venegas y Choren, 2005), en ambientes urbanos éste tipo de fuentes contribuye en aproximadamente el 60% del valor de la concentración. En este trabajo de tesis, si bien era factible disponer de la información necesaria para considerar los efectos de las fuentes móviles en la localidad de Dock Sud, no pudo ser modelado debido a la imposibilidad de simular fuentes lineales por el modelo CALPUFF. La estación de monitoreo 4 es la que muestra mayor influencia por la presencia de

la Autopista Buenos Aires – La Plata por encontrarse ubicada más cerca. En esa estación se observan los máximos de concentración relacionados con la hora pico de tránsito en la mañana (9 hs) y por la tarde (19 hs). La estación de monitoreo 1, ubicada sobre un camino principal dentro del área portuaria, presenta un comportamiento similar. Las estaciones 2 y 3 se ubicaron sobre caminos municipales. Sin embargo, durante la tarde se observa un incremento sustancial de las concentraciones entre las 19 y 20 hs. Como se ha comentado anteriormente, este día el viento tuvo una rotación hacia el SSO luego de las 15 hs. Este hecho y la ubicación relativa de las estaciones de monitoreo respecto de la Autopista Buenos Aires – La Plata serían las causales del incremento de la concentración observada a la hora del máximo tránsito en horas vespertinas en las estaciones 2 y 3.

Asimismo en la estación de monitoreo 2 se observa que el modelo estima valores elevados de concentración de contaminantes para determinadas horas. Estas son: a las 2, 4 y 8 hs, cuando se utilizan los datos de las estaciones de superficie y aerológica para alimentar el modelo y a las 9 y 14 hs cuando se utilizan las salidas del modelo BRAMS como datos de entrada al CALPUFF. Si se observan las Figs. 6.12 a las horas correspondientes, se apreciará en cada caso que la dirección predominante de viento para esas horas respectivas fue la del NNE con velocidades moderadas a débiles. En esa posición se ubican las chimeneas correspondientes a la Central Termoeléctrica Dock Sud, que poseen una considerable emisión de óxidos de nitrógeno (Tabla 5.1).

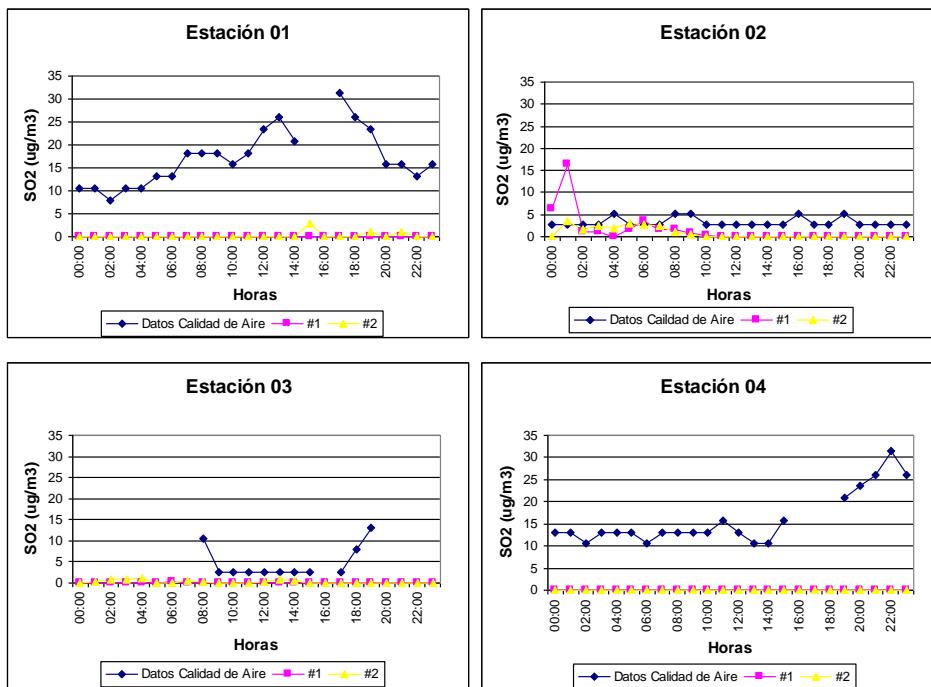


Figura 6.15: Concentraciones de  $\text{SO}_2$  en superficie para las mediciones de calidad de aire (azul), los valores estimados por el modelo CALPUFF para la corrida #1 (rosa) y para la corrida #2 (amarillo)

En las Figuras 6.15 se presentan gráficos similares a los anteriores, pero para el  $\text{SO}_2$ . Para este contaminante las concentraciones observadas son superiores a las estimadas por el modelo CALPUFF considerando ambas corridas (#1 y #2) en todas las estaciones y para casi todas las horas. Las estaciones 1 y 4 tienen mayores concentraciones a las observadas en 2 y 3, debido principalmente a la cercanía a accesos con gran caudal de tránsito. En Argentina, si bien existe un importante número de automotores que utilizan gas como combustible, también hay un importante grupo que utiliza naftas, diesel y gas oil, entre estos últimos todo el transporte público de pasajeros, que contienen compuestos de azufre en su fórmula química. Debido a ello, de la misma forma que ocurrió con las concentraciones de  $\text{NO}_x$ , por la tarde al rotar el viento hacia el SSO y a las horas de mayor caudal de tránsito es que se observan las mayores concentraciones en las estaciones de monitoreo, excepto para la estación 2. Esta estación no muestra prácticamente variabilidad durante todo el día. El modelo no estima prácticamente concentraciones elevadas, ya que las chimeneas de la Central Termoeléctrica Dock Sud, al tratarse de una empresa que utiliza equipamiento del tipo “ciclo combinado”, opera a gas en esta época del año, y no produjo emisiones de  $\text{SO}_2$ .

## 6.2 Estudio de Caso día 15 de Enero del 2002

### 6.2.1 Análisis de la situación sinóptica

En forma similar a lo realizado anteriormente, se analizarán los campos de 1000, 850 y 500 hPa cada 6 horas para el día 15 de Enero a fin de ilustrar el entorno sinóptico en que se realiza el transporte y dispersión de los contaminantes emitidos por el complejo industrial.

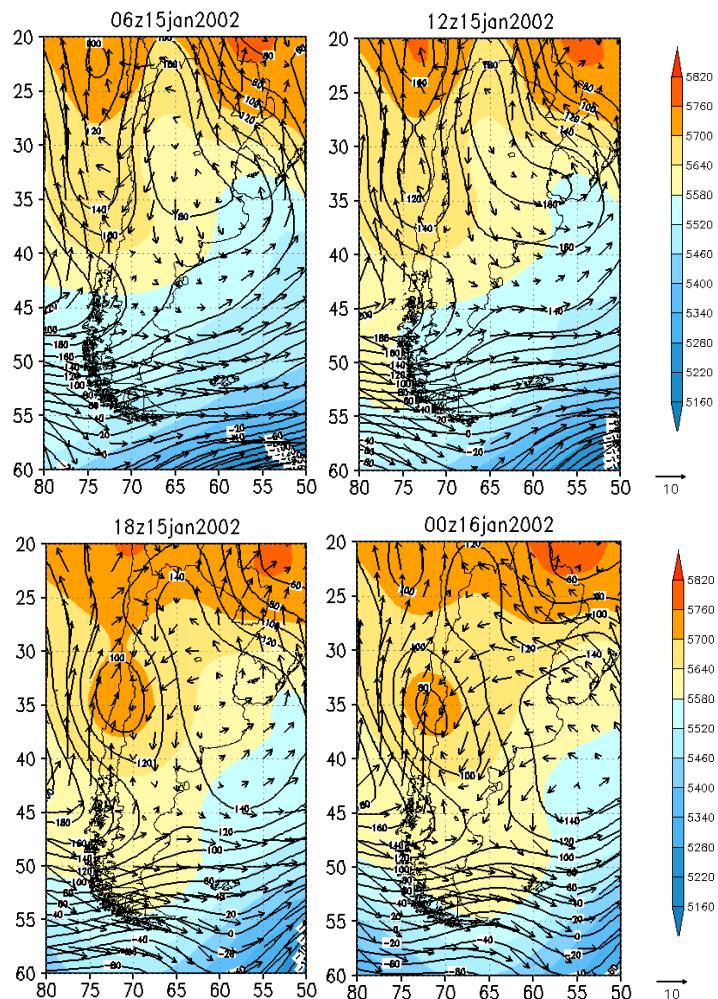


Figura 6.16: Geopotencial (mgp) (contorno) y viento (m/s) (vector) en 1000 hPa y espesor 500/1000 (mgp) (sombreado).

El 15 de enero de 2002 a las 06 UTC, el campo de 1000 hPa (Fig. 6.16) muestra un sistema de alta presión que abarca la mayor parte de la región central de Argentina, al oeste se observa

un centro ciclónico que ingresa al continente con el transcurso del día, provocando el desplazamiento del anticiclón hacia el sudeste. A medida que se desplaza el anticiclón pierde intensidad. Debido al emplazamiento de este centro anticiclónico sobre la región de estudio, se observa que el viento en superficie es débil y de direcciones variables. Hacia la noche adquiere una dirección prevaleciente del sudeste.

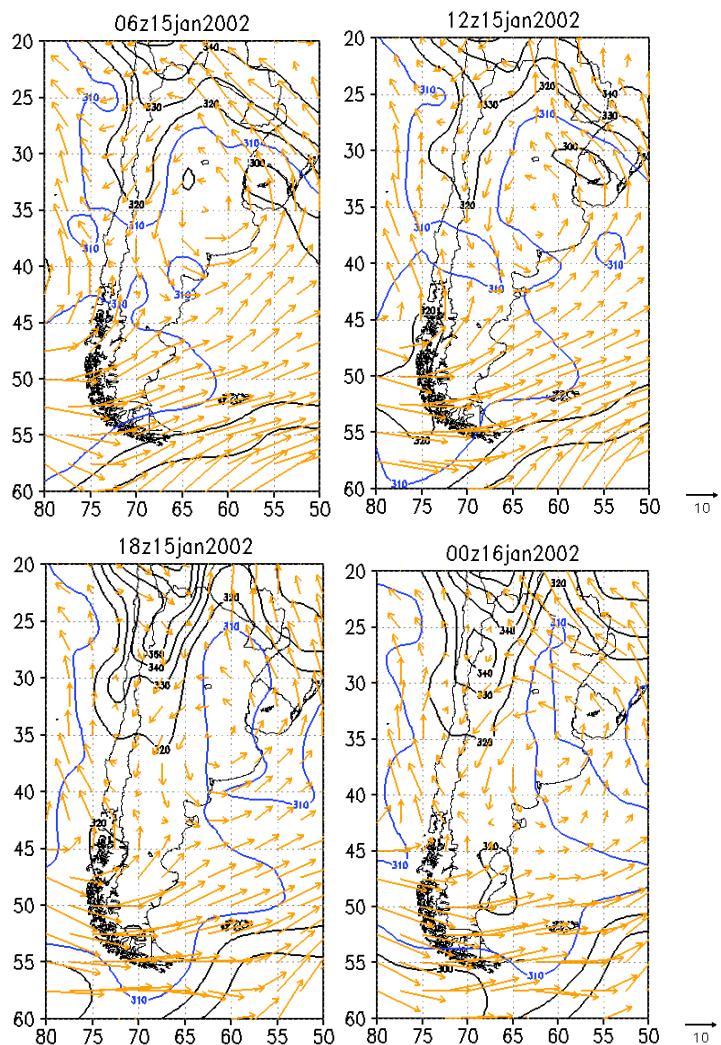


Figura 6.17: Temperatura potencial adiabática equivalente (K) (contorno) y viento en 850 hPa (m/s).

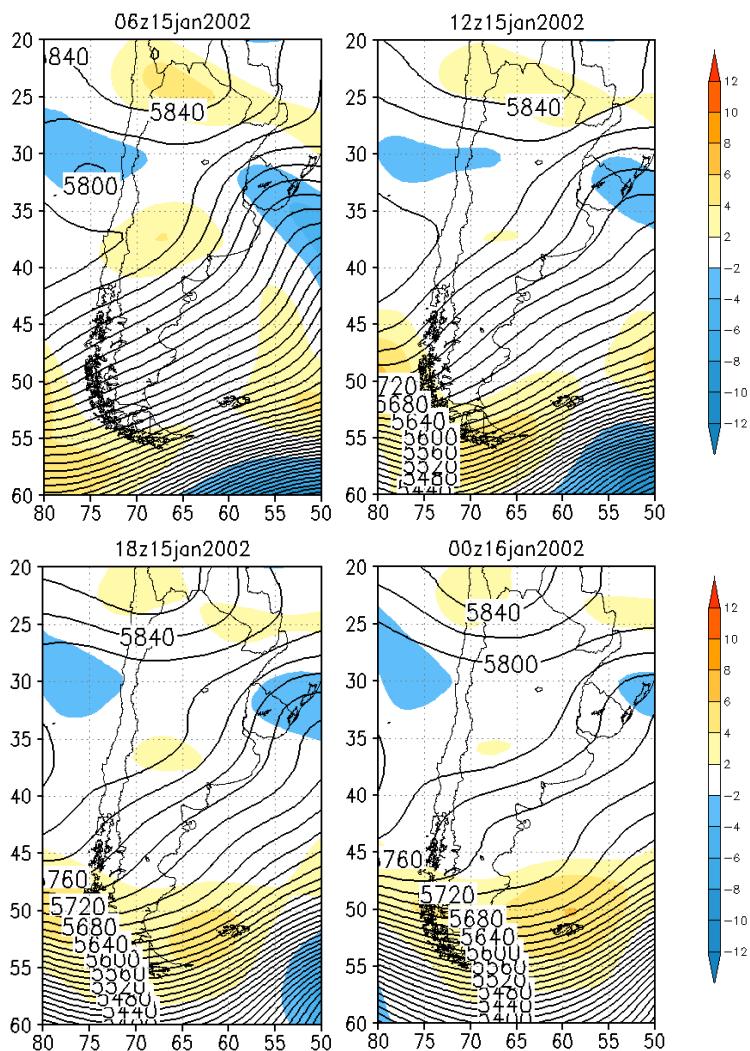


Figura 6.18: Geopotencial (mgp) (contorno) y vorticidad\* $10^{-5}$  (1/s) (sombreado) en 500 hPa

En 850 hPa (Fig. 6.17) durante todo este día se observa que la mayor parte del país se encuentra inmersa en un flujo anticiclónico. En el noroeste argentino se da el ingreso de una lengua de aire cálido asociada a la rama oeste del sistema de alta presión, mientras que la región de interés se encuentra en aire relativamente mas frío.

En 500 hPa (Fig. 6.18) el campo de geopotencial muestra una débil cuña en altura asociada al sistema de alta presión en superficie (Fig. 6.16) que irá debilitándose durante el día.

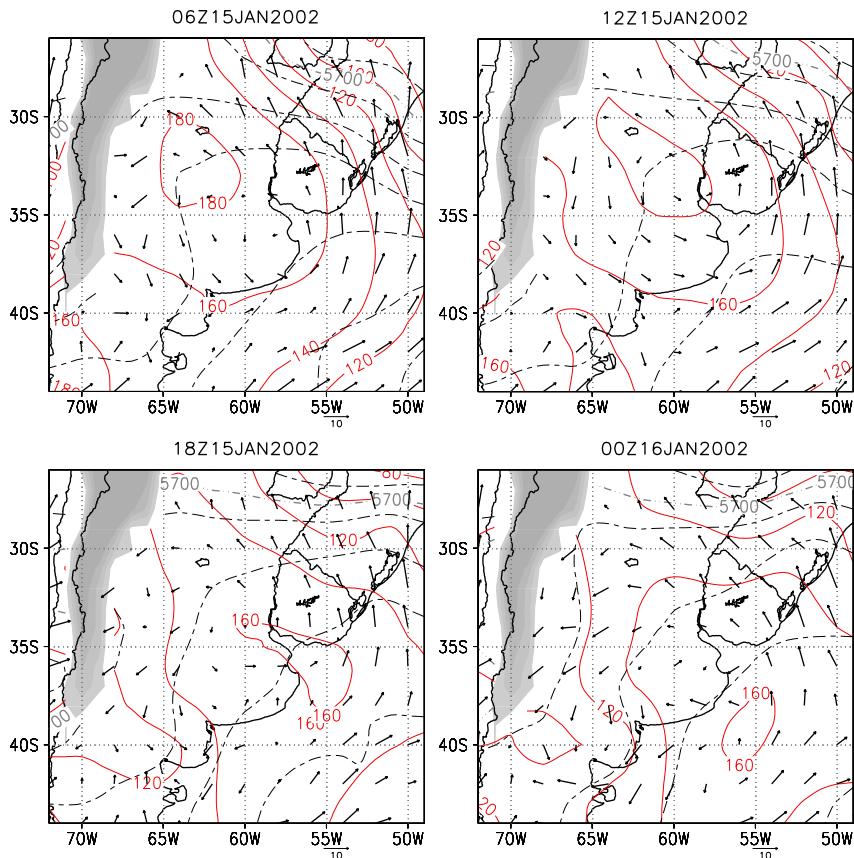


Figura 6.19: Geopotencial (mgp) (contorno color) y viento (m/s) (vector) en 1000 hPa y espesor 500/1000 (mgp) (contorno negro y gris).

El día 15 de enero, el campo de geopotencial y viento de 1000 hPa y de espesores 500/1000 hPa (Fig. 6.19) obtenidos con el BRAMS presenta concordancia con lo ilustrado en la Fig. 6.16, aunque el sistema de alta presión muestra leves diferencias, con menor extensión de su zona central en las primeras seis horas y una mayor intensidad en la segunda mitad del período. Los espesores 500/1000 hPa conforman un campo relativamente homogéneo. Los contornos presentan algunas perturbaciones de onda más corta, resultado de la mayor resolución del modelo comparada con la de los reanálisis. En cuanto al campo de viento en 1000 hPa, en la zona de interés se aprecian, al igual que con los reanálisis del NCEP, las menores intensidades y direcciones variables.

La Figura 6.20, correspondiente a 850 hPa, muestra el campo de viento con un claro dominio del sistema anticiclónico en la zona de la provincia de Buenos Aires. El viento, a lo largo de todo el día en el AMBA se presentó con componente sur. La temperatura potencial

adiabática equivalente caracteriza aire seco y relativamente fresco sobre la región. Inmediatamente al este de Los Andes se aprecia la entrada de aire cálido y húmedo advectado por el flujo con marcada componente norte.

En niveles medios (Fig. 6.21), BRAMS presenta también concordancia con el patrón mostrado por los reanálisis, con escaso gradiente de geopotencial y la progresión de una cuña y advección de vorticidad antíclónica sobre la región del AMBA.

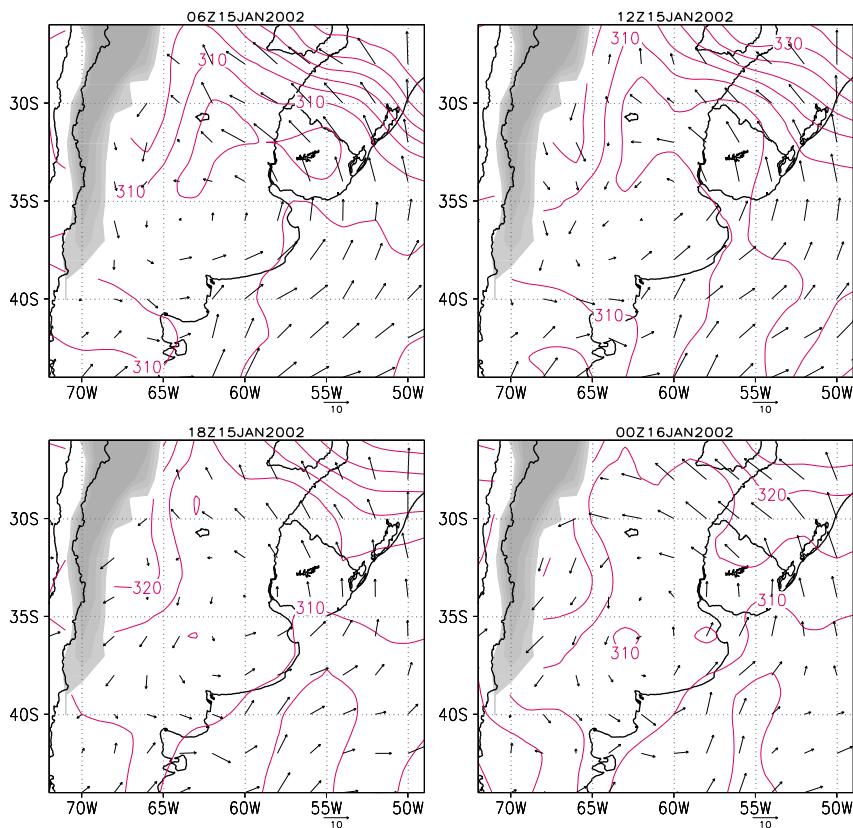


Figura 6.20: Temperatura potencial adiabática equivalente (K) (contorno) y viento en 850 hPa (m/s) (vector).

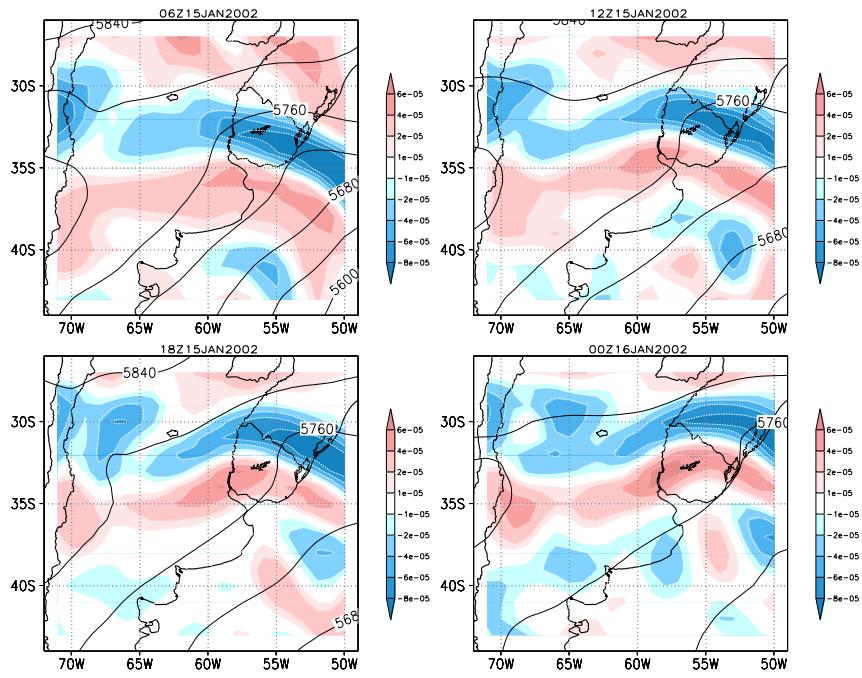


Figura 6.21: Geopotencial (mgp) (contorno) y vorticidad (1/s) (sombreado) en 500 hPa

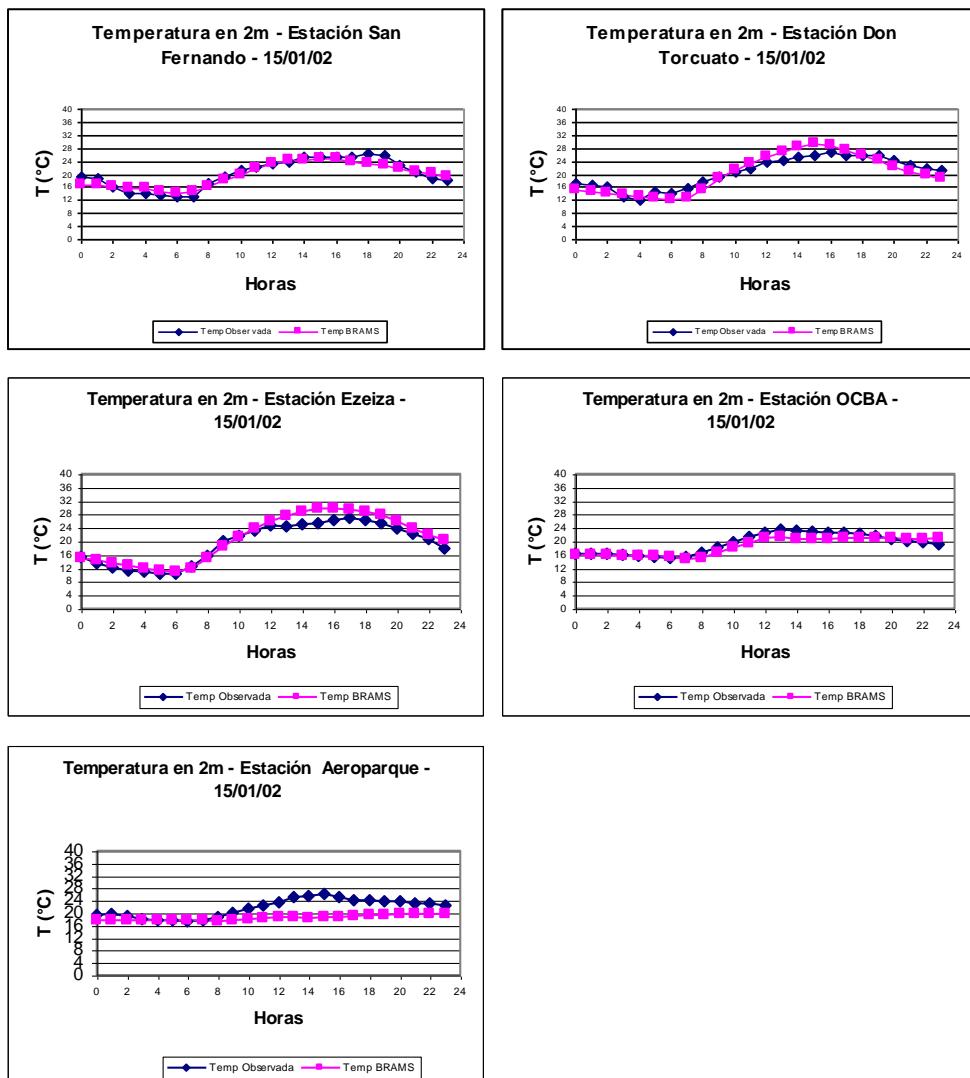


Figura 6.22: Series temporales de temperatura, para el día 15 de Enero, con datos observacionales y resultados de BRAMS para las estaciones de San Fernando, Don Torcuato, Ezeiza, OCBA y Aeroparque.

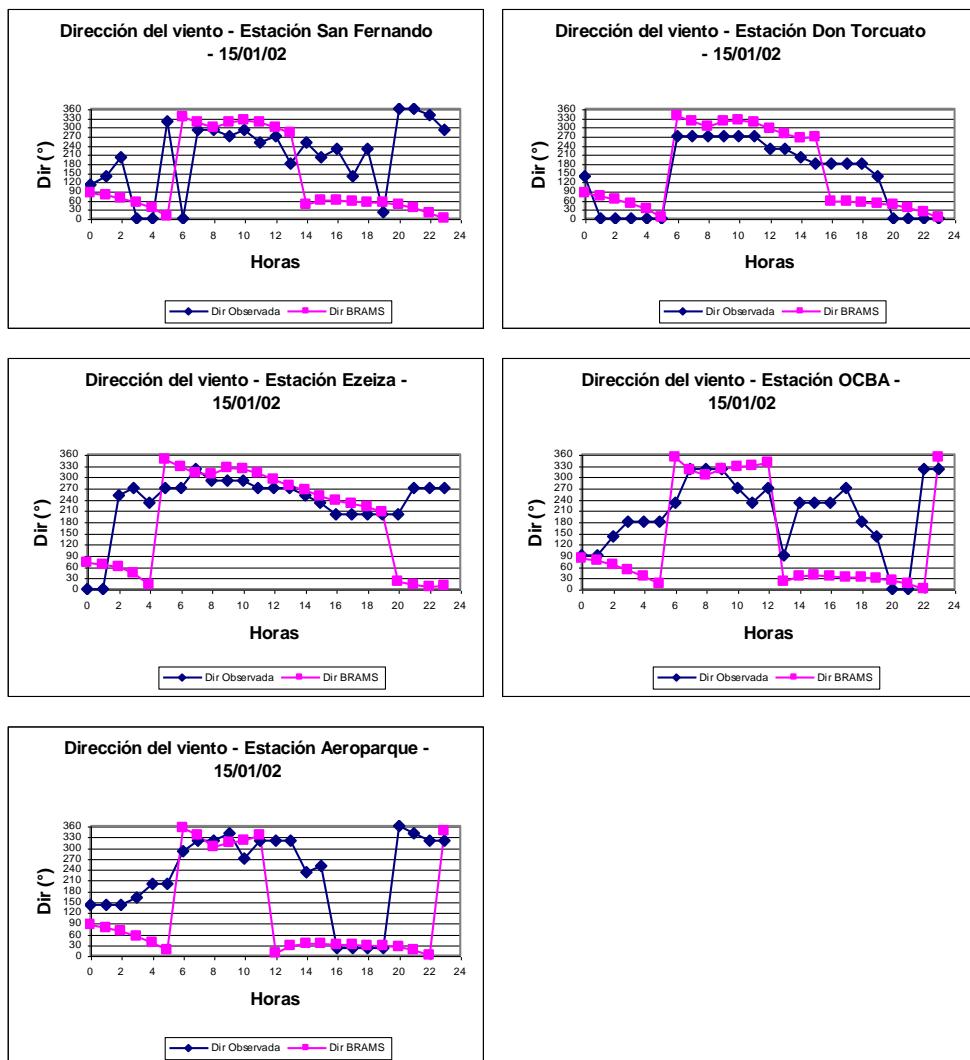


Figura 6.23: Series temporales de dirección del viento, para el día 15 de Enero, con datos observacionales y resultados de BRAMS para las estaciones de San Fernando, Don Torcuato, Ezeiza, OCBA y Aeroparque.

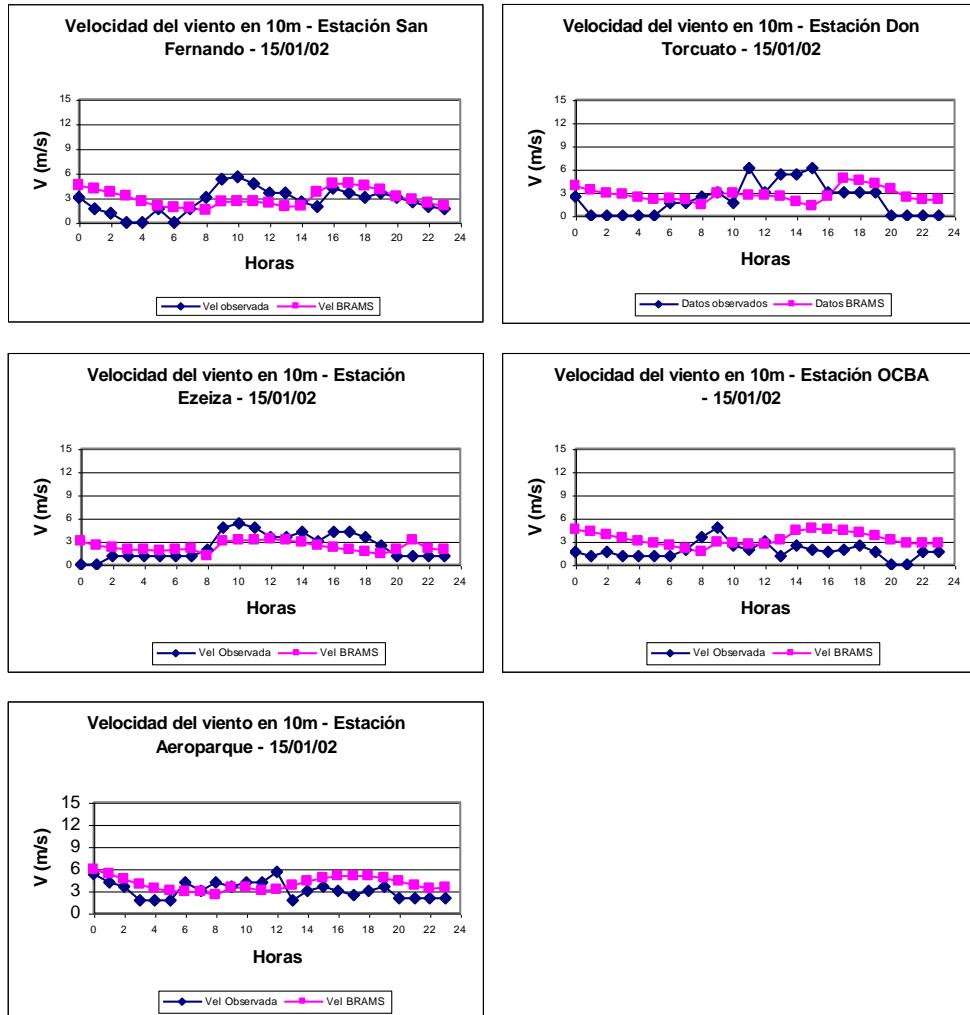


Figura 6.24: Series temporales de intensidad del viento, para el día 15 de Enero, con datos observacionales y resultados de BRAMS para las estaciones de San Fernando, Don Torcuato, Ezeiza, OCBA y Aeroparque.

La figura 6.22 muestra una muy buena concordancia en las series temporales de temperatura obtenidas a través del modelo BRAMS y los datos observacionales. En las estaciones de Ezeiza y Don Torcuato el BRAMS sobreestima la temperatura máxima mientras que en la estación Aeroparque la subestima alrededor de 5° C.

En cuanto a la dirección del viento (Fig. 6.23) el modelo BRAMS, en todas las estaciones, describe un viento que a las 00 hora local es del Este, luego va rotando anticiclónicamente hasta adquirir una componente Norte. Con el correr de las horas, en las estaciones de San

Fernando, Don Torcuato y Ezeiza el viento continúa rotando hasta ser del oeste, en Observatorio Central y Aeroparque el viento se mantiene del sector noroeste. En las horas subsiguientes, las estaciones Aeroparque, Observatorio, San Fernando y Don Torcuato, en un tiempo anterior o posterior, registran viento con dirección noreste, el que podría estar asociado al efecto combinado de la brisa de río y la circulación anticiclónica sobre la región de interés. Hacia la noche en todas las estaciones se evidencia viento Norte.

Si se observan las series temporales de dirección de viento de los datos observacionales, se ve que las mismas son diferentes entre sí. Solo Aeroparque registra claramente el efecto de la brisa.

En cuanto a la intensidad del viento a 10 metros (Fig. 6.24), se observa que el modelo BRAMS, respecto de los datos observados, en todas las estaciones subestima tanto las mínimas velocidades como las máximas. Esto estaría indicando una menor amplitud de la onda, para los datos extraídos del BRAMS, y por lo tanto una intensidad de viento más regular.

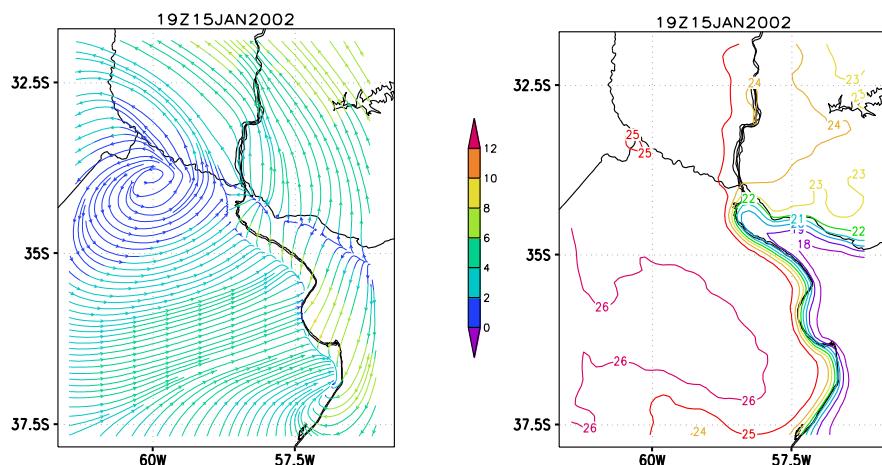


Figura 6. 25: Campos de líneas de corriente (izquierda) y de temperatura (derecha) para las 16 hora local, en la retícula de 10km.

En el panel izquierdo de la Figura 6.25 se ilustra el campo de movimiento horizontal cercano a superficie. Se observa sobre el Río de la Plata una región de divergencia indicativa de la circulación de brisa. Sobre la margen derecha del río, dentro del continente y paralelo a la costa se genera una zona de convergencia que posiciona el frente de brisa que dominó la circulación en horas de la tarde. La intensidad y penetración de la brisa en el continente se ve reforzada por la presencia de un centro anticiclónico en el NO del AMBA.

En el panel de la derecha (Fig. 6.25) se encuentran graficadas las isotermas que muestran el fuerte gradiente en ambas orillas rioplatenses, asociadas al frente de brisa.

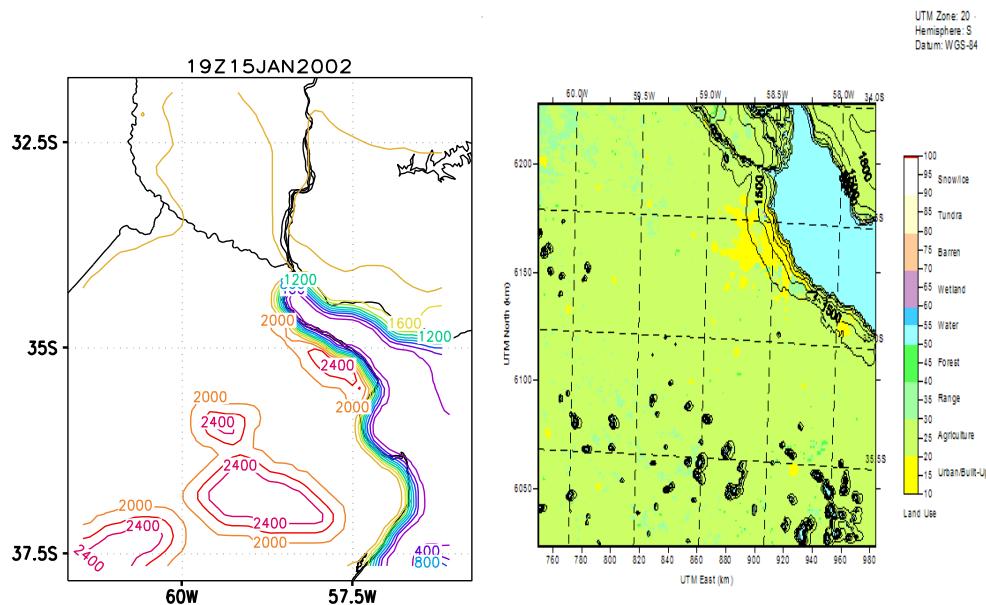
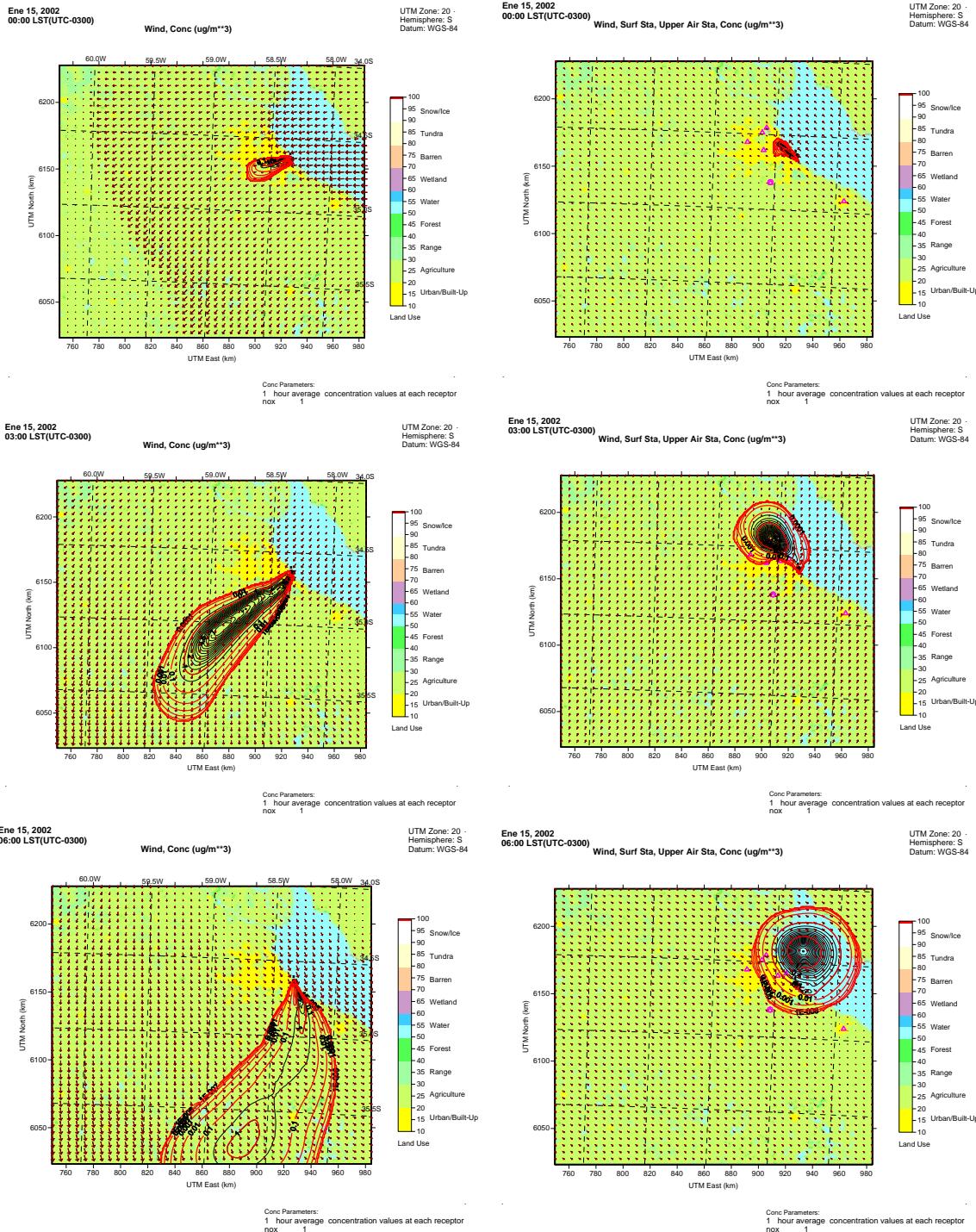


Figura 6.26: Alturas de Capa Límite para las 16 hora local, extraída del modelo BRAMS (izquierda) y del post procesamiento de los datos meteorológico por el modelo CALMET (derecha).

El desarrollo de la capa límite interna asociada a la brisa ha sido representado por los dos modelos (Fig. 6.26). Las diferencias encontradas se deben a las distintas formulaciones utilizadas por los modelos. En el caso de BRAMS la altura de la capa límite se determina en función de la energía cinética turbulenta, mientras que el CALMET utiliza la formulación de Batchvarova y Gryning (1994) basada en el flujo de calor sensible en superficie.

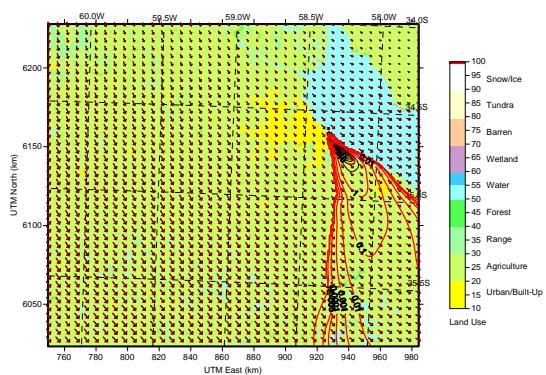
### 6.2.2 Simulación de la dispersión de contaminantes

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones mediante el modelo CALPUFF, para las concentraciones de NOx y SO<sub>2</sub>.



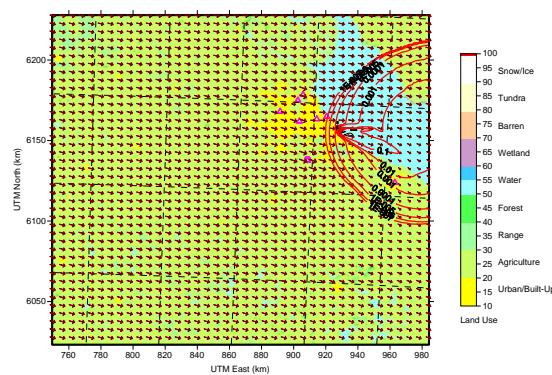
Ene 15, 2002  
09:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m<sup>3</sup>)



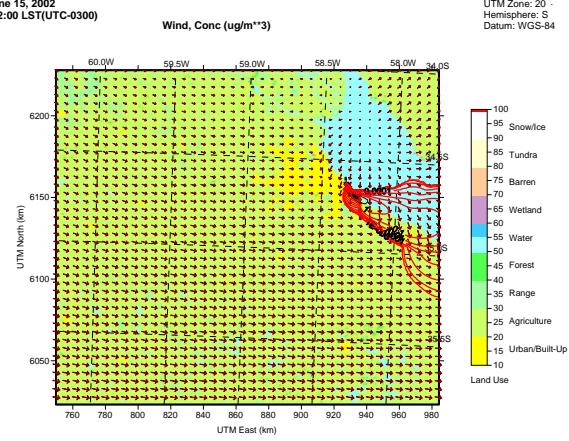
Ene 15, 2002  
09:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m<sup>3</sup>)



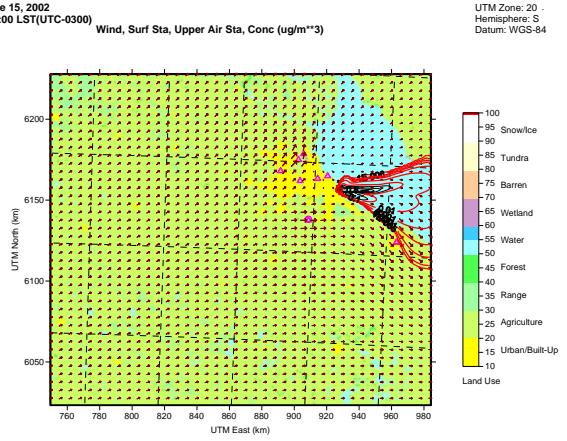
Ene 15, 2002  
12:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m<sup>3</sup>)



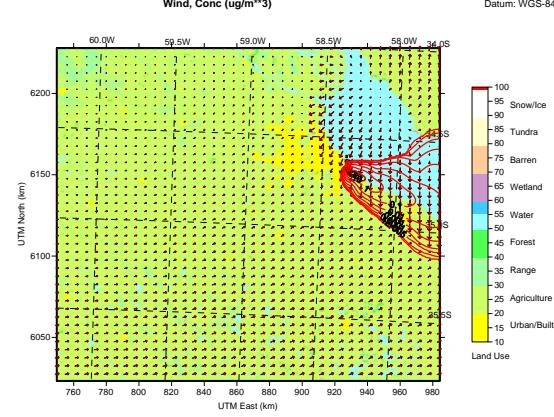
Ene 15, 2002  
12:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m<sup>3</sup>)



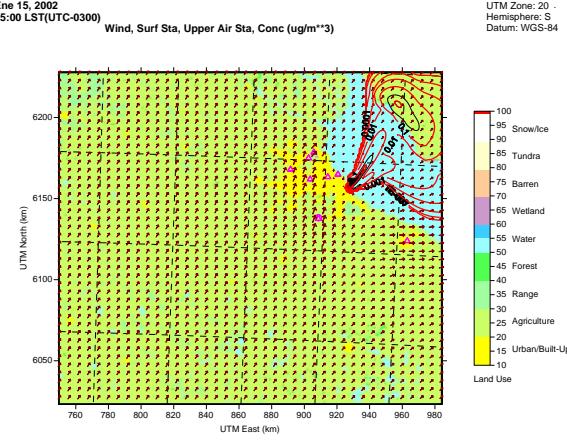
Ene 15, 2002  
15:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m<sup>3</sup>)



Ene 15, 2002  
15:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m<sup>3</sup>)

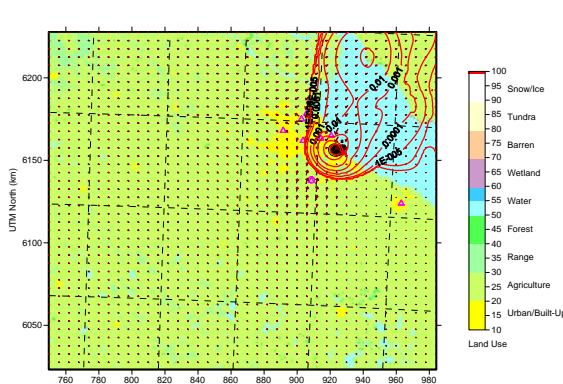
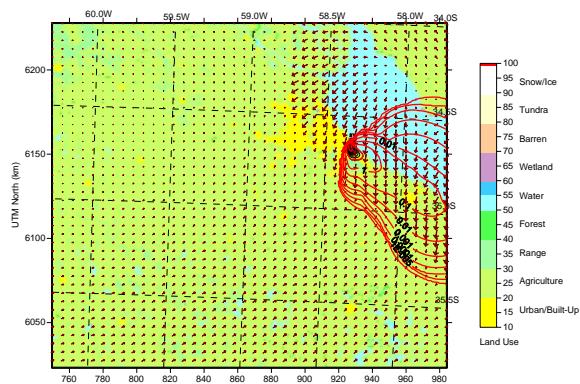


Ene 15, 2002  
18:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

UTM Zone: 20 · Hemisphere: S  
Datum: WGS-84 Ene 15, 2002  
18:00 LST(UTC-0300) Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

UTM Zone: 20 · Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



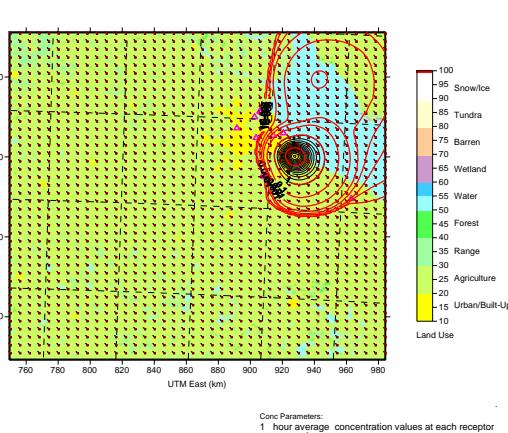
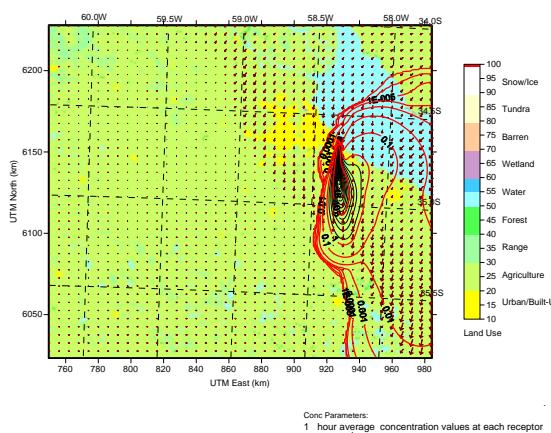
Ene 15, 2002  
21:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

UTM Zone: 20 · Hemisphere: S  
Datum: WGS-84

Ene 15, 2002  
21:00 LST(UTC-0300) Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

UTM Zone: 20 · Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



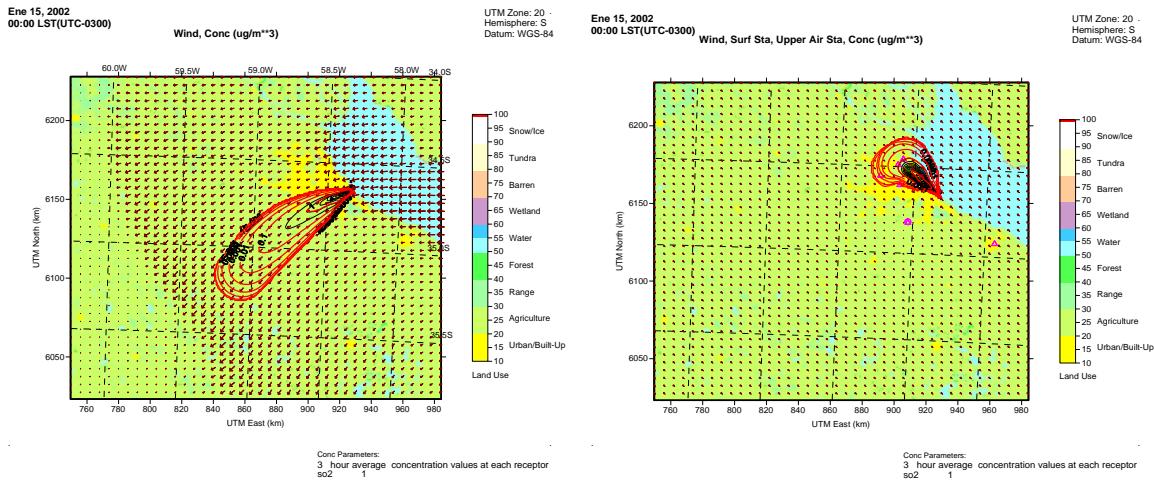
Conc Parameters:  
nox 1 hour average concentration values at each receptor

Conc Parameters:  
nox 1 hour average concentration values at each receptor

Figura 6.27: Concentraciones horarias de NOx ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (contornos) y viento (m/s) en superficie (vectores) para el día 15 de enero de 2002. Panel izquierdo: corrida #1. Panel derecho: corrida #2.

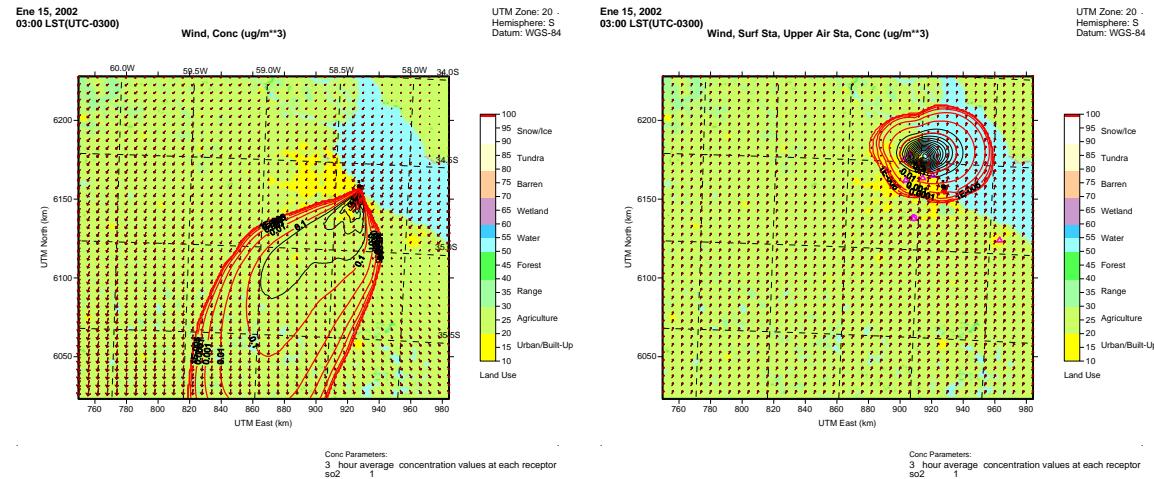
Ene 15, 2002  
00:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)



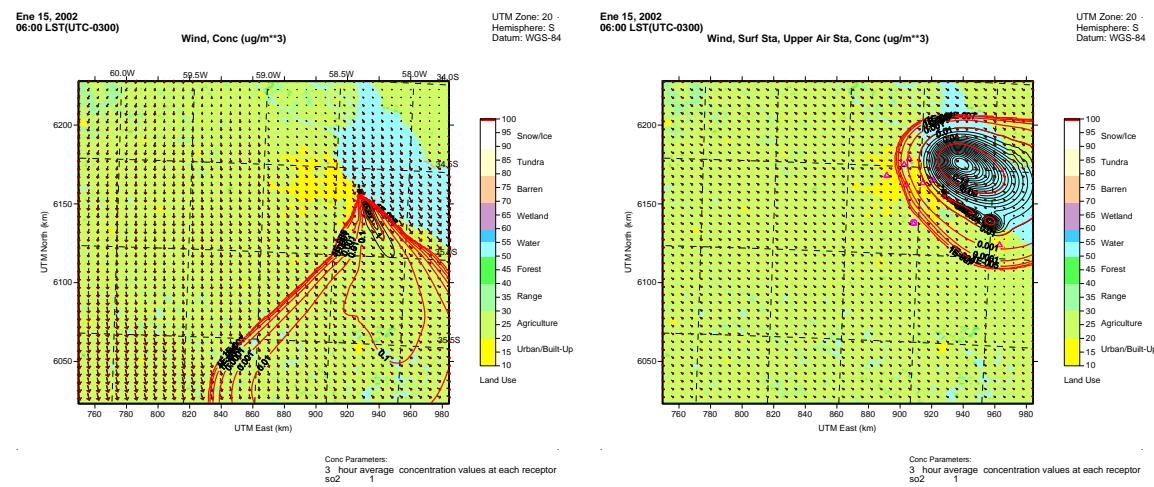
Ene 15, 2002  
03:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)



Ene 15, 2002  
06:00 LST(UTC-0300)

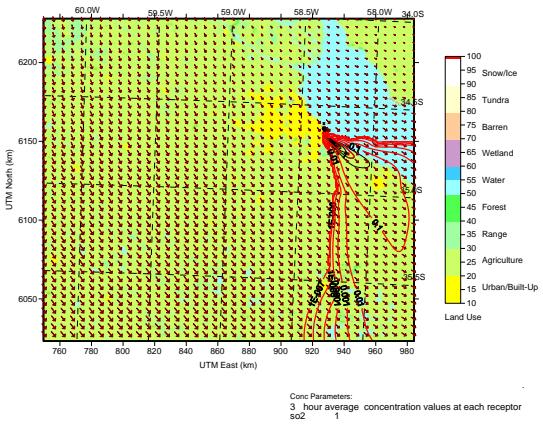
Wind, Conc (ug/m\*\*3)



Ene 15, 2002  
09:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)

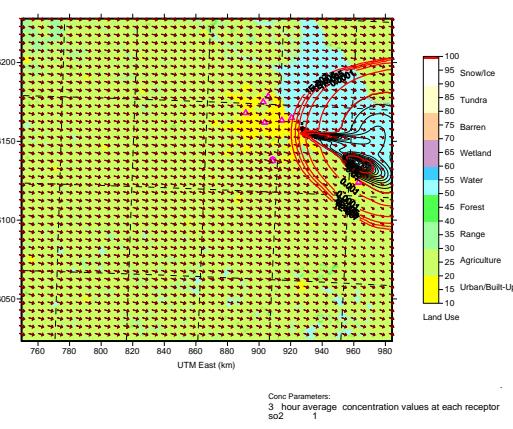
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Ene 15, 2002  
09:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m\*\*3)

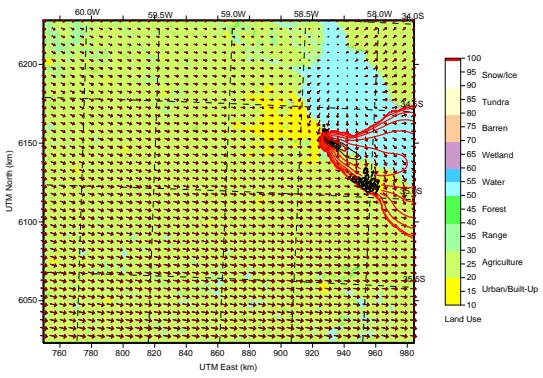
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Ene 15, 2002  
12:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)

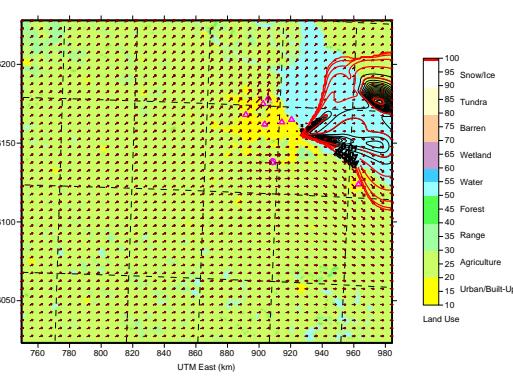
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Ene 15, 2002  
12:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m\*\*3)

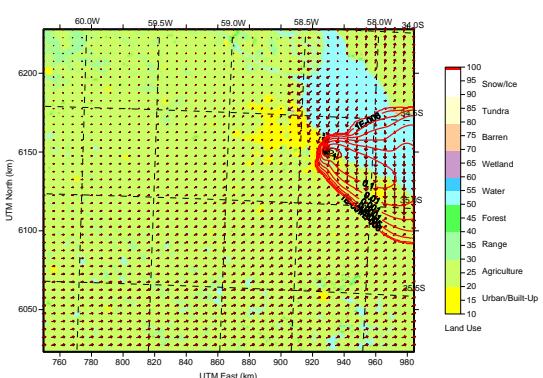
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Ene 15, 2002  
15:00 LST(UTC-0300)

Wind, Conc (ug/m\*\*3)

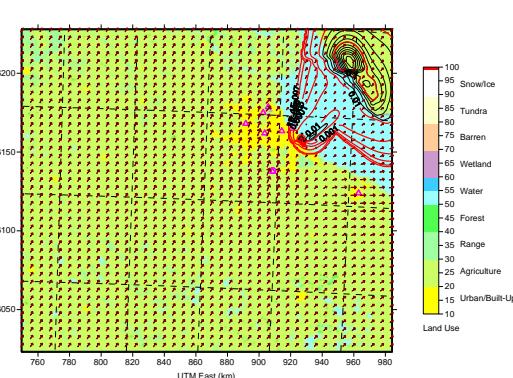
UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



Ene 15, 2002  
15:00 LST(UTC-0300)

Wind, Surf Sta, Upper Air Sta, Conc (ug/m\*\*3)

UTM Zone: 20  
Hemisphere: S  
Datum: WGS-84



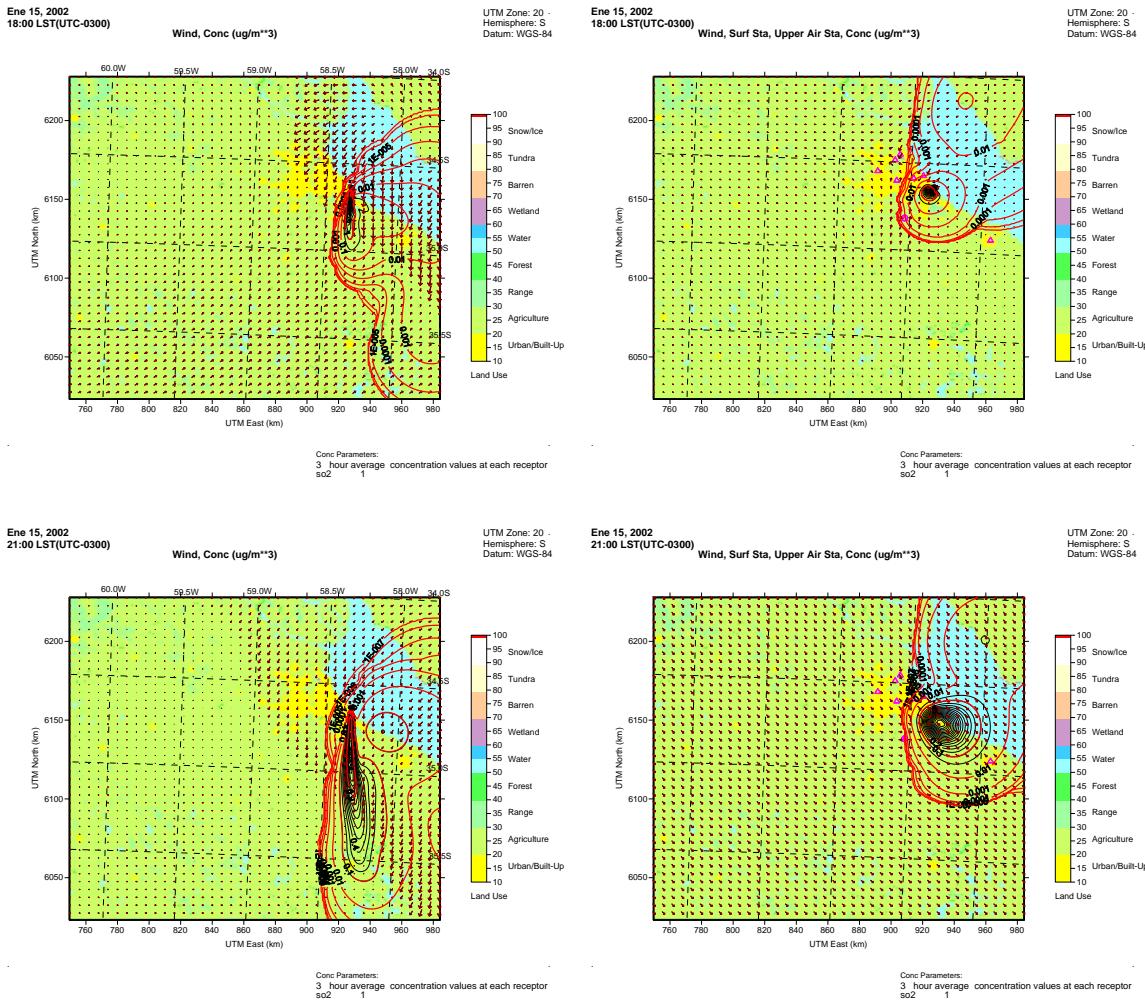


Figura 6.28: Campos de concentración de SO<sub>2</sub> (ug/m<sup>3</sup>) (contornos), promedios en 3 hs y viento (m/s) en superficie (vectores), para la hora correspondiente al gráfico, para el día 15 de enero de 2002.

El período que abarca la simulación es de 24 horas, entre las 00 y las 23 hora local.

Análogamente a lo realizado para el día 23 de Noviembre, se efectuaron dos simulaciones alternativas, con campos de viento obtenidos utilizando los valores en puntos de retícula provenientes del modelo BRAMS en alta resolución (corrida #1) y por otro lado, los que se obtienen a partir de los datos observados en la superficie y altura (corrida #2).

Las Figuras 6.27 y 6.28 presentan los campos horarios y trihorarios de viento en superficie y de concentración de los contaminantes NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, respectivamente. En los paneles de la izquierda se pueden observar los resultantes de la corrida #1 y en los paneles de la derecha los que corresponden a la corrida #2.

Al analizar la corrida #1 (Fig. 6.27), se observa a las 00hs vientos débiles a moderados en superficie con una marcada componente del Este sobre la cuenca del Río de la Plata. A medida que se avanza sobre el continente, más precisamente sobre la Ciudad de Buenos Aires y el Gran Buenos Aires, se encuentran intensidades de viento menores y el mismo adquiere una dirección del NE. Debido a la acción directa del viento la pluma de contaminantes se dispersa en dirección SO. Para las horas subsiguientes el viento se mantiene aproximadamente de la misma dirección sobre el continente, no así sobre el río donde se observa que la dirección de viento adquiere una componente N. Se observa una mayor intensidad del viento sobre el río, lo que responde a la mayor rugosidad del terreno que el aire encuentra en la zona costera donde se emplaza el AMBA.

A partir de las 3 hs el viento comienza a rotar hasta adquirir dirección norte a las 5 hs. A esta misma hora el viento sobre la zona urbana es del NO por lo que se observa una leve deformación de la pluma de contaminantes.

A la hora 6, el viento sobre la cuenca del Río de la Plata rota y pasa a ser también del NO y continúa con una mayor intensidad que sobre el continente. En las horas subsiguientes esta situación se mantiene con un aumento en la intensidad del viento sobre Buenos Aires. Esto provoca que toda la pluma de contaminantes se disponga en dirección NO-SE las 11 hs (no se muestra). A esta misma hora comienza a observarse una leve divergencia del viento sobre el Río de la Plata que se encontraría asociada a la circulación de brisa de río.

El campo de las 12 hs muestra en su mayor parte viento oeste, exceptuando las zonas costeras donde el efecto de la brisa produce un flujo entrante de aire hacia el continente. La brisa se intensifica con el tiempo ocasionando que la pluma que se había orientado hacia el

este en el campo de las 12 hs se vaya elongando hacia el sur a medida que la brisa penetra sobre el continente. El resultado de esto, es una pluma que se dispone casi en dirección norte-sur en el campo de las 23hs (no se muestra).

Al observar las concentraciones de NOx en superficie y teniendo en cuenta el nivel guía de calidad de aire, se observa que los valores estimados por el modelo se encuentran muy por debajo de este nivel, incluso en el centro de la pluma donde, como ya se dijo antes, se hallan los máximos valores. Pero si se comparan estos valores con sus análogos para la corrida del día 23 de noviembre, se encontrará que las concentraciones de NOx en superficie son mayores, como era de esperar, para la situación anticiclónica.

Si se realiza el mismo análisis para la corrida #2, se observa que la pluma de contaminantes presenta un comportamiento bastante disímil al de la corrida #1, debido a que los campos de viento en superficie para ambas corridas son marcadamente distintos.

Inicialmente se observa un viento con dirección SE sobre todo el campo pero con mayor intensidad sobre el río. Como no se tienen datos observacionales en la superficie del río, lo que el modelo CALMET está haciendo es considerar a éste como una superficie menos rugosa que la ciudad, y aumenta la intensidad del viento sobre el río pero manteniendo la dirección observada.

Para las horas subsiguientes el campo de viento adquiere una componente más sur, por lo que se observa que la pluma de contaminantes que originalmente se disponía en dirección SE-NO, va rotando hacia el norte, y a las 2 hs (no se muestra) Ezeiza registra viento en superficie del Oeste lo que asociado a un giro anticiclónico da lugar a una deformación de la pluma apretando las isolíneas de concentración en el sur del conurbano.

El campo de las 3hs muestra que el viento proviene del sur, y en las horas siguientes rota hacia el oeste y luego al noroeste. Esto provoca que la pluma se elongue inicialmente más hacia el norte para luego ir rotando hacia el este-sudeste. A las 9 hs el campo de viento es predominantemente del oeste por lo que la pluma de contaminantes se estará dispersando hacia el este.

A las 15 hs se observa que en Aeroparque se registra viento débil del NE, que podría asociarse al efecto de la brisa, esto genera un redireccionamiento de la pluma hacia el sur de las fuentes de emisión. En las horas subsiguientes el viento rota anticiclónicamente hasta adquirir una componente sur al sur del AMBA en el campo de las 18hs, esto ocasiona un desplazamiento de la pluma de contaminantes hacia el nor-noreste. A partir de las 21 hs el

campo de viento en superficie se presenta del NE, produciendo una rotación de la pluma de contaminantes hacia el SO.

Si se intercomparan las corridas #1 y #2 de la Figura 6.27 con las correspondientes de la Figura 6.28, se verá que la forma, disposición, alcance y espesor de la pluma es similar para ambas, modificándose los valores de las concentraciones en superficie.

Tanto en la corrida #1 como de la #2 (Fig. 6.28), se observa que no se supera en ningún lugar ni momento el Estándar de Calidad de Aire.

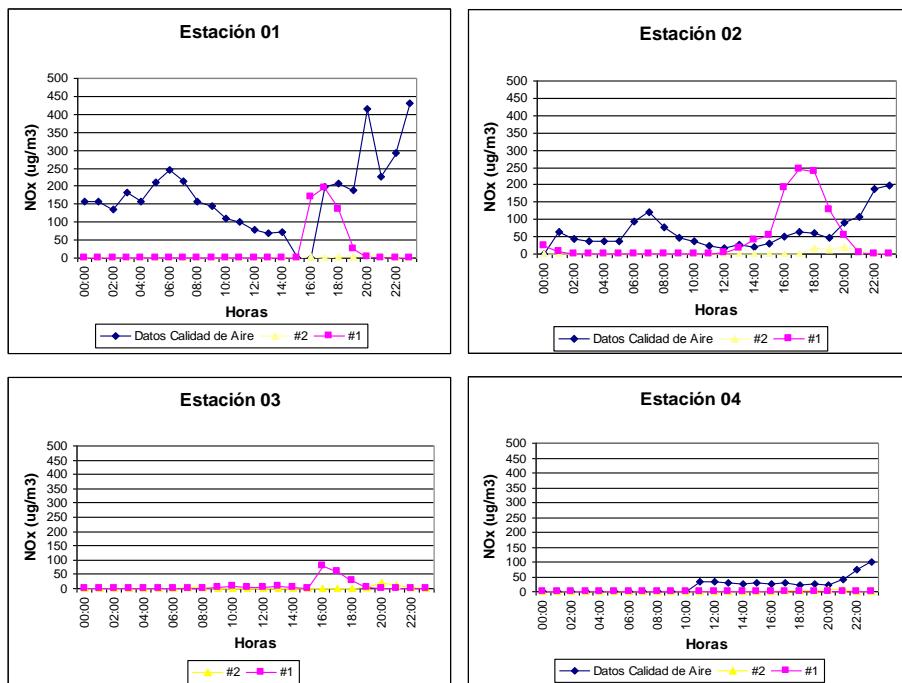


Figura 6.29: Concentraciones de NOx en superficie para las mediciones de calidad de aire (azul), los valores estimados por el modelo CALPUFF para la corrida #1 (rosa) y para la corrida #2 (amarillo).

Las Figuras 6.29 ilustran la comparación entre los valores horarios de concentración de NOx observados en las estaciones de monitoreo y los estimados con el modelo CALPUFF para el día 15 de enero. Las concentraciones observadas son mayores que las estimadas por el modelo en las estaciones 1 y 2. Desde las primeras horas del día 15 la estación 1 muestra concentraciones mayores a las modeladas para prácticamente todas las horas. Es notable el descenso en la concentración para aquellas horas en las que la dirección del viento en las

estaciones meteorológicas costeras rotó al NNE, tal como puede verse en la representación que produjo en el campo de viento el CALMET para la corrida #2 de ese día, al ingresar aire limpio desde el Río de la Plata. Las concentraciones indican un importante aporte de las fuentes móviles y otras fuentes que posiblemente no han sido relevadas para hacer este estudio de diagnóstico de calidad de aire en la región. En la estación de monitoreo 3 no se realizaron observaciones ese día y en la estación de monitoreo 4 las observaciones comenzaron a las 10 hs. En las estaciones 1, 2 y 4 se observan los máximos relativos en las concentraciones producto de la intensificación en el tránsito durante las horas pico (7 a 9 hs y de 18 a 20 hs). En este día en particular en las tres estaciones el incremento de las concentraciones en horas vespertinas permanece constante o en aumento aún a medianoche. Esto podría estar relacionado con mayor tránsito con dirección al Municipio de la Costa debido a que se trata de una fecha que marca el inicio del recambio turístico del verano (La Nación, 17 de enero de 2002). En las estaciones 1, 2 y 3 los resultados de CALPUFF cuando los campos meteorológicos provienen del modelo BRAMS muestran un incremento en la concentración durante las 14 y 21 hs. Si bien el modelo para la corrida #1 representa una brisa de río que parece excesivamente intensa durante esas horas, el incremento en la concentración modelada está relacionado con el desarrollo de la capa límite interna simulada con el esquema de Batchvarova y Gryning (1994), disminuyendo el tope del volumen de aire en el cual los contaminantes podrán dispersarse y diluirse. Las isolíneas de igual altura de capa límite en esas horas muestran un fuerte gradiente en dirección perpendicular a la costa (Fig 6.26 der.), con valores modelados que oscilaban entre 600 y 900 m a las 16 hs. Este gradiente concuerda con los campos de altura de capa límite que el modelo BRAMS calcula a partir de la energía cinética (Fig. 6.26 izq.).

El contraste de temperatura entre la superficie terrestre y la del río fue uno de los mecanismos que disparó la brisa de río en las simulaciones con BRAMS y de acuerdo a lo que se muestra en la Figura 6.25, la intensidad del viento habría aumentado por la presencia simultánea del centro de circulación anticiclónica ubicado al NO del AMBA.

En las Fig. 6.30 se observan los resultados correspondientes al SO<sub>2</sub>, los cuales muestran comportamiento similar a lo analizado para el NOx. En las concentraciones de este gas existe un efecto más marcado del incremento del tráfico en las horas pico, especialmente visible en la estación de monitoreo 1. El modelo no fue capaz de simular con ninguna de las dos configuraciones elegidas para este día las concentraciones observadas. Sólo la estación 2 muestra algunas concentraciones débiles asociadas con viento del E o del NE, no siendo indicativo del efecto de alguna fuente en particular entre las modeladas en el CALPUFF.

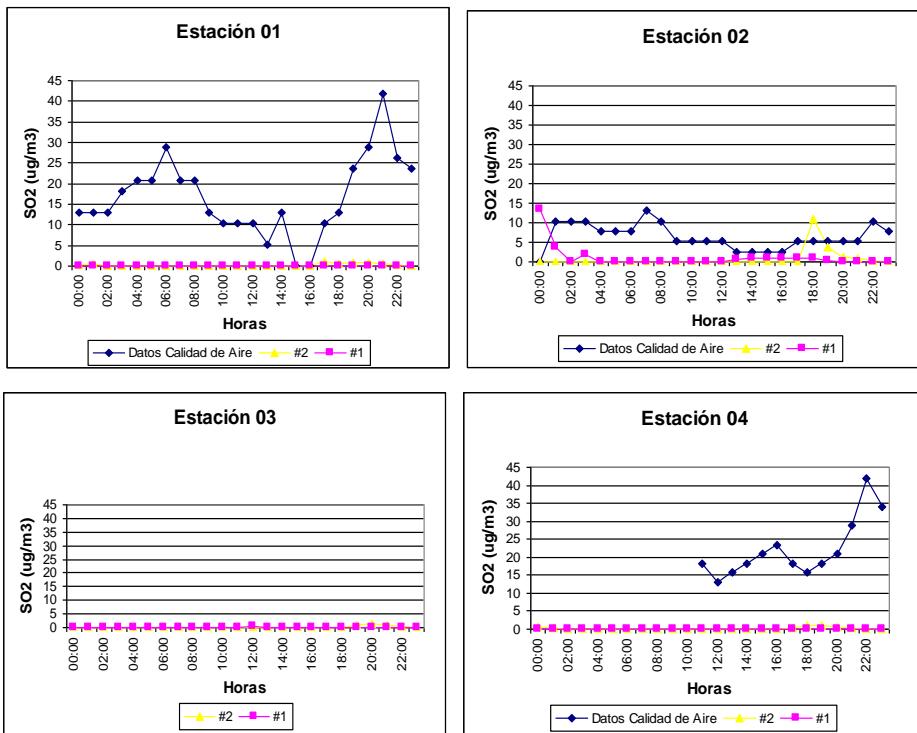


Figura 6.30: Concentraciones de SO<sub>2</sub> en superficie para las mediciones de calidad de aire (azul), los valores estimados por el modelo CALPUFF para la corrida #1 (rosa) y para la corrida #2 (amarillo).

## **CONCLUSIONES**

En este trabajo se estudió el aporte a la contaminación del aire de las emisiones de un complejo industrialemplazado al sudeste del Área Metropolitana de Buenos Aires. Para ello, se utilizó el modelo de dispersión CALPUFF. Se estimó la distribución espacial de las concentraciones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> y su variación con el tiempo. Estos contaminantes se eligieron por ser de tipo primario y porque están regulados por la normativa correspondiente a la jurisdicción en que se emplaza el complejo industrial y por la posibilidad de impacto a escala local o urbana debido a la proximidad de las fuentes a una megaciudad. Las concentraciones obtenidas fueron comparadas con mediciones de calidad de aire a fin de evaluar el desempeño del sistema de modelado.

En la preparación de los campos meteorológicos de entrada al CALPUFF se utilizaron dos estrategias. Una de ellas consistió en considerar solamente los datos observacionales de superficie y altura en las estaciones meteorológicas ubicadas en el AMBA, en un modo diagnóstico. Alternativamente, se acopló un modelo atmosférico de alta resolución (modelo BRAMS) y el sistema de modelado de dispersión de contaminantes (CALPUFF), con el objetivo de explorar su desempeño en modo pronóstico.

Para este trabajo se seleccionaron dos casos de estudio diferentes. El primero correspondió a una situación meteorológica asociada al pasaje de un frente frío sobre la ciudad de Buenos Aires. En el segundo caso, se eligió un día en el cual las condiciones meteorológicas estuvieron dominadas por un sistema de alta presión ubicado sobre la provincia de Buenos Aires. El objetivo fue el de determinar la influencia de distintos entornos sinópticos en la respuesta del sistema de modelado, específicamente a partir de las condiciones de dispersión de los contaminantes.

Es la primera vez que se encara en Argentina el uso de dos sistemas de modelado acoplados (un modelo atmosférico de alta resolución y un modelo de dispersión). Constituye una evolución en el grado de conocimiento sobre el desempeño de un sistema avanzado de modelado atmosférico y de contaminantes en la mesoscala atmosférica en el país. El trabajo de investigación ha resultado de especial interés ya que el complejo industrial se encuentra en las cercanías del Área Metropolitana de Buenos Aires, que constituye el mayor conglomerado urbano del país.

El sistema permitió incorporar las variaciones espaciales y temporales del flujo y la influencia del terreno. También resultó de importancia que incluya reacciones químicas, de manera de estimar concentraciones más realistas en contaminantes que reaccionan

químicamente en la atmósfera generando nuevas especies. Al no suponer condiciones estacionarias ni homogéneas, pudieron ser representados los ciclos diurnos de todas las variables así como las capas límites internas y la isla de calor urbana en forma realista y su influencia sobre los campos de concentración. De este modo, la expectativa acerca de los resultados esperados fue que las concentraciones estimadas fueran representativas de la realidad.

El modelo BRAMS fue capaz de reproducir el entorno de escala sinóptica responsable de las variables atmosféricas de relevancia en los procesos de transporte y dispersión de los contaminantes en la atmósfera en los estudios de caso seleccionados. Si bien representa adecuadamente la dinámica atmosférica, presentó algunas deficiencias en relación a la intensidad de los sistemas cerca de superficie. Esto se encuentra relacionado con un error sistemático del modelo detectado en las múltiples aplicaciones realizadas y documentadas en distintas publicaciones. Las diferencias fueron más notorias en la representación de las variables meteorológicas en el estudio de caso correspondiente a la situación frontal sobre la ciudad de Buenos Aires. Un retraso respecto del pasaje frontal en la ciudad, y la subestimación en la intensidad del campo de movimiento en las horas previas al pasaje del frente, así como las perturbaciones relacionadas con la actividad convectiva, fueron los causales de las mayores diferencias entre las dos configuraciones seleccionadas para cada caso. Con todo, puede considerarse, que BRAMS mostró una correspondencia espacial y temporal satisfactoria. Los resultados del modelado en alta resolución de la situación anticyclónica, muestran el desarrollo de una circulación local mucho más intensa que la indicarían los datos observacionales de superficie disponibles, debido principalmente a la localización de un centro anticyclónico al oeste del AMBA, que al final de la simulación se desplazó hacia el SO, intensificando la circulación de la brisa río-tierra. En este aspecto es necesaria la realización de estudios de situaciones similares para analizar la respuesta y sensibilidad del modelo BRAMS, que incluyan observaciones con una mayor resolución espacial y temporal. La deficiente distribución espacial de la red de estaciones meteorológicas de superficie y altura en el país, resultan determinantes a la hora de mostrar la eficiencia del modelo BRAMS para este tipo de aplicaciones.

El modelo de dispersión CALPUFF fue capaz de reproducir la pluma de contaminantes emitidos por el conjunto de fuentes puntuales continuas que componen el complejo industrial. Presentó sensibilidad a los distintos campos de viento y condiciones de turbulencia asociadas a la determinación de las concentraciones de contaminantes en el aire. El campo de

concentraciones representado por el modelo se mostró consistente con el campo de movimiento generado por el modelo en cada una de las configuraciones y para ambos casos de estudio. La limitada cantidad de fuentes simuladas por el modelo impidió generar un campo de concentraciones acorde a los valores observados en las 4 estaciones de monitoreo instaladas en el área del complejo industrial de Dock Sud.

Ana G. Ulke  
Director

María Laura Mayol  
Tesis

María I. Gassmann  
Co-director

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Ahrens, D. C. 1993. Essentials of meteorology, An Invitation to the Atmosphere, West Publishing Company, USA, 429 pp.
- Allwine K.J., Whiteman C.D. 1985. MELSAR: A mesoscale air quality model for complex terrain. Volume 1-Overview, technical description and user's guide. Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
- Batchvarova E, Gryning S-E,. 1994. An applied model for the height of the daytime mixed layer and the entrainment zone. *Boundary-Layer Meteorology* Vol 71, N°3 .
- Bogo H, Otero M, Kreiner AJ, Ozafrán M, Negri M, 2003. Study of atmospheric particulate matter in Buenos Aires. *Atmospheric Environment* 37, 1135-1147.
- Bogo H., D.R. Gomez, S.L. Reich, R.M. Negri, E. San Román, 2001. Traffic Pollution in a downtown site of Buenos Aires City, *Atmospheric Environment* 35, 10, 1717-1727.
- Bogo, H., Negri, R.M., San Román, E., 1999. Continuous measurement of gaseous pollutants in Buenos Aires City. *Atmospheric Environment* 33, 2587–2598.
- Camilloni I.A., 1995. Detección de la señal de la isla urbana de calor y de variaciones climáticas. Tesis Doctoral. FCEN. UBA.
- Camilloni I.A., Barros, V. 1994. Urban-biased trends in Buenos Aires' mean temperature, *Climate Research*, 4, 33-45.
- Camilloni I.A., Mazzeo N.A., 1987. Algunas características térmicas de la atmósfera urbana de la ciudad de Buenos Aires. *Anales Congremet* V, 14.2.1 – 14.2.5.
- Carson D.J. 1973. The development of a dry, inversion-capped, convectively unstable boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 99: 450-467
- Chen, S., Cotton,W.R. 1988. The sensitivity of a Simulated Extratropical Mesoscale Convective System to Long Wave Radiation and Ice-Phase Microphysics. *J. Atmos. Sci.*, 45, 3897-3910.
- Cotton WR, Pielke Sr. RA, Walko RL, Liston GE, Tremback CJ, Jiang H, McAnelly RL, Harrington JY, Nicholls ME, Carrió GG, McFadden JP, 2003. RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteor. and Atmos Physics*, 82, 5-29.
- Dosio A. 2005. Turbulent dispersion in the Atmospheric Convective Boundary Layer. PhD Thesis. Wageningen Universiteit. 163 pp

- Fagundez L. A., V. L. Fernández, T. H. Marino, I. Martín, D. A. Persano, M. Rivarola, Y Benítez, I. V. Sadañowski, J. Codnia, A. Zalt, 2001. Preliminary Air Pollution monitoring In San Miguel, Buenos Aires. Environmental Monitoring and Assessment 71: 61–70
- Figuerola P. Mazzeo N., 1998. Urban-rural temperature differences in Buenos Aires. Int. Journal of Climatology, 18, 15, 1709-1723
- Freitas ED, Martins LD, Silva Dias PL, Andrade MF, 2005. A simple photochemical model implemented in RAMS for tropospheric ozone concentration forecast in the Metropolitan Area of Sao Paulo, Brazil: Coupling and validation. Atmospheric Environment, 39: 6352-6361.
- Freitas S.R., Silva Dias M.A.F., 1995. Numerical modeling of trajectories from the biomass burning areas of Central Brasil and Amazonia, Regional Conference on Global Change, Sao Paulo, Brasil.
- Gallardo L, Olivares G, Langner J, Aarhus B, 2002. Coastal lows and sulfur air pollution in Central Chile, Atmospheric Environment, 36 (23), 3829-3841.
- Garcia Skabar, Y. 2007. Análisis enriquecidos, evaluación de su impacto en el pronóstico y su aplicación para describir circulaciones de mesoscala en el centro y norte de Argentina. Trabajo de Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias de la Atmósfera, FCEyN, U.B.A., 177 pp.
- Gassmann M.I., Mazzeo N.A. 2000. Air Pollution Potential: Regional Study in Argentina. Environmental Management 25, 375-382.
- Gassmann M.I., 1998. Potencial de Contaminación Atmosférica en Argentina. Tesis Doctoral. FCEN. UBA.
- Gassmann M.I., Ulke, A.G., 2008. A Case Study of Biomass Burning and its Smoke Dispersion to Buenos Aires city, Argentina, International Journal of Environment and Pollution 32,2: 311-331
- Gassmann M.I., Mazzeo N. 2001. Nocturnal Stable Boundary Layer Height Model and its Application. Atmospheric Research 57, 4, 243-255,
- Gevaerd, R., Freitas, S. R., 2006. Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte I: Descrição da metodologia e validação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 3a, 59-73, 2006.
- Grell, G. A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parametrizations. Mon. Wea. Rev., 121, 764-787.

- Grell, G.A., D. Devenyi. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, Vol.29, nº14, 1963.
- Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires. 2006. Decreto Reglamentario 198/06 de la Ley 1356
- Holtslag A.A.M., van Ulden A.P. 1982 Simple estimates of nighttime surface fluxes from routine weather data. *KNMI Scientific Report W.R. 82-4*, 11pp
- Holzworth, G. C. 1967. Mixing depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States. *Journal of Applied Meteorology* 6:1039–1044.
- Holzworth, G.C. 1972. Mixing heights, wind speed and potential for air pollution on the contiguous United States. *EPA Pub. A.P.101*, Washington.
- Hosker R. 1984. Flow and diffusion near obstacles. *Atmospheric Science and Power Production*.
- Huber A.H., Snyder W.H. 1982. Wind tunnel investigation of the effects of a rectangular-shaped building on dispersion of effluents from short adjacent stacks. *Atmospheric Environment* 17: 2837-2848
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandia L, Iredell M, Saha S, White G., Woollen J, Shu Y, LeetmaaA, Reynolds R, Cheliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo K, Ropelewski C, Wang J, Jenne R, Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77, 3: 437-471.
- Liu M.K., Yocke M.A. 1980. Siting of wind turbine generators in complex terrain. *J. Energy* 4: 10-16.
- Longo, K., Freitas, S. R., Ulke, A. G., Hierro, R. F., 2006. Transport of biomass burning products in Southeastern South America and its relationship with the South American Low Level Jet East of the Andes, 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Brazil, 24 to 28 April, 2006, American Meteorological Society, 121-129.
- Mahrt L. 1982. Momentum balance of gravity flows. *J. of Atmos Sciences* 39: 2701-2711
- Martin P. 2005. Contaminación del aire por material particulado en la Ciudad de Buenos Aires. Trabajo de Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias de la Atmósfera, FCEyN, U.B.A., 244 pp.

**Con formato:** Inglés (Reino Unido)

- Maul P.R. 1980. Atmospheric transport of sulfur compound pollutants. Central Electricity Generating Bureau MID/SSD/80/0026/R, Nottingham, England.
- Mazzeo, N.A., Nicolini, M. Y Moledo, L. 1973: Large scale estimation of dispersion efficiency of the atmosphere in the Argentine Republic, Proc. of the III Mundial Congress of Clean Air, Dusseldorf, Alemania.
- Mazzeo NA, Venegas LE, 2004. Some aspects of air pollution in Buenos Aires city, International Journal of Environment and Pollution, 22, 365-379
- Mazzeo N.A., Venegas L.E., Choren H. 2005. Analysis of NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub> concentrations measured at a green area of Buenos Aires City during wintertime. Atmospheric Environment 39 (2005) 3055–3068.
- Mazzeo, N.A., Gassmann, M.I. 1991. Mixing Heights and Wind Direction Analysis for urban and Suburban Areas of Buenos Aires City. Energy and Buildings 15- 16, 333-337.
- Mellor G.L., Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys. Space Phys. 20, 851-875.
- Molina MJ, Molina LT, 2004. Megacities and Atmospheric Pollution, Journal of the Air and Waste Management Association, 54, 644-680.
- Nicolini M, García Skabar Y, Ulke A.G., Saulo A.C. 2002. RAMS model performance in simulating precipitation during strong poleward low level jet events over northeastern Argentina. Meteorologica 27:89-98
- Nicolini M, García Skabar Y, Ulke A.G, Salio P. 2005 a. Simulación de una tormenta granicera en Mendoza. Anales del IX Congreso Argentino de Meteorología.
- Nicolini M, Torres Brizuela M., García Skabar Y. 2005b. Simulación de una tormenta tornádica usando un modelo de mesoscala de alta resolución. Anales del IX Congreso Argentino de Meteorología.
- O'Brien J.J. 1970. A note on the vertical structure of the eddy exchange coefficient in the planetary boundary layer. J. Atmos Sci, 27: 1213-1215.
- Oke T.R. 1978. Boundary Layer Climates.. Methuen, London, 372 pp.
- Onursal B., Gautam S., 1997. Contaminación atmosférica por vehículos automotores: Experiencias recogidas en 7 centros urbanos de América Latina. Informe del Banco Mundial.
- Pasquill F., Smith, F.B., 1983: Atmospheric Diffusion, 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons Inc., New York, USA.

- Pasquill F. 1961. The estimation of the dispersion windborne material. Meteorol. Mag. 90: 33-49.
- Perry S.G., Schwede D., Adams L., Paine R., Dennis M., Mills M., Strimaitis D., Yamartino R, Insley E. 1989. User's Guide to the Complex Terrain Dispersion Plus Algorithms for Unstable Situations (CTDMPLUS). Vol. 1, EPA/600/8-89/041, US EPA, Research Triangle Park, NC.
- Piccolo C. 1982. Influencia térmica del mar en un modelo de Capa Límite. Meteorologica 13, 1-2:
- Pielke R, Cotton W, Walko R, Tremback C, Lyons W, Grasso L, Nicholls M, Moran M Wesley D, Lee T, Copeland J, 1992. A comprehensive meteorological modelling system - RAMS. Meteor. and Atmos. Physics, 49, 69-91.
- Rodriguez MA, Brouwer J, Samuelsen GS, Dabdub D, 2007. Air quality impacts of Distributed Power Generation in the South Coast Air Basin of California 2: Model uncertainty and sensitivity analysis, Atmospheric Environment 41,27:5618-5635
- Ruiz J. 2004. El efecto de la humedad sobre el Jet del Chaco. Un caso de estudio. FCEN-UBA. Tesis de Licenciatura. 127 pp.
- Russell AG, Dennis R, 2000. NARSTO Critical Review of Photochemical Models and Modeling, Atmospheric Environment, 34 (12), 2283-2324.
- Salio P, Campetella C., Ruiz J, García Skabar Y., Nicolini M. 2005. Nevada en la costa bonaerense: un caso de estudio. Anales del IX Congreso Argentino de Meteorología.
- Saulo A.C. , Ruiz J., García Skabar Y. 2007. Synergism between the low level jet and organized convection at its exit region. Mon. Weather Rev. 19: 4041-4058.
- Schmitz R, 2005. Modelling of air pollution dispersion in Santiago de Chile, Atmospheric Environment, 39 (11), 2035-2047.
- Schulman L.L, Scire J.S. 1980. Buoyant Line and Point Source (BLP) dispersion model user's guide. Document P-7304-B. Environmental Research & Technology Inc., Concord, MA, USA.
- Scian B., Quinteros Y. 1975. Capa de mezcla en la ciudad de Buenos Aires. Meteorologica 6-7
- Scire Joseph S., Robe Francoise R., Fernau Mark E., Yamartino Robert J. 1998. A User's Guide for the CALMET Meteorological Model, Earth Tech, Inc.

- Scire Joseph S., Strimaitis David G., Yamartino Robert J. 2000. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model, Earth Tech, Inc.
- Seaman N, 2000. Meteorological modeling for air quality assessments, Atmospheric Environment, 34, (12-14), 2231-2259.
- Seinfeld JH, Pandis SN, 1998. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Servicio Meteorológico Nacional (2001) Boletín Meteorológico 23 y 24 de noviembre de 2001.
- Servicio Meteorológico Nacional (2002) Boletín Meteorológico 15 y 16 de enero de 2002.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005: A Description of the Advanced Research WRF Version 2 (pdf file)
- Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations. Part I, The basic experiment. Mon. Wea. Rev., 91, 99-164.
- Souza, E. P., E. M. Silva. 2002: Impacto da Implementação de uma Parametrização de Convecção Rasa em um Modelo de Mesoscala. Descrição e Teste de Sensibilidade do Esquema. Revista Brasileira de meteorología, Vol.18, nº1, 33-42.
- Stull R.B. 1988. An introduction to boundary Layer Meteorology, Kluwer, USA, 666 pp.
- Stunder, B.J.B. (1997) *NCEP Model Output FNL Archive Data. TD 6141*, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, USA, p.6.
- Tripoli, G. J. , W. R. Cotton. 1982: The Colorado State University three dimensional cloud/mesoscale model- 1982. Part I: General theoretical framework and sensitivity experiments. J. de Rech. Atmos., 16. 185-220.
- Ulke AG, 2004. Daytime ventilation conditions in Buenos Aires city, Argentina. International Journal of Environment and Pollution, Special Issue: Air quality in South America, Vol. 22, Nº 4, 379-395.
- Ulke Ana G. 2000. Air pollution potential in Buenos Aires city, Argentina. Int. J. Environment and Pollution, 14, 1-6.
- Ulke A.G, Saulo A.C., Nicolini M. 2001. Simulación con el modelo de mesoscala RAMS de las condiciones asociadas a la ocurrencia de un mesosistema convectivo. IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología y VIII Congreso Argentino de Meteorología.

- Ulke Ana G., Mazzeo A. Nicolás. 1998. Climatological Aspects of the daytime mixing height in Buenos Aires city, Argentina. *Atmospheric Environment*, 32, 1615-1622.
- Ulke, A. G. 1992. Difusión y depósito de contaminantes emitidos en la capa límite atmosférica, Trabajo de Tesis Doctoral, Departamento de Ciencias de la Atmósfera, FCEyN, U.B.A., Vol. I y II, 419 pp.
- Venegas, L.E., Mazzeo, N.A. 2006. Modelling of urban background pollution in Buenos Aires City (Argentina). *Environmental Modelling & Software* 21 (2006) 577–586.
- Walko, R.L., L. E. Band, J. Baron, T.G.F. Kittel, R. Lammers, T.J. Lee, D. Ojima, R.A. Pielke, C. Taylor, C. Tague, C.J. Tremback, and P.L. Vidale. 2000. Coupled Atmosphere-Biophysics-Hydrology Models for Environmental Modeling. *J. Appl. Meteor.*, 39, 931-944.
- World Bank Project ARG 96/019/B/01/99, 1997. The Air Quality Situation in the Grand Buenos Aires Area.