

ACOPLAMIENTO DE LA ATMÓSFERA LIBRE CON EL CAMPO DE VIENTOS LOCALES EN UNA REGIÓN TROPICAL DE TOPOGRAFÍA COMPLEJA. CASO DE ESTUDIO: VALLE DE ABURRÁ, ANTIOQUIA, COLOMBIA

SURFACE WIND COUPLING FROM FREE ATMOSPHERE WINDS TO LOCAL WINDS IN A TROPICAL REGION WITHIN COMPLEX TERRAIN. CASE OF STUDY: ABURRA VALLEY ANTIOQUIA, COLOMBIA

MAURICIO CORREA

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental,- GIGA-, Colombia, Universidad de Antioquia, mcorrea@udea.edu.co

CLAUDIA ZULUAGA

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental,- GIGA-, Colombia, Universidad de Antioquia, clazuluaga@yahoo.es

CARLOS PALACIO

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental,- GIGA-, Colombia, Universidad de Antioquia, cpalacio@udea.edu.co

JUAN PÉREZ

Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, -GRIDIC-, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, jdperez@elpoli.edu.co

JOSÉ JIMÉNEZ

Universidad Nacional de Colombia., Sede Medellín, Facultad de Minas, jffimene@unalmed.edu.co

Recibido para revisar marzo 3 de 2008, aceptado octubre 28 de 2008, versión final noviembre 25 de 2008

RESUMEN: Se utiliza información proveniente de estaciones meteorológicas, globos libres y globos cautivos instrumentados dentro y fuera del Valle de Aburrá, Antioquia – Colombia, para analizar la interacción y el acoplamiento de los vientos en la atmósfera libre con patrones de circulación al interior del valle el día 24 de febrero de 2007. En las primeras horas de la mañana los vientos del valle fueron débiles y se alinearon con la topografía, desfasados casi 90° con respecto a la circulación por encima de él (viento este). Posteriormente, durante la tarde, con el incremento de la radiación y la activación de los procesos de turbulencia vertical, los vientos internos se acoplaron con la circulación externa. Los resultados obtenidos durante la campaña de medición sugieren que la canalización del viento inducida por presión y el transporte descendente de momento pueden actuar en ciertas ocasiones como mecanismos responsables de la circulación al interior de este valle.

PALABRAS CLAVE: Terreno complejo, Vientos en valles, Meteorología de montaña, Canalización inducida por presión, Transporte descendente de momento, Valle de Aburrá.

ABSTRACT: Data from meteorological gauging stations, pilot balloons and tethered balloons within Aburrá valley, in Antioquia, Colombia are used to study the linking and coupling between free-atmosphere winds and internal valley winds on February 24th 2007. At the beginning of the morning, winds inside valley were weak and followed

The direction of topography, so that they had almost 90° difference in comparison with above wind direction (blowing from east). Some hours later, as the radiation and the vertical turbulence processes began, inner valley winds were strongly affected by the presence of free-atmosphere winds so they appeared to be perfectly coupled with outer circulation. The observed data show that, in certain conditions, pressure-driven channeling and downward momentum flux can be used to explain wind circulation inside the Aburrá valley.

KEYWORDS: Complex terrain, Valley Winds, Mountain Meteorology, Pressure-driven channelling, downward momentum transport, Aburrá Valley.

1. INTRODUCCIÓN

Entender y predecir el comportamiento de los procesos atmosféricos es esencial para el estudio y análisis de fenómenos hidrometeorológicos en terrenos complejos. Este es el caso del Valle de Aburrá (V.A.): un territorio altamente urbanizado que, además de estar ubicado en una región tropical, se encuentra en una zona montañosa estrecha donde el estudio de los procesos de circulación y dispersión del aire y de los contaminantes atmosféricos requiere un conocimiento detallado de transportes de masa, momentum y energía.

En la atmósfera libre, las características del viento dependen en buena medida de las condiciones de circulación que gobiernan la mesoescala y la escala sinóptica; pero conforme la altitud decrece, la topografía y otras propiedades del suelo generan forzamientos dinámicos y térmicos capaces de producir importantes modificaciones en la dirección e intensidad de los vientos [1, 2, 3, 4]. Además, en algunas regiones montañosas pueden darse fuertes diferencias locales de superficie debido, por ejemplo, a: presencia de cuerpos de agua, urbanismo, tipos de vegetación, variabilidad significativa en el albedo, contenidos de humedad del suelo, conductividad y capacidad térmica, entre otros, todo lo cual puede incidir en el desarrollo de complejos sistemas locales de circulación [5].

Whiteman y Doran (1993) [6] identificaron cuatro mecanismos de forzamiento que determinan la estructura vertical de los vientos horizontales. Esos mecanismos son: transporte descendente de momento horizontal, canalización forzada, canalización inducida por gradientes de presión y flujos inducidos térmicamente. Los tres primeros son calificados como forzamientos dinámicos y dependen fundamentalmente de los flujos en la atmósfera

libre. En el primer caso el flujo desciende hacia el interior del valle de modo que la circulación local reproduce los patrones de circulación en la mesoescala; este efecto puede ser causado por una mezcla turbulenta vertical o por ondas de gravedad, y ocurre con mayor frecuencia en condiciones atmosféricas inestables y neutras, en valles anchos, de fondo plano y laderas de baja altura. El segundo mecanismo, de canalización forzada, se desarrolla cuando los vientos de mesoescala logran ingresar al interior del valle en razón del tamaño, topografía y orientación de las laderas, logrando que los vientos de montaña se alineen con el eje del valle. Por último, la canalización inducida por presión se presenta cuando los vientos en el valle responden al mismo gradiente de presión que condiciona los vientos de mesoescala [7].

A diferencia de los forzamientos dinámicos, los térmicos dependen de gradientes de temperatura que se establecen a lo largo del eje del valle o en el sistema planicie-montaña, en condiciones hidrostáticas o cuasi hidrostáticas [2,8]. En tales circunstancias los vientos del valle no se acoplan necesariamente con la dirección de los vientos de mesoescala que circulan sobre él, pues responden más bien a gradientes de presión locales [6]. Este forzamiento térmico produce campos de vientos valle arriba durante el día y valle abajo durante la noche, con lo cual se generan zonas internas con fuertes flujos de calor sensible en superficie [6]. Estos vientos se explican mediante el denominado *efecto volumen*, según el cual se producen acumulaciones o vaciamientos de energía térmica en algunas partes del valle en la medida en que el valle se estreche o amplíe a lo largo de su eje. Además, en las transiciones noche-día y día-noche se desarrollan patrones de circulación sobre las laderas asociados a gradientes de presión horizontales que se establecen entre el

aire sobre las laderas y el aire aposentado sobre la base del valle [9].

Así pues, las circulaciones generadas por forzamientos dinámicos están más condicionadas por los flujos en la atmósfera libre, y las circulaciones asociadas a forzamientos térmicos son importantes cuando la velocidad del viento externo es débil o cuando la orientación de la topografía, o la estrechez misma del valle, dificultan los acoplamientos. En cualquier caso, es un hecho que la circulación externa puede afectar la circulación al interior del valle [6].

En Colombia ha habido muy poca investigación sobre estos fenómenos. El trabajo de Adarve y Molina (1984) [10] es tal vez la primera aproximación al estudio de la circulación de vientos en el Valle de Aburrá, a partir de datos tomados en superficie; estos autores concluyen que el viento diurno en el valle ingresa predominantemente por el norte. Otro estudio que va más allá de la descripción de los patrones de circulación es el de Ríos (2001) [11], quien hace una primera aproximación al estudio del rompimiento de la inversión térmica. En el trabajo de Mejía (2002) [12] se plantea un modelo conceptual de la circulación en el Valle de Aburrá para condiciones de verano, y se hace un compendio de las ecuaciones fundamentales para el estudio de la circulación y del comportamiento de la capa límite atmosférica, teniendo en cuenta aspectos relacionados con efectos orográficos y urbanísticos; Mejía propone un modelo conceptual de circulación diurna en el cual el viento asciende predominantemente desde el norte del valle hacia el sur, drenando en su recorrido las subcuencas que encuentra a su paso. Más recientemente, Rendón [13] presentó un modelo distribuido para estudiar la evolución de la inversión térmica en el valle; y Pérez [14] realizó unos ejercicios de modelación numérica sobre la circulación en el valle utilizando RAMS, con datos de viento y temperatura medidos en la atmósfera local (entre laderas).

El presente trabajo considera las condiciones de interacción y acoplamiento de los flujos de viento en la atmósfera libre con los patrones de circulación al interior del Valle de Aburrá para el día 24 de febrero de 2007. Los datos horarios fueron obtenidos en una campaña de medición de las principales variables atmosféricas,

mediante lanzamiento de globos en dos estaciones de sondeo e información proveniente de cinco (5) estaciones meteorológicas distribuidas dentro y fuera de la zona de estudio.

2. CARACTERÍSTICAS DEL VALLE DE ABURRÁ -V.A.-

El V.A. está localizado en el costado noroccidental de Suramérica, sobre las estribaciones de la Cordillera Central Andina, centro-sur del departamento de Antioquia, Colombia (entre los 6.0° - 6.5° N y 75.5° - 75.7° W). La altitud de su base es de unos 1.500 metros sobre el nivel del mar en promedio, un largo aproximado de 60 kilómetros y ancho variable entre crestas de unos 10 km promedio, aunque en su parte más ancha puede alcanzar hasta 20 km. Este es un valle de alineamiento quebrado compuesto por dos segmentos con diferente orientación, y con el río Aburrá que nace al sur: el segmento norte tiene su eje inclinado aproximadamente 45° respecto al norte geográfico; mientras que el segmento sur inclina su eje aproximadamente 15° con el norte.

El valle tiene una base relativamente estrecha y está enmarcado por una topografía irregular y pendiente, cuyas laderas ascienden hasta los 2800 metros sobre el nivel del mar; y tiene elementos topográficos que sobresalen, tales como los cerros Nutibara, El Volador y El Picacho. Además, el V.A. es una zona urbanizada, en cuya superficie se entremezclan zonas de bosques aislados con una malla urbana más o menos densa, que alberga unos 3'000.000 de habitantes; pero la calidad y cantidad de la vegetación natural ha experimentado deterioro y cambios severos, sobre todo en las partes altas de ambas laderas, debido a la fuerte presión urbanística.

Las características geográficas y topográficas del V.A. están asociadas a condiciones hidrometeorológicas muy particulares. Por una parte, la ZCIT (zona de convergencia intertropical) está definida por la convergencia de los vientos alisios, cuya posición oscila alrededor del Ecuador geográfico. Sobre Colombia, durante los meses de octubre-noviembre, la ZCIT se traslada hacia el sur, alcanzando en el mes de enero (verano del

hemisferio sur) su posición extrema meridional, en los 2°N. Durante la temporada de abril y mayo, la ZCIT se traslada hacia el norte, alcanzando su posición más septentrional en el mes de julio (verano del hemisferio norte) y ubicándose en los 10°N. Por lo anterior, el V.A. es afectado a lo largo del año tanto por los vientos alisios del noreste como por los del sureste.

De otro lado, el océano Pacífico ejerce un efecto importante sobre la hidroclimatología de Colombia, y en particular de la región occidental y centro del país [15], debido principalmente a la acción de la corriente del Chorro del Chocó, que transporta grandes cantidades de humedad desde el Pacífico hacia el interior del país. El Chorro del Chocó choca inicialmente contra el ramal occidental de la cordillera de los Andes y se encuentra con los vientos alisios del este, en circunstancias que favorecen la convección profunda y la abundante precipitación sobre el occidente del país. Estos vientos del Chorro del Chocó exhiben un marcado ciclo anual, siendo más fuertes en los meses de septiembre – noviembre y más débiles durante los meses de febrero y marzo [16].

3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

El principal objetivo de esta investigación es avanzar tanto en el entendimiento de los procesos atmosféricos que tienen lugar en el V.A., como en el desarrollo y aplicación de modelos atmosféricos a condiciones locales, tropicales, sobre terrenos complejos. La información sobre la evolución de las principales variables atmosféricas en la escala regional (físicas y termodinámicas) fue capturada y registrada para diferentes horas del día 24 de febrero de 2007, para diferentes alturas sobre la base del V.A. y en diferentes puntos distribuidos en su área de influencia. En la campaña de medición se obtuvieron datos de presión, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, tanto por el papel determinante de estas variables en el comportamiento general de la baja atmósfera [17] como porque esta información se requiere

para correr modelos numéricos ajustados a las condiciones locales [18].

Durante la campaña de medición se ubicaron dos (2) estaciones de sondeo en el interior del V.A. (figura 1): una en la Universidad de Antioquia (UdeA: 6.27°N – 75.57°W, 1470 msnm), y la otra en el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (PCJIC: 6.21°N – 75.58°W, 1500 msnm), en las cuales se utilizaron globos piloto (globos cautivos y libres), teodolitos meteorológicos y sensores con datalogger MadgeTech PRHTemp101 para la captura y almacenamiento de la información de presión, humedad relativa y temperatura. El tiempo total de medición para ambas estaciones fue de 12 horas, iniciando a las 6 de la mañana (11:00 horas UTC) y finalizando con el último lanzamiento de globos a las 6 de la tarde (23:00 horas UTC). Con el fin de obtener registros horarios acerca de las condiciones de velocidad y dirección del viento, se hicieron lanzamientos simultáneos de globos piloto desde las dos estaciones (UdeA y PCJIC). Los datalogger fueron sujetos a un globo cautivo para el registro de temperatura, presión y humedad cada 10 minutos y a diferentes alturas sobre el nivel del piso.

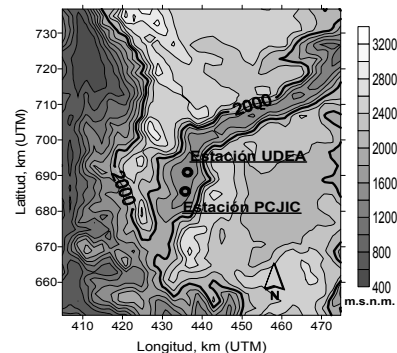


Figura 1. Ubicación estaciones sondeo
Figure 1. Sounding stations location

Por otra parte, se tuvo acceso a información meteorológica complementaria correspondiente a datos de viento, temperatura, presión y humedad relativa obtenida simultáneamente cada 10 minutos en 5 estaciones automáticas (figura 2) La información fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Centro y Norte de Antioquia, CORANTIOQUIA, para el mismo día 24 de febrero de 2007. Las estaciones

fueron: Pajarito (6.28° N - 75.63° W, 2000 msnm), Metro (6.34° N - 75.55° W, 1423 msnm), Envigado (6.17° N - 75.50° W, 1530 msnm), Belmira (6.63° N - 75.64° W, 3000 msnm) y Aeropuerto José María Córdoba de Rionegro (6.22° N - 75.59° W, 2400 msnm), las dos últimas ubicadas por fuera del valle, al norte y oriente de él respectivamente.

Toda la información reunida durante la campaña de medición fue almacenada en una base de datos en Excel y manejada en IDL para generar los perfiles verticales de las variables en estudio. Adicionalmente, se almacenaron imágenes de satélite con una periodicidad de 30 minutos, las cuales fueron analizadas para la jornada de medición. Este material aportó información adicional sobre el comportamiento del campo de vientos en la escala sinóptica.

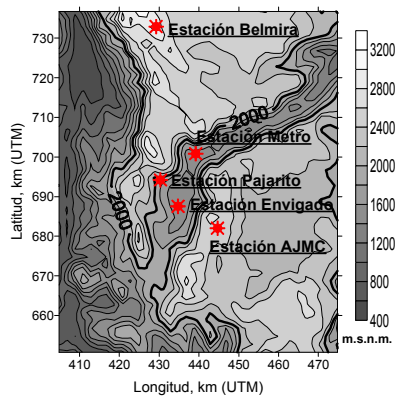


Figura 2. Ubicación estaciones meteorológicas
Figure 2. Meteorological gauging stations location

4. ANÁLISIS DE DATOS

A continuación se presenta el análisis de los datos obtenidos durante la campaña de medición del día 24 de febrero de 2007.

4.1 Vientos De Mesoescala

Con ayuda de la información obtenida de la página del NCEP/NCAR Reanalysis (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>) fue posible inferir que los patrones predominantes de la

circulación del viento por encima del valle fueron este (E) y sureste (SE) (figura 3).

Por otra parte, la información suministrada por la estación Aeropuerto José María Córdoba (AJMC), ubicada al oriente del V.A., a una altura de 2400 msnm, mostró que en las primeras horas de la mañana hubo velocidades bajas y constantes (3 m/s), con vientos soplando desde el sureste ($S40^{\circ}E$). Posteriormente, con el incremento de la radiación y el ascenso de la temperatura, aumentó la magnitud del viento, que alcanzó su máximo valor (5.0 m/s) a la una de la tarde (18:00 horas UTC); este incremento de velocidad estuvo asociado a un cambio de dirección del viento, que entonces sopló desde el este (E). Finalmente, durante las últimas horas de la tarde, la velocidad y dirección del viento presentó pocas fluctuaciones y osciló alrededor de los 4 m/s, con dirección $S80^{\circ}E$.

Para el caso de la estación Belmira, ubicada al norte del V.A. a una altura de 3000 msnm, los registros de la mañana indicaron velocidades del viento del orden de 5.8 m/s, soplando desde el $S45^{\circ}E$ y $S30^{\circ}E$; de igual forma, en el periodo de mayor radiación entre 10 de la mañana y 3 de la tarde (15:00 a 20:00 horas UTC), la magnitud del viento alcanzó sus valores más altos (alrededor de los 8 m/s) y la dirección del viento se mantuvo alrededor de $S65^{\circ}E$. Seguidamente se presentó un descenso de la velocidad del viento, hasta alcanzar los valores más bajos en las últimas horas de la tarde (en torno a los 4 m/s) sin presentar cambios significativos en la dirección.

En cuanto a la captura de datos a partir del lanzamiento de globos piloto en las estaciones UdeA y PJIC, estos suministraron valiosa información sobre el comportamiento del viento en el perfil vertical. Dichos registros permitieron identificar trayectorias y magnitud de la velocidad del viento, tanto al interior del valle como en la atmósfera libre. En la figura 4 se presentan los perfiles verticales del viento para cada hora en los dos puntos de medición.

La información capturada durante las dos primeras horas de lanzamiento de globos piloto (12:00 y 13:00 horas UTC) corresponde sólo a la circulación del viento en el interior del valle,

dato que la presencia de una espesa capa de bruma apenas permitió hacer el seguimiento de los globos hasta alturas no superiores a los 500 y 700 metros sobre la base del valle (1500 msnm).

Por lo anterior, no se cuenta con información relacionada con el comportamiento del viento que circulaba sobre el valle en las primeras horas de la mañana.

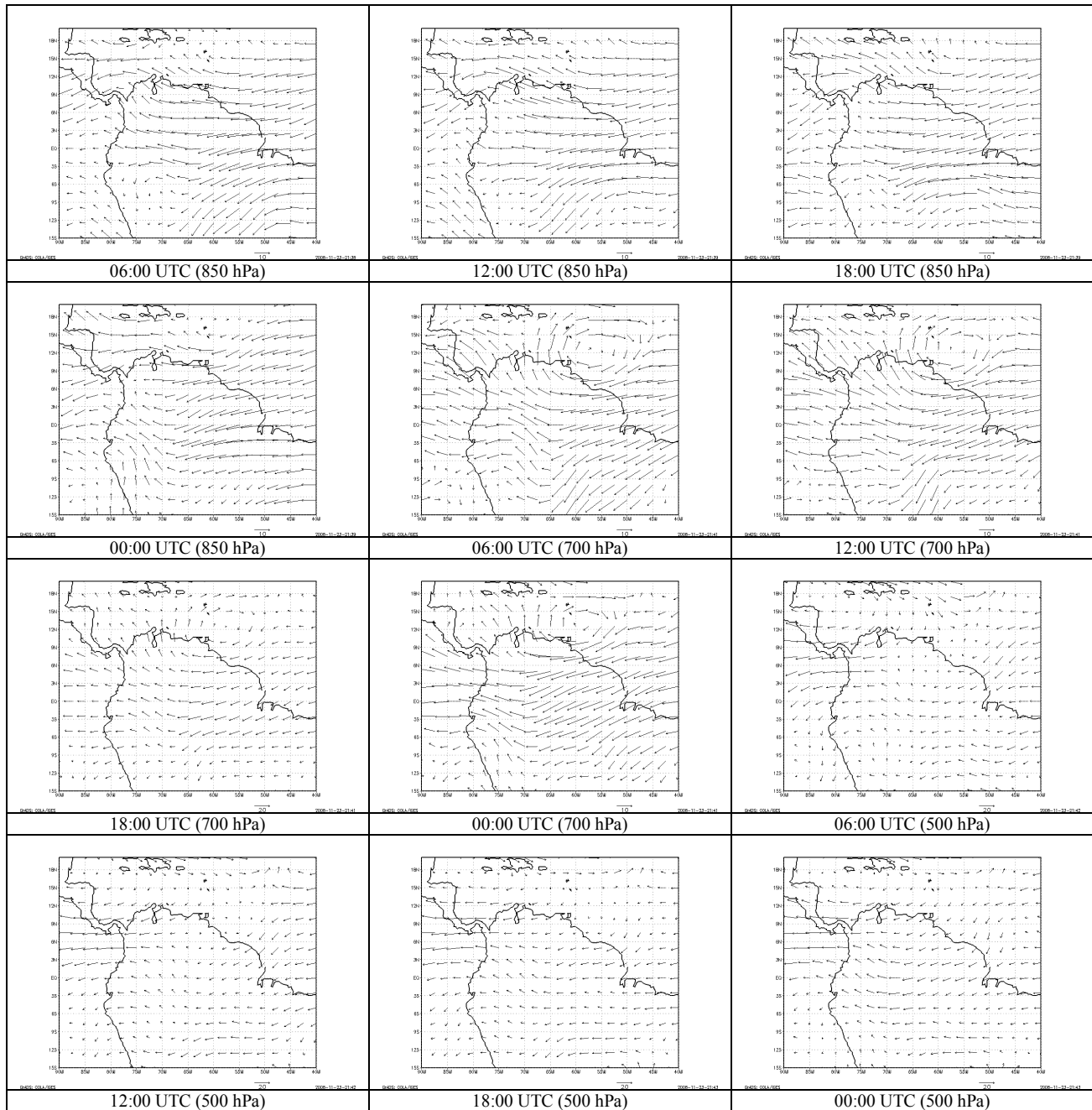


Figura 3. Campo de vientos a diferentes niveles de presión: 850, 700 y 500 hPa, fuente (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>)

Figure 3. Wind field to different pressure levels: 850, 700 y 500 hPa, from (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>)

4.2 Vientos Al Interior Del Valle

Con el propósito de determinar la evolución espacio-temporal del campo de vientos en los primeros metros de altura al interior del V.A. durante la jornada de medición, se hizo un análisis detallado para diferentes horas del día de los registros meteorológicos capturados en las estaciones de superficie.

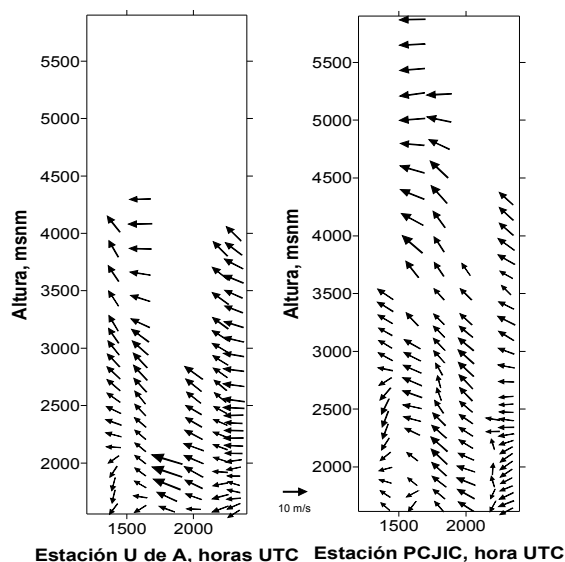


Figura 4. Evolución temporal del perfil vertical del viento en las estaciones UdeA y PCJIC
Figure 4. Temporal behavior of vertical wind profiles in UdeA and PCJIC stations

Durante la mañana (14:00 y 16:00 UTC) las estaciones Metro y UdeA registraron vientos alineados con el segmento sur del valle entrando por el noreste (flujos valle arriba), con velocidades bajas que oscilaron entre 1.6 y 2.5 m/s. Entretanto, las estaciones Envigado, Pajarito y PCJIC, registraron vientos predominantes del sureste, en dirección perpendicular al segmento sur del valle, con magnitudes de la velocidad similares a las de dos estaciones anteriores.

Al medio día (18:00 horas UTC) las estaciones Envigado, PCJIC, Pajarito y UdeA registraron vientos igualmente orientados con las direcciones este y sureste. Adicionalmente se presentó un incremento significativo de la velocidad del viento, que osciló entre 4.5 m/s (estaciones Pajarito y UdeA) y 7.5 m/s

(estaciones Envigado y PCJIC. La estación Metro presentó una leve desviación del vector viento de aproximadamente 15° , pasando de noreste a noreste.

A las 3 de la tarde (20:00 horas UTC) las estaciones Envigado, PCJIC, Pajarito y UdeA presentaron direcciones de viento concordantes, soplando desde el sur-sureste, con algunas diferencias en la magnitud del viento y velocidades más altas en las estaciones Envigado y PCJIC, donde se registraron vientos de hasta 7.5 m/s. En cuanto a la estación Metro, no se presentaron cambios significativos respecto a lo observado en las horas previas, tanto en dirección (noreste) como en intensidad del viento (4.5 m/s).

A las 5 de la tarde (22:00 horas UTC), los vientos registrados en las estaciones PCJIC, UdeA y Metro soplaron en dirección noreste, valle arriba; y las estaciones Envigado y Pajarito registraron vientos con dirección perpendicular al eje del segmento sur del valle (este). Además se presentó un leve descenso en la magnitud de la velocidad en todas las estaciones.

4.3 Relación De Los Patrones De Circulación Entre La Atmósfera Exterior Y La Interior Del Valle

En la figura 5 se presenta la relación de dirección del viento entre las estaciones por fuera del valle (AJMC y Belmira) y las estaciones interiores (UdeA y PCJIC), para diferentes horas del día. La figura 6 presenta la trayectoria de los globos piloto lanzados desde las estaciones UdeA y PCJIC durante la jornada de medición. En condiciones de estabilidad atmosférica (primeras horas de la mañana, con baja radiación solar y presencia de vientos débiles) los globo sonda de la estación UdeA, ubicada en una sección transversal relativamente estrecha, muestran una clara separación entre los patrones de la circulación baja y de la atmósfera libre: los vientos más superficiales provienen del noreste, más arriba giran con dirección sureste y finalmente son vientos del este, escapando a las condiciones que impone la topografía y formando un ángulo de aproximadamente 90° con respecto al segmento sur del valle.

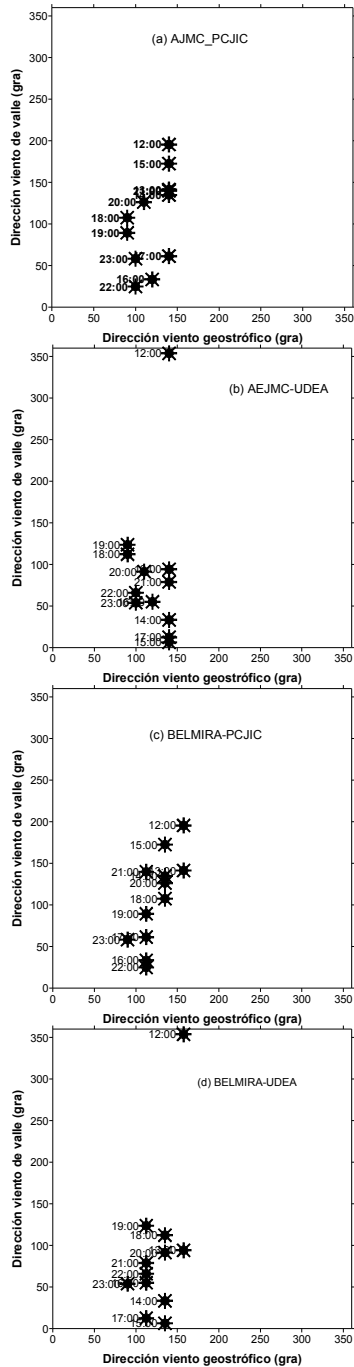


Figura 5. Figura 5. Comparación de la dirección del viento entre las estaciones externas al valle y las estaciones internas para las diferentes horas del día: (a) estaciones AJMC-PCJIC, (b) AJMC-UDEA, (c) BELMIRA-PCJIC, (d) BELMIRA-UDEA

Figure 5. Wind direction relationship between valley outer stations and inner stations at different hours: (a) AJMC-PCJIC, (b) AJMC-UDEA, (c) BELMIRA-PCJIC, (d) BELMIRA-UDEA

También temprano en la mañana, los globos de la estación PCJIC, ubicada en una sección transversal relativamente ancha, fueron impulsados en su ascenso por corrientes del sureste, pero igualmente se acoplaron con los vientos del este que gobernaban la circulación de mesoescala.

A las 11 de la mañana (16:00 horas UTC) los globos piloto todavía registraron vientos valle arriba alineados con el eje del valle en los primeros 200 metros por encima de la base, pero este efecto desapareció durante la tarde, pues los patrones de viento en ambas estaciones se alinearon con los de la atmósfera libre (viento del este).

A eso de las 5 pm (22:00 horas UTC), con el descenso de la radiación solar, los vientos en superficie mostraron una tendencia a orientarse nuevamente con el eje del valle, de modo similar a lo ocurrido en horas de la mañana. Otra vez se hizo evidente un proceso de separación entre los patrones de circulación al interior del valle y en la atmósfera libre: los vientos en superficie, y hasta a una altura de 1900 msnm, ascendieron por el valle; mientras el viento por encima del valle no modificó su patrón de circulación (este), el cual mantuvo durante la campaña de medición hasta caer la tarde.

5. DISCUSIÓN

A continuación se presenta una discusión acerca de los posibles mecanismos responsables de la circulación en el Valle de Aburrá.

Un primer mecanismo es el de canalización conducida por presión, el cual se desarrolló en el segmento norte (sector donde se encuentra ubicada la estación Metro). Desde las primeras horas de la mañana y hasta las últimas horas la tarde, los vientos de la atmósfera libre (soplando desde el este) penetraron al interior valle, disminuyeron la velocidad, viraron hacia la izquierda y se alinearon con el eje, en dirección del gradiente de presión ($\partial p/\partial x \approx 0.05$ kPa/km). Este comportamiento es coherente con lo propuesto por Fiedler (1983) [7] y presentado por Gross y Wippermann (1987) [19], Kossmann

M. y Sturman, (2003) [3] y Wippermann, F. (1984) [18].

Por otra parte, las zonas centro y sur del V.A. presentaron un comportamiento distinto al descrito anteriormente, dado que el patrón de circulación del viento entre laderas experimentó variaciones significativas en dirección y magnitud durante la jornada de medición. En las primeras horas, las estaciones en superficie registraron vientos noreste (valle arriba), alineados con la topografía y con velocidad promedio de alrededor de los 2 m/s; a su vez el viento en la atmósfera libre cruzó por encima del valle en dirección este, perpendicularmente al eje sur, con velocidades 3 veces mayores (del orden de 6.0 m/s); estas diferencias entre vientos exteriores y de valle prácticamente formaron una subcapa límite de unos 500m. Ya en el transcurso de la mañana, con el incremento de la temperatura, el espesor de esta capa fue descendiendo, lo cual permitió que el viento de la atmósfera libre penetrara en el valle (ver figura 7) dando origen a vientos en superficie acoplados con los de mesoscala. Este comportamiento es consistente con la descripción del mecanismo conocido como transporte descendente del momento horizontal, según lo expuesto por Whiteman y Doran (1993) [6].

Al caer la tarde, con el descenso de la temperatura, se restableció la circulación de los vientos superficiales a lo largo de valle y la subcapa de separación creció hasta alcanzar una altura aproximada de 700 m sobre la base.

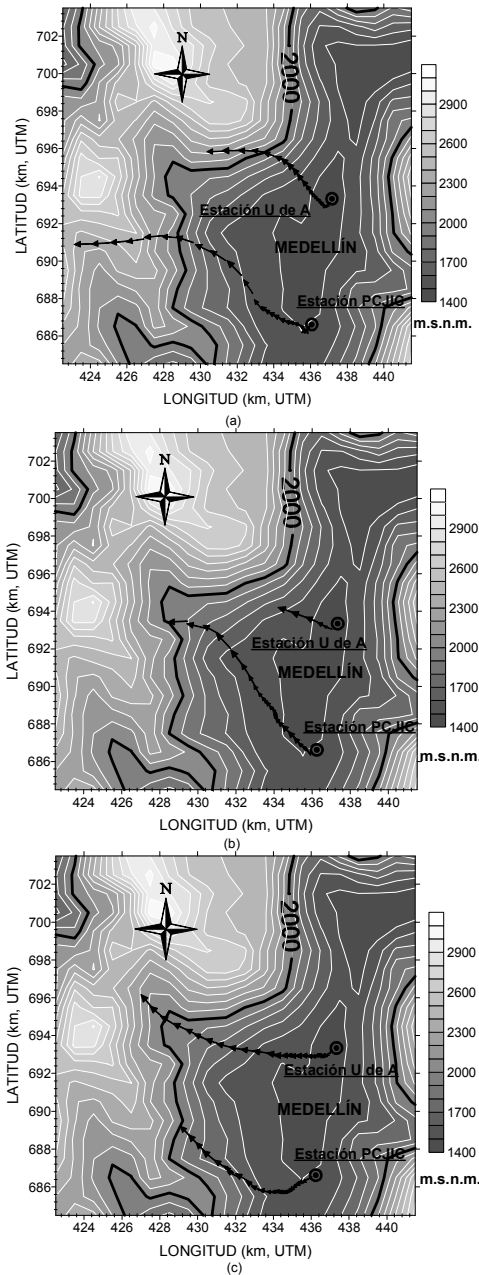


Figura 6. Trayectorias de los globos pilotos lanzados desde las estaciones U de A y PCJIC a diferentes horas del día: (a) 16:00 h UTC, (b) 18:00 h UTC, (c) 23:00 h UTC.

Figure 6. Pilot balloons paths observed from UdeA and PCJIC at different hours: (a) 16:00 h UTC, (b) 18:00 h UTC, (c) 23:00 h UTC.

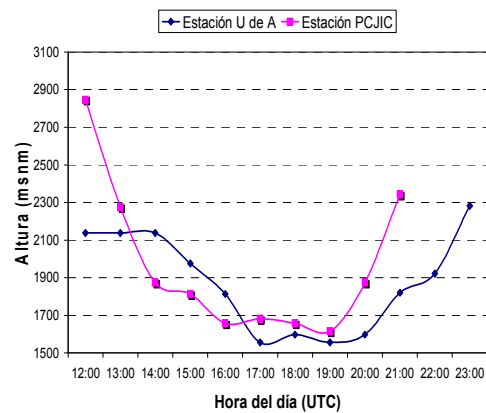


Figura 7. Altura de la capa de separación entre el viento en la atmósfera libre y el viento al interior del valle

Figure 7. Separation layer height between free-atmosphere winds and valley winds

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

A partir de la información obtenida durante la campaña de medición del 24 de febrero de 2007, se identificaron procesos de canalización inducida por presión y de transporte descendente de momento que pueden explicar la interacción entre la circulación del viento en la atmósfera libre y los patrones de circulación al interior del Valle de Aburrá.

De hecho se presentaron condiciones de viento fuerte en la atmósfera libre, persistentes en dirección, que favorecieron el transporte descendente de momento, el cual gobernó prácticamente la dinámica atmosférica al interior del Valle de Aburrá durante la jornada de medición.

Se constata que las condiciones predominantes de circulación diurna valle arriba no es regla que se pueda aplicar a todos los días del año en el Valle de Aburrá. Un ejemplo de esto lo da la campaña en cuestión, durante la cual ni siquiera hubo registro de lluvias dentro del valle. Concluimos que los flujos tipo valle arriba, conducidos por mecanismos térmicos o de canalización, quizás sean determinantes cuando prevalecen condiciones de neutralidad o estabilidad atmosférica o cuando el viento en la atmósfera libre es relativamente débil.

Estudiar los diferentes mecanismos responsables de la dinámica atmosférica en terrenos complejos es de particular importancia para el entendimiento de los transportes de calor, humedad, momento y contaminantes del aire. Los resultados presentados en este trabajo son una nueva aproximación al entendimiento de la dinámica atmosférica intra-andina y de su interacción con la atmósfera libre. A su vez, estos resultados son el punto de partida para el desarrollo de futuras investigaciones acerca de los procesos atmosféricos locales y de mesoscala en zonas tropicales, sobre terrenos complejos.

7. RECONOCIMIENTOS

Los autores desean expresar un especial reconocimiento al Grupo de Ingeniería y Gestión

Ambiental –GIGA- de la Universidad de Antioquia por su apoyo económico y administrativo; a la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia -CORANTIOQUIA-, especialmente a la Dra. Patricia E. Ossa Velásquez, por proveer y permitir el uso de los datos de la red de estaciones meteorológicas ubicadas en la jurisdicción de la Corporación; al Doctor Michael Douglas y al Ing. John Fredy Mejía, miembros del grupo PACS-SONET - Panamerican Climate Studies Sounding Network –NOAA, por compartir sus experiencias y poner a nuestra disposición los equipos de medición; al ingeniero Fredy Marulanda de la Aerocivil, por autorizar las campañas de medición con los globo sonda; y al grupo de cometeros Casa del Alto de la Nube por su acompañamiento logístico.

REFERENCIAS

- [1] BLUMEN, W. Mountain Meteorological. Atmospheric processes over complex terrain. Meteorological Monographs. Volume 23, Number 45, June 1990.
- [2] WHITEMAN, C.D. Mountain Meteorology, Fundamentals and Applications. Oxford University Press, 2000.
- [3] KOSSMANN, M. AND STURMAN, A. P. Pressure-Driven Channeling Effects in Bent Valleys. Journal of Applied Meteorology. Volume 42, Issue 1 (January 2003). pp. 151–158.
- [4] MCGOWAN, H. A., AND STURMAN, A. P. Interacting multi-scale wind systems within an alpine basin, Lake Tekapo, New Zealand, Meteor. Atmos. Phys., 58, 165-177, 1996.
- [5] KOSSMANN, M. AND STURMAN, A. P. Analysis of the wind field and heat budget in an alpine lake basin during summertime fair weather condition. Meteorology and Atmospheric Physics. Volume 81, Numbers 1-2. September, 2002.

- [6] WHITEMAN, C. D., AND DORAN, J. C. The relationship between overlying synoptic-scale flows and winds within a valley, *J. Appl. Meteor.*, 32, 1669-1682, 1993.
- [7] FIEDLER, F. EINIGE Charakteristika der Stroömung im Oberrheingraben (Some characteristics of the airflow in the upper Rhine Valley). *Wissenschaftliche Berichte des Meteorologischen Instituts der Universität Karlsruhe*, Vol. 4, 113–123. [Available from Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Universität Karlsruhe/Forschungszentrum Karlsruhe, Kaiserstrasse 12, D- 76128 Karlsruhe, Germany.], 1983.
- [8] WHITEMAN, C.D. Observation on Thermally Developed Wind Systems in Mountainous Terrain. Chapter 2 in *Atmospheric Processes Over Complex Terrain* (W. Blumen, Ed.) *Meteorological Monographs*, 23, No. 45. American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, 5-42, 1990.
- [9] KOSSMANN, M. AND FIEDLER, F. Diurnal momentum budget analysis of thermally induced slope winds. *Meteorology and Atmospheric Physics*. Volume 75, Numbers 3-4. December, 2000.
- [10] ADARVE, J. C. Y MOLINA, F. Evaluación preliminar de la circulación de vientos en el valle de Aburrá, *Revista AINSA* 4(1), 1984.
- [11] RÍOS, C. Procesos de Inversión Térmica en el Valle de Aburrá, Trabajo dirigido de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. 2001.
- [12] MEJÍA, O. Un Modelo Estacionario de Circulación Atmosférica Diurna en el Valle De Aburrá para época de verano, Tesis de Maestría, Universidad de Antioquia. 2002.
- [13] RENDÓN, A. Rompimiento de la inversión térmica en el Valle de Aburrá. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2007.
- [14] PÉREZ, J (2008). Caracterización preliminar de la circulación en la capa límite atmosférica. Caso de estudio: Valle de Aburrá. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2008.
- [15] POVEDA, G. La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala Inter.-décadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colom. Cienc.* 28 (107): 201-222, 2004. ISSN: 0370-3908.
- [16] POVEDA, G. Retroalimentación dinámica entre el fenómeno ENSO y la hidrología de Colombia. Tesis Ph. D., Universidad de Nacional de Colombia, Sede Medellín. 1998.
- [17] JACOBSON, M. Z. *Fundamentals of Atmospheric Modeling*, Cambridge Press University, 1999.
- [18] WIPPERMANN, F.: Air flow over and in broad valleys: Channelling and counter-current. *Contrib. Atmos. Phys.*, 57, 92–105. 1984.
- [19] GROSS, G. AND WIPPERMANN, F. Channeling and countercurrent in the upper Rhine Valley: Numerical simulations. *Journal of climate and applied meteorology*. Voleme 26, Nº. 10, October, 1997.