XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

µ-CAFFA3D.MB: SIMULACION NUMERICA MICRO-CLIMATICA

Gabriel Usera, Mariana Mendina y Rafael Terra

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Universidad de la República, Uruguay. Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo – Uruguay. E-mail: gusera@fing.edu.uy, mmendina@fing.edu.uy, rterra@fing.edu.uy

RESUMEN:

El microclima es un conjunto de afecciones atmosféricas que caracterizan un entorno o ámbito reducido, como por ejemplo un bosque, lago o valle. Pero también puede referirse a un área modificada por el hombre como una ciudad, un parque o un cultivo a cielo abierto o protegido. Frecuentemente el hombre interviene en un área de cultivo para lograr condiciones micro-climáticas más apropiadas, por ejemplo mediante la instalación de barreras corta-viento, tejidos de sombra o incluso extensos invernáculos.

En este trabajo presentamos un modelo numérico capaz de simular los procesos microclimáticos y su interacción con estructuras hechas por el hombre: flujo turbulento tridimensional de aire sobre topografía y en presencia de obstáculos, transferencia de calor por conducción, advección, convección y radiación, transferencia de masa en fase líquida y vapor de agua, evaporación y condensación, etc. En particular, enfocaremos la atención en escurrimientos nocturnos estratificados como los que predominan durante eventos de heladas agro-meteorológicas por radiación. Se estudian: el proceso de estratificación de la atmósfera durante noches despejadas y sin brisas, la simulación numérica de chorros pesados en ambientes estratificados y la aplicación de la extracción selectiva al drenaje de vientos de pendiente; mostrando la correcta representación de éstos fenómenos por el µ-caffa3d.MB, evidenciada por medidas de campo y ensayos de laboratorio.

ABSTRACT:

By microclimate we understand the atmospheric properties and processes that characterize an environment, as for example a forest, a lake or a valley. It can also refer to an area modified by man, like a city, a park or a greenhouse. In agriculture, for example, it is a common practice to modify microclimatic conditions to promote growth, introducing wind fences or greenhouses.

In this report, we present a numerical model capable of simulating the microclimatic processes and their interaction with man made structures: turbulent flow over topography and around obstacles, heat transfer by conduction, advection, convection and radiation, mass transfer of liquid water and vapor, evaporation, condensation, etc.

The main focus is on nocturnal stratified flows which prevail during radiative frost events. Selected cases include: (i) atmospheric stratification during clear sky nights, (ii) intrusion of heavy turbulent fountains in a stratified environment, and (iii) application of selective drainage to the control of nocturnal down-slope winds. Numerical results are evaluated against laboratory and field observations.

PALABRAS CLAVES:

Simulación Numérica. Micro-clima. Flujos estratificados.

INTRODUCCIÓN

La mecánica de los fluidos da sustento a numerosas aplicaciones de la ingeniería clásica y también a la meteorología dinámica que permite abordar los problemas tradicionales referidos a la evolución de la atmósfera en escala sinóptica o mesoescala. Los estudios microclimáticos se encuentran en la interfase de ambas disciplinas y comparten características de ambos campos de conocimiento. Su desarrollo, por tanto, plantea una oportunidad de sinergia entre ambas comunidades científicas. En particular, la micrometeorología trabaja en escalas espaciales intermedias entre las típicamente ingenieriles y las clásicas de interés meteorológico [Panovsky y Dutton 1983]. En meteorología, los estudios se limitan a entender y predecir el clima, mientras que en ingeniería el objetivo es siempre el diseño de un sistema; en micrometeorología se espera generalmente una intervención que modifique las condiciones naturales (corta vientos, sistemas anti-heladas, invernáculos, etc.). En meteorología se trabaja en espacios abiertos mientras que en micrometeorología es también relevante el estudio de espacios cerrados.

Estas características se traducen a la hora del desarrollo de una herramienta de modelación numérica. Salvo en limitadas aplicaciones en flujos confinados, el abordaje de modelación numérica directa es inviable aún en ingeniería por sus altísimos requisitos computacionales. La estrategia dominante es la de simulación mediante modelos de grandes vórtices o LES (Large Eddy Simulations) en que la parametrización de la turbulencia, aspecto crítico en cualquier modelo hidrodinámico, presenta características universales. Los modelos LES requieren resoluciones de grilla que, a su vez, lo hacen inviables para aplicaciones meteorológicas clásicas. Sin embargo, el gran avance en la capacidad computacional permite que su uso sea factible para aplicaciones microclimáticas que, por tanto, podrían abordarse con el mismo modelo que otras aplicaciones de escalas más reducidas. Para que esto último sea posible, el modelo debe ser modular y flexible e incorporar parametrizaciones de procesos físicos que son de crucial importancia en estudios microclimáticos. Debe tener también la capacidad de trabajar en geometrías complejas (capacidad inusual en los modelos meteorológicos) a la vez que incorporar los procesos de interacción con la atmósfera como ser la transferencia radiante, generalmente no incluidos en modelos hidrodinámicos para la ingeniería. La conjunción en un modelo de estas capacidades ha sido justamente el objetivo de este equipo de investigación.

La originalidad del modelo en desarrollo: µ-caffa3d.MB, así como su potencial de aplicación, radican en la conjunción de la experiencia de dos comunidades científicas habituadas a trabajar a distintas escalas (la ingenieril y la meteorológica mencionadas anteriormente) en un mismo modelo adecuado para la simulación numérica de flujos atmosféricos a escala humana. En este trabajo se muestran tres aplicaciones de interés que fueron simuladas con este modelo

- 1. El proceso de estratificación de la atmósfera durante noches despejadas y sin brisas.
- 2. La simulación numérica de chorros pesados en ambientes estratificados.
- 3. La aplicación de la extracción selectiva al drenaje de vientos de pendiente.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO µ-CAFFA3D.MB

El modelo m-caffa3d.MB ha sido desarrollado y validado recientemente en el IMFIA, en el marco de un proyecto financiado por el Fondo Clemente Estable 2007 y del Programa de Desarrollo Tecnológico 2006. Se ha tomado como base para este desarrollo el modelo caffa3d.MB [Usera et al 2008], el cual consiste un una implementación paralela del método de los volúmenes finitos para las ecuaciones de Navier-Stokes. Este modelo base permite trabajar con mallas curvilíneas estructuradas por bloques, lo que permite la resolución numérica de flujos en situaciones intrincadas dando gran versatilidad en el diseño del dominio de cálculo. Este sistema de malla sólo requiere atención especial en la interface entre bloques. Ejemplos de posibles interfases entre diferentes

bloques pertenecientes a un mismo dominio se resumen en la figura 1, extraida de Usera et al 2008.



Figura 1.- Ejemplos de uniones entre interfases de bloques en el caffa3d.MB. Figuras estraídas de Usera et al 2008.

El modelo base, caffa3d.MB, resuelve las ecuaciones integrales del movimiento para un flujo viscoso incompresible bajo la acción de campo gravitatorio (conservación de la masa y cantidad de movimiento), con la aproximación de Boussinesq para los efectos de flotación y la ecuación de conservación de un escalar pasivo genérico, lo que incluye en particular el caso de la temperatura.

Para la simulación de procesos microclimáticos se ha incorporado al modelo base diversos módulos que permiten representar los mecanismos fundamentales presentes:

- Un modelo de turbulencia de grandes vórtices (LES) basado en la parametrización de Smagorinsky [Xu Zhou et al 2005]
- Un módulo para la ecuación del calor que contempla difusión y advección y sirve de base para la consideración de términos de flotación en las ecuaciones de balance mecánico, mediante la aproximación de Boussinesq.
- Un módulo de transferencia de calor por radiación entre el piso, el aire y el espacio exterior [de Liou et al 1988].
- Un módulo de transporte, transferencia y conservación de la masa de agua en fase líquida y vapor para el modelado de procesos de aire húmedo
- Un módulo de rugosidad que permite representar el efecto de las caraterísticas de la cobertura del suelo (por ejemplo la vegetación) sobre el desarrollo de las capas límites turbulentas.

APLICACIONES DEL MODELO

1. El proceso de estratificación de la atmósfera durante noches despejadas y sin brisas.

El primer caso de aplicación seleccionado consiste en la representación de la estratificación de las capas bajas de la atmósfera, que se produce durante las noches despejadas y sin brisas, debido al enfriamiento del suelo por la pérdida de calor por radiación hacia el espacio exterior (características típicas durante noches de heladas por radiación).

Para la validación del modelo se selección un caso de estudio a partir de registros de noches de helada disponibles en una estación experimental ubicada en el aereopuerto de Santa Bernardina – Durazno. La misma cuenta con 6 termo-higrómetros ubicados en una estructura de 40 metros de altura y permite registrar evolución nocturna de los perfiles de temperatura y humedad.

El fenómeno que se quiere representar se caracteriza por una gran complejidad proveniente de los diversos mecanismos físicos que intervienen, no sólo en la propia atmósfera sino también en el suelo y que se reflejan en la complejidad del modelo. Por ejemplo, el balance térmico en el piso

depende de la conductivdad términa en el mismo, la transferencia convectiva y la ocurrencia de rocío. Para la representación de éstos fenómenos físicos se definen una serie de parámetros físicos (con interpretación) que permiten caracterizar a la atmósfera y al suelo en la situación a simular.

Se identificaron como parámetros especialmente sensibles para los resultados de las simulaciones numéricas los siguientes:

a) Las propiedades del piso, como la conductividad térmica y la capacidad calorífica, que controlan la rapidez de enfriamiento del mismo. Estos parámetros son fuertemente dependientes de las caracteristicas del suelo (pasto, tierra, roca) y del contenido de humedad del mismo

b) El contenido de humedad en las capas medias de la atmósfera (100-500m). Este parámetro incide fuertemente en la opacidad de la atmósfera y por tanto en la péridica de calor por radiación de las capas bajas.

c) El nivel de intensidad de agitación en la atmósfera. Aun en la ausencia de brisas definidas, existe un cierto nivel de agitación en las capas bajas de la atmósfera que indice fuertemente en la transferencia de calor entre las capas de aire. Tiene un efecto especialmente importante en los gradiente de temperatura observados.

Se comprobó que el modelo -caffa3d.MB, permite reproducir satisfactoriamente la evolución del perfil de temperaturas durante un evento de helada nocturna por radiación, para conjuntos razonables de los parámetros de configuración del modelo; sin considerar las perturbaciones de base que se observan en la noche seleccionada como caso de estudio. La figura 2 muestra el ajuste a los registros experimentales (linea negra punteada) correspondientes a 4 instantes de la noche (horas 3, 6, 9, 12 desde la puesta del sol), a partir de dos conjuntos de parámetros (lineas azules y líneas rojas).



Figura 2.- Evolución de los perfiles de temperatura en altura a las 3, 6, 9 y 12 horas de la puesta del sol. Lineas rojas y líneas azules: simulación numérica con distintos parámetros. Lineas punteadas: observaciones experimentales en la estación de Santa Bernardina.

A los efectos de tener una comparación global de los aspectos más sobresalientes de cada corrida realizada y compararlos con los de la noche seleccionada, se elaboró un gráfico que contiene

sintéticamente la información relativa al enfriamiento total alcanzado y la magnitud de los gradientes de temperatura desarrollados. Concretamente, en el eje x se grafica la caída de temperatura de un termógrafo ubicado a 1,7m del piso y en el eje y la diferencia de temperaturas entre ese termógrafo y otro ubicado a 6,9m del suelo. La evaluación se realiza para la hora 6 y la hora 12, resultados en un trazo representativo de cada corrida y de la noche seleccionada. En la figura 3 se presenta este gráfico, conteniendo la información de la noche seleccionada (rojo), la corrida de referencia (magenta, azul en la figura 2) y las demás corridas realizadas para analizar la influencia de los distintos parámetros (trazos azules).



Figura 3.- Comparación global de las distintas corridas (magenta – 900 – corrida de referencia) (azul – 9xx – corridas de variación) y la noche seleccionada (rojo).

Se incorporó el tratamiento del rocío, no a los efectos de modelar el balance de agua en el suelo que no es de interés sino para representar adecuadamente los intercambios energéticos y por ende poder reproducir la evolución de la temperatura en y cerca del suelo en noches de rocío pues su influencia es significativa. La figura 4 muestra el efecto de incorporar o no el rocío en una simulación, sobre los perfiles de temperatura. Los resultados con rocío corresponden a las líneas azules y los resultados sin rocío a las líneas rojas. Se observa que el enfriamiento se enlentece en presencia del rocío, especialmente sobre el final de la noche (al principio la temperatura no es suficientemente baja para la ocurrencia de rocío) y en las capas bajas cerca del suelo que es donde ocurre el proceso de condensación del rocío.



Figura 4.- Evolución de los perfiles de temperatura en altura a las 3, 6, 9 y 12 horas de la puesta del sol. Lineas rojas simulación sin rocío y líneas azules simulación con rocíó. Lineas punteadas: observaciones experimentales en la estación de Santa Bernardina.

2. La simulación numérica de chorros pesados en ambientes estratificados.

El chorro pesado (frío), de sección circular, que asciende en un ambiente estratificado ha sido muy poco estudiado en la bibliografía especializada. El efecto de la flotación negativa del chorro y la mezcla con estratos cada vez más ligeros conforme el chorro asciende produce dos efectos notables: a) Establece una altura máxima alcanzable por el chorro (esto también ocurre en el chorro pesado en ambiente neutro). b) Luego de alcanzar esta altura máxima el fluido, mezclado parcialmente con fluido de su entorno, desciende hasta encontrar un estrato de equilibrio (esta fenomenología es nueva y característica del ambiente estratificado). Este tipo de flujo ha recibido en la bibliografía la denominación de fuente turbulenta en ambiente estratificado ("Turbulent Fountains in a stratified fluid"). Justamente este es el título del trabajo emblemático de Bloomfield y Kerr (1997), del cual se ha adaptado el siguiente esquema, figura 5.



Figura 5.- Esquema de flujo para un chorro pesado que asciende en un ambiente estratificado.

En el esquema de simulación que se trabaja se prescribe un gradiente térmico (y por tanto de densidad) en el dominio, configurando así el ambiente donde se desarrollará el chorro.

Se presenta en la figura 6, la evolución del chorro para los instantes t=20, 60, 100, 200 y 400s desde el inicio. A los efectos de visualizar el contorno del chorro se ha introducido un trazador numérico pasivo (solo cambia su concentración por advección y dilución) y se muestran las iso-superficies de concentración 10% para dicho trazador. El chorro asciende vigorosamente al principio, alcanza luego su altura máxima alrededor de los 100 segundos, comenzando a formar a partir de allí un frente de penetración en el estrato de equilibrio que se visualiza claramente a los 200 y 400 segundos.



Figura 6.- Evolución del chorro para t=20s, 60s, 100s, 200s y 400s. Se muestran isosuperficies de concentración 10% del trazador pasivo.

En la figura 7 se presenta la evolución del flujo en los experimentos realizados por Bloomfield y Kerr en su trabajo (1997). Se observa que la evolución obtenida en la simulación numérica refleja correctamente la experiencia realizada por estos autores.

Los parámetros principales a reproducir cuantitativamente en este caso son la altura máxima alcanzada por el chorro y la altura del estrato de equilibrio por donde penetra el frente posteriormente. En la tabla 1 se presentan estos valores observados para la simulación numérica y los respectivos calculados de las predicciones a partir del trabajo de Bloomfield y Kerr 1997.



Figura 7.- Visualización en laboratorio de la evolución en el tiempo de un chorro pesado en ambiente estratificado. Extraído de Bloomfield y Kerr 1997.

Tabla 1.-Comparación de parámetros simulación vs experiencia de laboratorio Bloomfield y Kerr.

Parámetro	Observado simulación	Predicción Bloomfield y Kerr (1997)
Altura máxima (m)	35-40	35
Altura de penetración (m)	16-18	17

3. La aplicación de la extracción selectiva al drenaje de vientos de pendiente.

El tercer caso de aplicación consiste en drenaje de vientos de pendiente mediante el uso de extracción selectiva. Esta situación se corresponde con una metodología de protección de cultivos en valles contra el daño por heladas agrometeorológicas de radiación (SIS – Sumidero Invertido Selectivo, [Guarga et al 2000]).

En la figura 8 se muestra una simulación numérica con el modelo donde se puede ver en forma cualitativa el desarrollo del viento de pendiente a lo largo de la ladera y el efecto de protección del valle debido a la extracción selectiva que se realiza al pie de la ladera, la cual reduce fuertemente el caudal de aire frío aportado al valle. El modelo reproduce de forma esperada el fenómeno según lo que muestra la experiencia (Arias et al 2007).



Figura 8.- Efecto de la extracción selectiva, realizada al pie de la pendiente, sobre el aporte de aire frío al valle.

Este mismo fenómeno se estudió en forma tridimensional, agregando la incorporación de la topografía real en el predio de una finca de producción vitivinicola ubicada en Napa Conuntry, California. La figura 9 presenta un plano con la topografía de la finca y la zona reportada de mayor daño de los cultivos de la misma.



Figura 9.- Detalle de la finca, con curvas de nivel y señalización de la zona de daño por helada. (Isolíneas cada 1m).

El modelo numérico para el estudio de esta finca fue configurado a partir de los datos digitales de terreno disponibles, mediante la utilización de un algoritmo matlab (diseñado por el equipo de investigación) que permite el procesamiento de los mismos y su incorporación en la generación de mallas del dominio. El esquema de mallas utilizado se muestra en la figura 10.



Figura 10.- Representación de la topografía representada en los bloques.

El μ -caffa3d.MB fue utilizado en primera instancia para reproducir los patrones de escurrimiento de aire frío observados durante noches de helada en ese lugar e introduciendo luego la simulación de la acción de los SIS (aparatos utilizados para la extracción selectiva que expulsan el aire hacia aririba en forma de chorro pesado en ambiente estratificado, aplicaciones 1 y 2).

La figura 11 presenta resultados de la simulación numérica, correspondientes al final de la noche (12 horas de simulación). En ellos se aprecia la diferencia entre la temperatura del suelo y la temperatura del aire a 2m de altura, en una escala coloreada de 0 a 10 °C. En los resultados de la figura 11, se aprecia que la zona de menor temperatura de 2m de altura coincide aproximadamente con la zona de daño histórico de la figura 9, evidenciando un buen comportamiento de la simulación numérica.



Figura 11.- Mapa de diferencias de temperatura entre el piso y el aire a 2m, en grados centígrados, al final de la noche. La línea negra muestra los límites de la finca en estudio.

A continuación se introdujo en el modelo numérico la acción de dos SIS, ubicados de acuerdo con el plan de protección diseñado para esta finca. En la figura 12 se presentan resultados para esta simulación. En éstos se aprecia, mediante la visualización de un trazador pasivo, la evolución de los chorros y las nubes asociadas a los SIS, estas últimas son arrastrados corriente abajo por las propias corrientes de densidad. Así mismo se observa una reducción de las zonas más frías (y de mayor riesgo de daño) por acción de los SIS.

Este comportamiento es coherente con lo observado en la finca, donde la acción de los SIS ha generado una sustancial disminución del daño por helada.



Figura 12.- Mapa de diferencias de temperatura entre el piso y el aire a 2m, en grados centígrados, al final de la noche, bajo la acción de 2 SIS. La línea negra muestra los límites de la finca en estudio.

CONCLUSIONES

El µ-caffa3d.MB permite reproducir satisfactoriamente la evolución del perfil de temperaturas durante un evento de helada nocturna por radiación, para valores razonables de los parámetros de configuración del modelo. La sensibilidad del modelo a dichos parámetros también arroja resultados que son interpretables físicamente.

El chorro pesado en ambiente estratificado es simulado en forma satisfactoria. La altura máxima alcanzada por el chorro, así como la altura de penetración del frente se han contrastado con datos experimentales de la bibliografía especializada, encontrando un ajuste satisfactorio con los mismos. Es interesante observar que en la bibliografía sólo se registran estudios experimentales de este fenómeno, siendo el que aquí se presenta quizá el primer estudio numérico del mismo a nivel mundial. En la aplicación presentada se traslada la operación del modelo a casos en los que se considera el flujo sobre topografía real bajo la acción del enfriamiento nocturno radiativo.

El modelo reproduce de forma esperada según lo que muestra la experiencia el fenómeno de extracción selectiva presentado en la segunda aplicación, donde se aprecia el amortiguamiento de las temperaturas en el valle al evitar por medio de este sistema que el mismo sea inundado con aire frío.

Finalmente, se ha alcanzado la capacidad de simular eventos de helada sobre topografía compleja y el efecto de la acción de la estracción selectiva sobre éstos. La simulación numérica de un caso de estudio ha permitido corroborar una correcta predicción de las zonas de riesgo observadas en la finca real, así como de la acción mitigadora de los SIS.

El modelo µ-caffa3d.MB muestra entonces buenos resultados en aplicaciones asociadas a control climático de interés para producciones agropecuarias. Las aplicaciones potenciales del modelo se pueden multiplicar a medida que continúe la tendencia de tecnificación de la altamente competitiva

actividad agropecuaria de exportación. Otras aplicaciones microclimáticas de gran interés práctico, como por ejemplo la disipación de bancos de niebla o dispersión de contaminantes, están siendo abordadas actualmente por el equipo de investigación.

REFERENCIAS

Arias, M., M. Mendina, H. Arbiza (2007): "Two Experiences of Frost Damage Control in Vineyard with Selectively Extraction of Coldest Air : Alto Valle, Argentina and Napa Valley, California USA". Acta Horticulturae: VIII International Symposium of Temperate Zone Fruits in the Tropics and Subtropics. Florianópolis - Brasil

Bloomfield, L., J. and R. C. Kerr (1997): "Turbulent fountains in a stratified fluid". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 358, pp. 335-356.

Guarga R., P. Mastrángelo, G. Scaglione, E. Supino (2000): "Evaluation of the SIS : a New Frost Protection Method Applied in a Citrus Orchard". *Proceedings of the 9th. Congress of the International Society of Citriculture* Orlando – Florida.

Liou, K., Q. Fu, y T. Ackerman (1988): A simple formulation of the delta-four-stream approximation for radiative transfer parameterizations. J. Atmos. Sci., 45, 1940-1947.

Panofsky, H., y J. Dutton (1983): Atmospheric turbulence. Models and methods for engineering applications. Wiley Interscience, 397pp.

Usera G., A. Vernet, J.A. Ferré (2008): "A Parallel Block-Structured Finite Volume Method for Flows in Complex Geometry with Sliding Interfaces". *Flow Turbulence and Combustion Journal*, Vol. 8, pp. 471-495.

Xu Zhou , Kai H. Luo, John J.R. Williams (2005): "Large-eddy simulation of a turbulent forced plume". *Eur. J. Mech. B – Fluids*, Vol 20,pp. 233–254.