

Montaje experimental para el estudio de la mezcla generada por penachos turbulentos

An experimental setup for the research of turbulent plumes mixing

Pilar LÓPEZ, José L. CANO, José M. REDONDO,
Daniel CANO & Manuel TIJERA

Departamento de Astrofísica y Ciencias de la Atmósfera
Universidad Complutense de Madrid, Spain
maplopez@bio.ucm.es

Received: 30 June 2009

Accepted: 1 October 2009

RESUMEN

Se presenta un sencillo modelo de laboratorio para generar mezcla turbulenta entre dos fluidos miscibles que están en una situación inicial inestable en un campo gravitatorio. El proceso de mezcla se genera por medio de la evolución de un conjunto discreto de penachos turbulentos forzados. Se describe el modelo experimental, los instrumentos de laboratorio y la forma de proceder. También se describen algunas características de los instrumentos que pueden clasificarse en 3 grupos: utensilios para la generación de los flujos fluidos, instrumentos eléctricos y aparatos para el registro en video y la digitalización. Este modelo de laboratorio permite medir los perfiles de densidad y las alturas de las capas fluidas por medio de la técnica *shadowgraph* y la visualización directa de los flujos fluidos.

Palabras clave: Mezcla turbulenta; penachos turbulentos; montaje experimental; sondas de conductividad; técnica de “sombras”; tubo Ventura; digitalización.

ABSTRACT

A simple laboratory model of turbulent mixing between two miscible fluids under an initial situation of top heavy stratification in a gravitational field has been performed. The mixing processes are generated by the evolution of a discrete set of unstable forced turbulent plumes. We describe the experimental setup, the laboratory instruments and the way the mixing processes are. We also describe the characteristic and construction of the instruments that are classified in 3 groups: fluid flow instruments, electric instruments and video-digitalisation instruments. This laboratory model lets the corresponding turbulent mixing processes measuring the density profiles and the heights of the fluid layers by means of shadowgraph and direct flow visualization.

Key words: Turbulent mixing; turbulent plumes; experimental setup; conductivity probes; shadowgraph; venturimeter; digitalisation.

SUMMARY: 1. Introducción. 2. El modelo de laboratorio. 3. Descripción de los instrumentos. 4. Resumen y Conclusiones. 5. Agradecimientos. 6. Referencias

1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de los flujos de fluidos geofísicos son turbulentos. Desde la capa límite de la atmósfera terrestre (ABL) hasta las corrientes en chorro de la alta troposfera o las nubes del tipo cúmulo, casi todos los fenómenos atmosféricos poseen movimiento turbulento. Análogamente, las corrientes de agua bajo la superficie de los océanos son turbulentas. El flujo laminar es una excepción en la dinámica de los fluidos de la naturaleza.

Desde esta perspectiva podemos constatar la importancia de cualquier estudio teórico, experimental o numérico que sobre la mezcla turbulenta se realice. Más aún cuando la turbulencia, propiedad de los flujos y no de los fluidos, es un fenómeno de carácter impredecible que surge en los sistemas fluidos al ser sistemas dinámicos gobernados por ecuaciones de movimiento no lineales y con unas características distintivas como son la irregularidad, la difusividad que aumenta los ritmos de transferencia de momento, calor y masa, los valores altos del número de Reynolds, la presencia de vorticidad, la disipación y la continuidad del fenómeno.

Dentro de este enfoque y con el objetivo de analizar la mezcla generada por turbulencia, planteamos un trabajo de carácter eminentemente experimental y cuyos principales objetivos son la consecución en el laboratorio de una mezcla turbulenta generada bajo condiciones de estratificación inestable. En concreto, el procedimiento experimental permite la generación de un conjunto de penachos turbulentos, cuyo número puede ser controlado y cuya interacción y evolución da lugar a un proceso de mezcla hasta el nivel molecular.

Los experimentos utilizados para el estudio de los procesos de mezcla por turbulencia son numerosos y, a veces, complejos. Las investigaciones previas más directamente relacionadas con el tema del presente artículo analizan el intercambio turbulento bajo condiciones de estratificación estable (Yagüe & Redondo, 1990; Yagüe, 1992; Yagüe & Cano, 1994), construida mediante una interfase estable de densidad, e inestable, representada por interfases inestables de densidad que son experimentalmente forzadas (Redondo, 1987; Redondo, 1988; Redondo, 1990).

Respecto al análisis de la mezcla turbulenta bajo condiciones de inestabilidad en la estratificación de densidad, existen procedimientos experimentales distintos que pueden englobarse en dos grupos: experimentos en los que se constituye una interfase inestable de densidad (Linden & Redondo, 1991; Linden et al., 1994) y experimentos en los que no se crea una interfase inestable, pero sí se genera una inestabilidad de Rayleigh-Taylor (Linden & Redondo, 1991; Sharp, 1984). Teóricamente, una distribución inestable de densidad constituida por un sistema fluido de dos capas se corresponde con una inestabilidad de Rayleigh-Taylor pura del tipo escalón de densidad.

El modelo de laboratorio planteado permite estudiar la mezcla turbulenta generada de un modo diferente mediante la evolución de un conjunto de penachos tur-

bulentos. Estos flujos fluidos son fenómenos de convección por flotabilidad. Por tanto, el modelo de laboratorio presentado no es una aproximación experimental a una inestabilidad de Rayleigh-Taylor pura. De hecho, la evolución de los experimentos de mezcla turbulenta realizados no se produce a través del desarrollo de esta inestabilidad hidrodinámica.

Los penachos turbulentos son flujos producidos por las fuerzas de flotabilidad que surgen como consecuencia de la acción de la gravedad sobre las diferencias de densidad existentes en el seno del sistema fluido. Pero, además, son flujos inestables gravitacionalmente lo que significa que existe una distribución inestable de densidad, es decir, el fluido más ligero queda situado debajo del más denso de modo que cualquier pequeño desplazamiento respecto de la horizontal de las superficies de densidad tenderá a crecer y generará movimientos convectivos. Estos flujos están caracterizados porque las fuerzas de flotabilidad son las predominantes y son la fuente de energía del movimiento medio (Morton & Turner, 1956), siendo transportado el flujo de flotabilidad por estas estructuras individuales. La principal fuente de energía cinética y de flujo de momento son las fuerzas másicas gravitatorias derivadas de la existencia de inhomogeneidades en el campo de densidad del fluido.

El término *penacho* se usa para describir aquel flujo fluido que tiene lugar cuando hay un suministro continuo de flotabilidad en contraste, con el término *térmica* en el que el suministro es intermitente y súbito. Los penachos se producen cuando existe una fuente localizada que suministra flotabilidad de forma estacionaria y se constituye una región con flotabilidad que se extiende entre la fuente y un nivel elegido (Morton, 1959).

Los penachos pueden ser de simetría axial –generado por una fuente puntual-, o bidimensionales - producido por una fuente lineal-. Los penachos axilsimétricos son estructuras tridimensionales con simetría de revolución alrededor de su eje central y tienen una forma aproximadamente cónica cuyo vértice se sitúa en la fuente. Presentan un borde definido o límite entre el fluido turbulento del penacho y el medio fluido circundante. Además, su anchura se incrementa por medio de la adquisición (*entrainment*) del fluido ambiente a través del mencionado borde hacia el interior del penacho. Este fenómeno es realizado por los *eddies* o remolinos turbulentos de mayor tamaño y es seguido de otro de mezcla en el núcleo del penacho, que es realizado por los remolinos turbulentos de tamaño menor. En su interior el fluido ambiente es asimilado por la turbulencia de pequeña escala (López, 2004).

La importancia de este fenómeno convectivo, tanto en el ámbito geofísico como en el de las aplicaciones de la ingeniería, requiere el planteamiento de un nuevo modelo de laboratorio que permita analizar la evolución e interacción de un conjunto de penachos turbulentos. Por ello, en el presente artículo se realiza una descripción detallada del modelo de laboratorio, del montaje experimental y de los instrumentos empleados.

2. EL MODELO DE LABORATORIO

La distribución inestable de densidad está caracterizada por tener una tendencia inherente al desarrollo natural de un flujo fluido turbulento, luego de mezcla turbu-

lenta, por lo que no es necesaria la generación artificial de dicha turbulencia sino que ésta se produce de manera espontánea. Los penachos turbulentos constituyen un tipo de distribución inestable de densidad.

No obstante, sí es necesaria la utilización de un procedimiento experimental adecuado para la deposición de los diferentes fluidos para constituir un sistema fluido con una distribución inestable de densidad. En concreto, es preciso plantear un modelo experimental para generar un conjunto de penachos turbulentos axilsimétricos.

El presente apartado plantea dicho modelo de laboratorio, describiendo su fundamento, sus características y el procedimiento experimental que es necesario para que dicho modelo sea llevado a la práctica.

El modelo de laboratorio parte de una distribución inestable de densidad que se desarrolla mediante la formación de un conjunto de penachos turbulentos que evolucionan hasta alcanzar el contorno de la cubeta experimental, momento en el que se constituye una corriente de gravedad horizontal que recorre lateralmente el ancho de dicha cubeta. El final del proceso de mezcla turbulenta se caracteriza por la aparición de una capa mezclada, pero no homogénea, y por la formación de una interfase estable densidad que es recorrida por ondas internas (López, 2004).

La Fig. 1 presenta un esquema del modelo de laboratorio. A la izquierda se muestra el estado inicial del sistema fluido experimental, cuya consecución requiere un cierto procedimiento y la construcción de un conjunto de instrumentos. A la derecha se representa el estado final al que llega el sistema fluido después de la generación y evolución de un conjunto de penachos turbulentos y del posterior desarrollo del proceso de mezcla turbulenta.

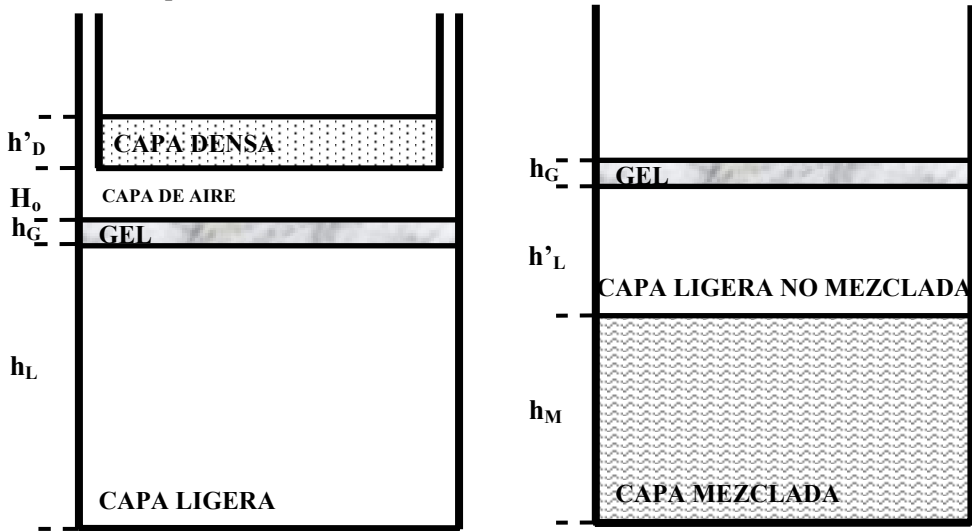


Figura 1. Esquema del modelo de laboratorio. La figura de la izquierda esquematiza el estado inicial del sistema fluido experimental. La figura de la derecha muestra el estado final del sistema fluido tras el proceso de mezcla turbulenta.

Los experimentos emplean dos tipos de fluidos. El primer tipo lo constituye dos disoluciones salinas de cloruro sódico (NaCl), es decir, fluidos de pequeñas tensiones interfaciales y muy miscibles por lo que se facilitará la mezcla a nivel molecular. El segundo tipo de fluido experimental es un gel de sodiocarboximetil celulosa que, aunque soluble en agua, no sufre ningún proceso de mezcla con las disoluciones salinas mencionadas.

La distribución inestable de densidad, que permitirá posteriormente generar los penachos turbulentos, se construye con los fluidos experimentales anteriores en el interior de una cubeta experimental de vidrio que es un cubo de 27 cm de lado. El proceso de mezcla turbulenta se desarrolla en el interior de esta cubeta a temperatura ambiente (entre 21 °C y 27 °C).

El procedimiento experimental a desarrollar para obtener el modelo de laboratorio descrito se compone de una serie de etapas que pasamos a describir. La primera etapa consiste en la colocación en el fondo de la cubeta experimental de una disolución de cloruro sódico que constituirá la capa fluida de menor densidad o capa ligera (una altura h_L de 12.7 cm, un volumen de 8700 cm³ y una densidad ρ_L adecuada).

La segunda etapa se caracteriza por el emplazamiento de un estrato de gel de sodiocarboximetil celulosa (o goma celulósica CMC) sobre la capa ligera. El estrato de gel tiene un espesor h_G aproximado de 2 cm y su densidad está en función de la de la capa ligera porque entre ambos fluidos se constituye una interfase estable que los separa. Para la obtención del estrato de gel CMC se ha diseñado una cesta de malla metálica de dimensiones ajustadas a las de la cubeta experimental que se utiliza mediante un sistema de motor y polea. La colocación del gel CMC entraña una notable dificultad por sus especiales características fluidas al tratarse de un fluido no newtoniano de gran viscosidad y comportamiento ligeramente tixotrópico, cuyo comportamiento reológico ha sido analizado dando los resultados de la Fig. 2 (López, 2004).

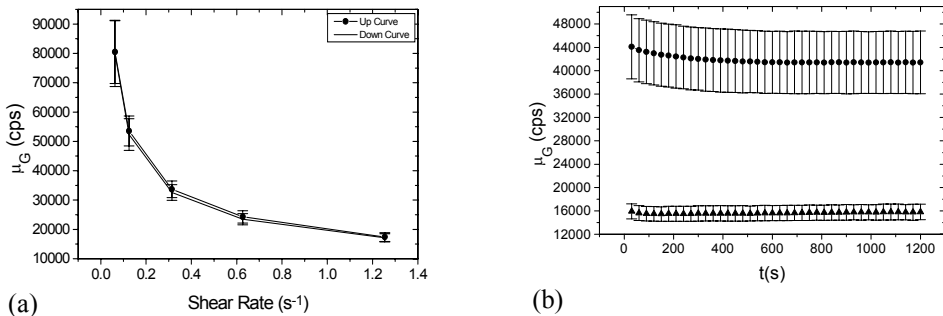


Figura 2. Comportamiento tixotrópico del gel CMC. (a) Evolución de la viscosidad del gel μ_G en función del gradiente de cizalla o “shear rate” para un gel de gran viscosidad. (b) Evolución temporal de la viscosidad del gel μ_G para un gel más viscoso (●) y otro menos viscoso (▲).

La colocación del gel implica la aparición de numerosos problemas como son el evitar la ruptura del estrato o controlar que su espesor sea lo más uniforme posible. La presencia de esta capa de gel CMC permite que el número y la distribución geométrica de los penachos turbulentos sea lo más aleatoria posible.

La tercera etapa consiste en la colocación de la capa densa (con una altura h'_D y un volumen de 500 cm^3) que es una disolución salina de cloruro sódico cuya densidad se modifica a voluntad para obtener los diferentes contrastes de densidad con el medio ambiente y está coloreada con 0.1 g de fluoresceína sódica. El fluido de esta capa densa será el que generará a los penachos turbulentos. Esta capa densa se sitúa en la parte superior de la cubeta experimental, a una altura H_O respecto del estrato de gel CMC, y su colocación se realiza por medio de un sistema de cajas móviles cuyos fondos están agujereados de modo alternante (figura 3).

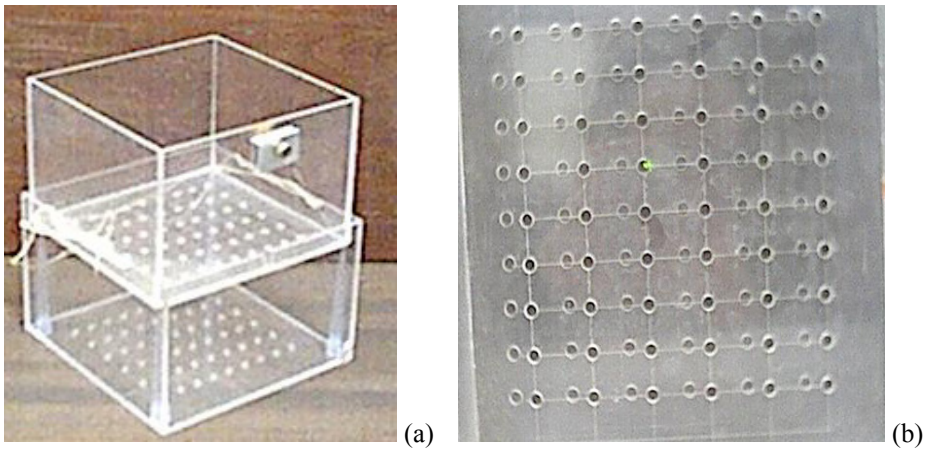


Figura 3. (a) Fotografía del sistema de cajas móviles, construidas en metacrilato, que se usa para la deposición de la capa densa. (b) Fotografía de los fondos de las 2 cajas agujereadas de metacrilato. Se observa la disposición alternante de los respectivos orificios (6 filas con 9 orificios cada una).

El espacio existente entre los fondos de las dos cajas de metacrilato se recubre con una lámina de plástico fino cuya misión es impedir que exista ningún tipo de escape de fluido de la capa densa antes de tiempo. Al iniciarse un experimento esta lámina de plástico es retirada súbitamente con la ayuda de un motor a cuyo eje está unida. La Fig. 4 muestra la presencia de este plástico mediante una lámina punteada en color gris que se interpone entre dichos fondos. La Fig. 4a muestra el sistema de cajas móviles en la posición cerrada, observándose que los orificios de los fondos de las dos cajas no se superponen al no coincidir sus posiciones. La Fig. 4b muestra el sistema de cajas móviles en la posición abierta lo que significa que los orificios de los fondos de las dos cajas se superponen y al coincidir sus posiciones se permite la circulación del fluido de la capa densa.

Según el procedimiento experimental, inicialmente, el sistema de cajas móviles se introduce en el interior de la cubeta experimental sin contener a la capa densa y en la denominada *posición cerrada*.

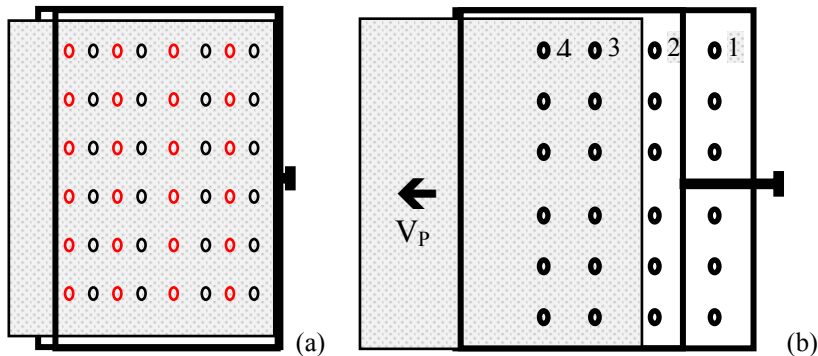


Figura 4. (a) Posición cerrada del sistema de cajas móviles porque los orificios de los fondos de las dos cajas no se superponen. El plástico, lámina punteada en color gris, se interpone entre dichos fondos e impide que exista flujo alguno de disolución densa. En color negro aparecen los orificios de la caja superior y en rojo los de la inferior. (b) Posición abierta del sistema de cajas: los orificios de los fondos de las dos cajas se superponen. V_p es la velocidad de retirada del plástico.

Posteriormente la disolución densa se deposita en el interior de las cajas y se dispone dicho sistema de cajas de metacrilato en la posición abierta, se retira la lámina de plástico interpuesta entre los fondos de las cajas a una velocidad V_p . Entonces la capa densa se deposita sobre el estrato de gel CMC.

La presencia de orificios en los fondos del sistema de cajas móviles provoca que la capa densa caiga en forma de chorros en el tramo comprendido entre dicho sistema de cajas y la interfase superior del estrato de gel CMC, siendo atravesado de modo localizado en las zonas de impacto.

Tras emerger del estrato de gel CMC, la capa densa entra en contacto con la capa ligera generando los penachos turbulentos cuyo crecimiento e interacción lateral van generando la mezcla entre la capa densa y la ligera (López, 2004).

El resultado final del proceso de mezcla se caracteriza por la formación de una interfase estable de densidad que separa una capa mezclada estratificada del resto de la capa ligera que no ha participado en el proceso de mezcla. Por ello, el proceso de mezcla es parcial siendo caracterizado por la magnitud global denominada eficiencia de mezcla.

La observación de los experimentos se ha realizado mediante su visualización directa por la técnica de fluorescencia inducida por luz (LIF) y también mediante la técnica de *shadowgraph*. Para facilitar el posterior análisis de los experimentos todos han sido grabados con una cámara de video, y, posteriormente, se han digitalizado.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS

En este apartado se describe brevemente el material de laboratorio utilizado en el procedimiento experimental para llevar a la práctica el modelo de laboratorio. Este material de laboratorio puede clasificarse en dos grupos: los utensilios utilizados para la obtención de la distribución inestable de densidad y, por otra parte, los aparatos usados para la detección y medida del proceso de mezcla (López, 2004).

Respecto al material empleado para la obtención de la distribución inestable de densidad está compuesto por los siguientes utensilios: dos cubetas experimentales de vidrio (27 cm de lado), una acondicionada para la visualización de los experimentos mediante *shadowgraph* y la otra mediante visualización directa; una cesta de malla metálica (25 cm de base y de 32 cm de alto) para colocar el gel CMC; un sistema de 2 cajas móviles de metacrilato que permite la deposición de la capa densa; un refractómetro *Shibuya Optical CO* (modelo 145 Estándar) para la medida de la salinidad de las disoluciones salinas empleadas; un agitador-dispersor de la marca *Miralles* mediante el cual se obtiene el gel CMC; un viscosímetro rotacional *Brookfield* (modelo DV-II) para el estudio reológico del gel CMC y, finalmente, un sistema de ejes, poleas y motor mediante el que se controla la altura y posición respecto de la cubeta experimental tanto de la cesta de malla metálica como del sistema de cajas móviles.

Respecto al material empleado para la detección y la medida del proceso de mezcla turbulenta se puede subdividir en dos grupos: los instrumentos para la detección visual del experimento y los aparatos para la detección eléctrica del proceso de mezcla.

La detección visual del experimento necesita utilizar fluoresceína sódica –actúa como marcador pasivo- para hacer visibles los flujos fluidos generados experimentalmente. Este compuesto se añade sólo a la capa densa y mediante la fluorescencia inducida por la luz que genera es posible la visualización directa de los fenómenos fluidos, que son filmados mediante una cámara de vídeo *Sony Handicap*. Finalmente, los videos analógicos grabados a los experimentos se digitalizan mediante el uso de dos digitalizadores: *DigImage* y *Adobe Première 5.0*.

La detección eléctrica y medida del proceso de mezcla requiere la utilización de cuatro sondas de conductividad por succión mediante las que se detectan las variaciones en la conductividad eléctrica de las disoluciones que constituyen el sistema fluido y que son consecuencia del proceso de mezcla (Redondo, 1987; Yagüe, 1992). Estas variaciones de la conductividad representan los cambios que sufre la concentración salina y se transforman en variaciones de densidad. Las sondas de conductividad se sitúan en el interior de la capa ligera a distintas alturas, que son fijas para todos los experimentos.

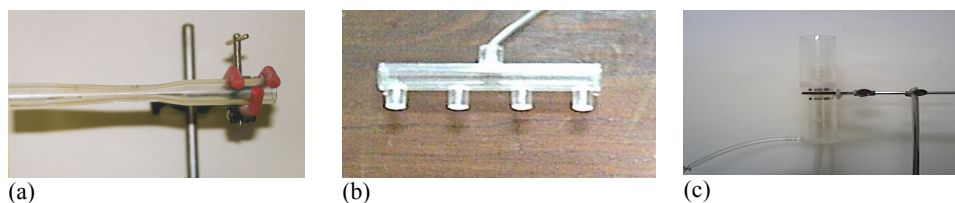


Figura 5. (a) El tubo venturi actúa como una pequeña bomba de succión que permite que los fluidos asciendan por el interior de las sondas de conductividad. (b) El conector múltiple permite que las cuatro sondas de conductividad se conecten simultáneamente a un mismo tubo venturi. (c) El vaso regulador del flujo controla el caudal de entrada en el venturímetro evitando las fluctuaciones del grifo de alimentación.

El funcionamiento adecuado de las sondas de conductividad requiere la utilización de una red de distribución para que la succión de dichas sondas sea posible. El motivo es que las sondas de conductividad necesitan realizar una succión continua del fluido con el que están en contacto y cuya variación de conductividad se desea detectar. La red de succión está compuesta por tres elementos: un tubo *venturi*, que actúa como una pequeña bomba de succión (Fig. 5a), un conector múltiple que permite la conexión simultánea de las cuatro sondas de conductividad al mismo venturímetro (Fig. 5b) y un vaso regulador del flujo, que posibilita que el caudal que entra en el venturímetro sea aproximadamente constante (Fig. 5c).

Los componentes de la red de distribución fluida para la succión de las sondas están conectados entre sí tal y como indica la Fig. 6.

Las cuatro sondas de conductividad están conectadas a un conductivímetro multicanal con cuatro canales, uno para cada sonda de conductividad (Redondo, 1987) que recibe y transforma adecuadamente la señal eléctrica. La señal modificada por el conductivímetro multicanal se introduce en un convertidor analógico-digital *Star-Logger* modelo 6004B, que transforma la señal analógica de salida del conductivímetro en datos digitales suministrando las medidas experimentales del potencial asociado al proceso de mezcla. Finalmente, los datos procedentes del convertidor analógico-digital se almacenan en un ordenador portátil para su posterior análisis con el además se controla al convertidor analógico-digital.

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El presente artículo muestra un modelo de laboratorio cuyo objetivo es la generación de un número variable de penachos turbulentos. El procedimiento experimental permite controlar dicho número y modificar las condiciones experimentales tales como el número de *Atwood* y la energía potencial inicial del sistema fluido. A partir de la secuenciación en fotogramas de los videos y de las medidas experimentales, se analiza la eficiencia de mezcla parcial, la altura de la capa mezclada y la evolución temporal de la dimensión fractal.

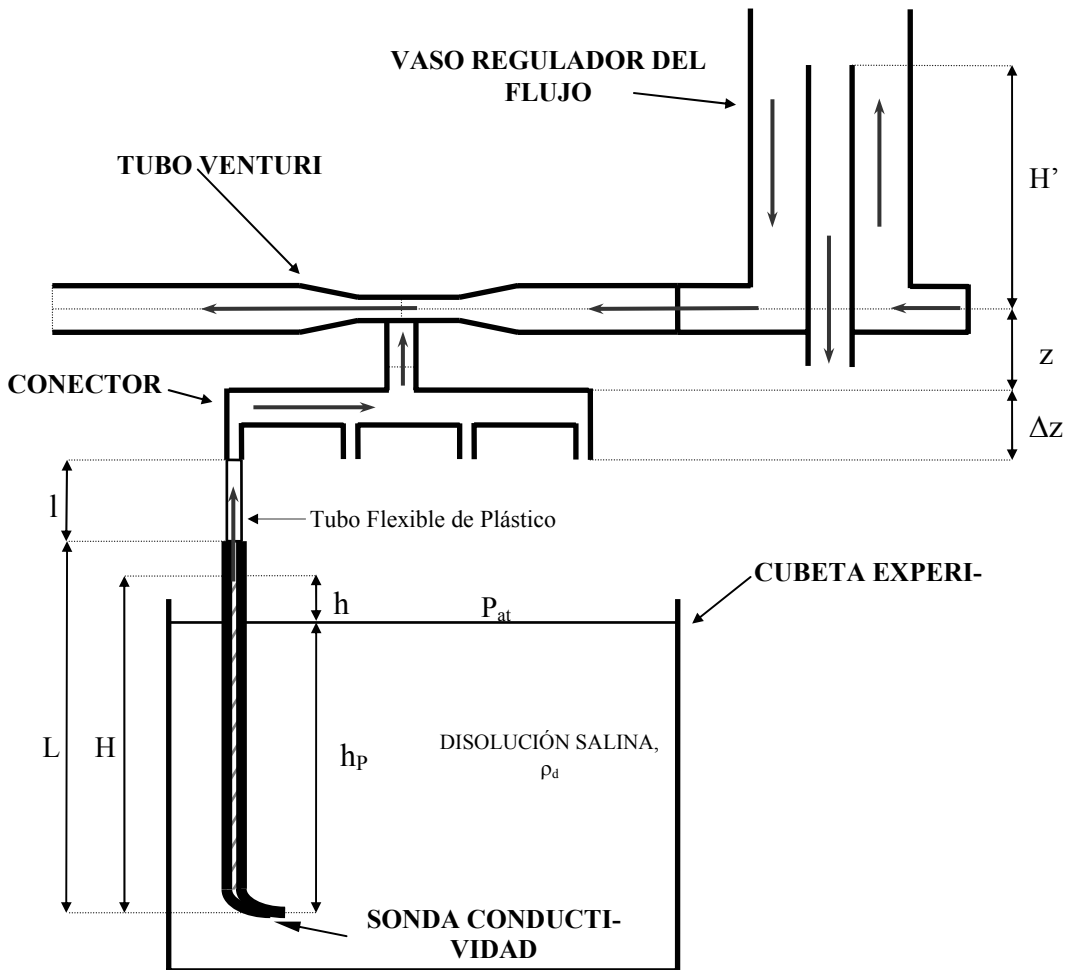


Figura 6. Esquema gráfico de la red de distribución para la succión de las sondas de conductividad.

5. AGRADECIMIENTOS

En memoria de la profesora Elvira Zurita por su excelente labor docente y su apoyo desinteresado y afectuoso a nuestras investigaciones al posibilitar la construcción de un laboratorio básico de fluidos geofísicos en el que llevar a la práctica el modelo experimental presentado en este artículo. Gracias, Elvira. Sin ti no hubiera sido posible.

6. REFERENCIAS

- LINDEN, P.F. & J.M. REDONDO (1991). Molecular mixing in Rayleigh-Taylor instability. Part I: Global mixing. *Phys. Fluids*, A3 (5), 1269-1277.
- LINDEN, P.F., J.M. REDONDO & D. L. YOUNGS (1994). Molecular mixing in Rayleigh-Taylor instability. *J. Fluid Mech.*, 265, 97-124.
- LÓPEZ, P. (2004). La mezcla turbulenta por convección gravitatoria: modelización experimental y aplicación a situaciones atmosféricas. *Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.*
- MORTON, B.R. (1959). Forced plumes. *J. Fluid Mech.*, 5, 151-163.
- MORTON, B.R. & J.S. TURNER (1956). Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. Roy. Soc. A*, 234, 1-23.
- REDONDO, J.M. (1987). Difusión turbulenta en fluidos estratificados. *Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona.*
- REDONDO, J.M. (1988). Difusión turbulenta por rejilla oscilante. *Revista de Geofísica*, 44, 163-174.
- REDONDO, J.M. (1990). The structure of density interfaces. *PhD. Thesis, University of Cambridge.*
- SHARP, D.H. (1984). An overview of Rayleigh-Taylor instability. *Physica*, 12D, 3.
- YAGÜE, C. (1992). Estudio de la mezcla turbulenta a través de experimentos de laboratorio y datos micrometeorológicos. *Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.*
- YAGÜE, C. & J.L. CANO (1994). The influence of stratification on heat and momentum turbulent transfer in Antarctica. *Boundary-Layer Meteorol.*, 69, 123-136.
- YAGÜE, C. & J.M. REDONDO (1990). Mezcla convectiva a través de una interfase de densidad. *Rev. de Geofísica*, 46, 145-158.