

Garzoli i Blackwell (1981) per túnels de plàstic, el qual en condicions d'absència de vent considera un coeficient convectiu de transmissió interior i exterior (h_{ic} , h_{oc}) de $7,2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, el que ens dóna un coeficient global de transmissió ($K=1/(1/h_{ic} + 1/h_{oc})$) de $3,6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Si considerem que el coeficient de forma de l'hivernacle estudiat (àrea plàstic/àrea sòl) és de 1,7, la transmissió de calor per unitat de superfície de sòl coberta i per unitat d'increment de temperatura interior-exterior serà de $6,1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Així doncs, pel cas aquí estudiat, tindrem un valor de w_{cb} en watts per metre quadrat de sol:

$$w_{cb} = 6,1 \cdot \Delta T \quad (\text{IV.15})$$

IV.7. Mesura dels fluxos de calor i dels increments de temperatura en els assaigs de camp

El flux de calor aportat a l'aire interior de l'hivernacle serà degut, principalment, a la convecció d'aquest sobre la superfície del sòl, la qual s'escalfa gràcies a la radiació solar rebuda. La quantitat de calor tramesa per convecció del sòl a l'aire interior de l'hivernacle la calcularem restant a la radiació neta absorbida les pèrdues de calor per conducció a través del sòl. Així mateix, calcularem i descomptarem les pèrdues per conducció-convecció a través de la coberta, no considerades en l'experiment de laboratori.

Degut a les oscil·lacions diàries de la radiació solar, serà impossible aconseguir condicions perfectes de règim permanent, que serien les desitjables pel plantejament que acabem de fer. Per tal d'aconseguir unes condicions d'intensitat de radiació el més estables possible, procurarem realitzar els experiments durant les hores del migdia i els fluxos de calor els calcularem promitjant les mesures obtingudes pels diferents sensors al llarg d'una hora

Per estimar les pèrdues de calor per conducció-convecció a través del material de coberta, seguirem l'anàlisi realitzat per Garzoli i Blackwell (1981), ja utilitzat a l'apartat IV.6 i que en condicions d'absència de vent ens permet, per al cas aquí estudiat, calcular el valor de w_{cb} en watts per metre quadrat de sòl utilitzant l'equació IV.15 de l'apartat IV.6

Per calcular el flux calor per conducció a través del sòl, al no disposar de l'equipament necessari per mesurar-lo directament hem hagut de realitzar una estimació a partir de la mesura de les temperatures a diferents fondàries. Per aconseguir-ho disposem de sèries de temperatures del sòl a 0, a 5 i a 10 cm de fondària al llarg de 3 o 4 hores. Tal com s'ha indicat a l'apartat III.2.1, el contingut d'humitat del sòl és extremadament baix, el que ens permet fer l'aproximació de considerar-lo un medi homogeni dins l'interval de fondàries considerat.

El mètode utilitzat es basa en realitzar la integració numèrica de l'equació unidimensional del transport de calor per conducció en el sòl a partir de la distribució inicial de temperatures i de l'evolució de la temperatura a la superfície al llarg del temps, pel que disposem d'un programa en "fortran" basat en el mètode de les diferències finites, escrit i adaptat per Pruna (1995).

En considerar les condicions inicials, hem suposat que la forma de distribució de temperatures en el terra en fondària segueix aproximadament una funció tipus funció d'error de Gauss. Aquesta suposició seria correcta si es tractés d'un medi semiinfinit en el qual la temperatura de la superfície fos constant en el temps i la temperatura en l'instant inicial fos la mateixa a qualsevol fondària (Gröber i cols. 1967). Aquestes no són les condicions que tenim a la realitat, ja que la temperatura de la superfície experimenta oscil·lacions diàries i estacionals i el terra no arriba a tenir mai una temperatura uniforme (Van Wijk i De Vries 1966). Així i tot, en tractar-se d'una aproximació que tan sols ens dona la distribució de temperatures a l'instant inicial i a partir d'aquí es consideren les variacions reals de la temperatura a la superfície del terra, no és d'esperar que això provoqui errors importants en la distribució de temperatures passades un mínim de dues hores.

Per al càlcul de la difusivitat del sòl en les condicions en que es realitzen els assaigs (sòl sec i de característiques homogènies) calcularem quin és el valor d'aquesta que fa que els resultats experimentals de les temperatures a diferents fondàries s'acostin més als resultats obtinguts amb la simulació. Una vegada obtinguda la difusivitat, calcularem la capacitat calorífica del sòl (per unitat de volum) a partir dels seus components, seguint el mètode proposat per De Vries (1966) i el producte de la difusivitat per la capacitat calorífica ens donarà la conductivitat tèrmica.

El càlcul del flux de calor per unitat de superfície (w_s) el realitzarem a partir del gradient tèrmic a la superfície del sòl $((dT/dz)_{z=0})$ obtingut de la simulació numèrica i de la conductivitat tèrmica (k) fent:

$$w_s = -k \cdot (dT / dz)_{z=0} \quad (\text{IV.16})$$

V. RESULTATS I DISCUSSIÓ

V.1. Atenuació de la llum en funció de la concentració de colorant

Per tal de conèixer la relació existent entre la intensitat de gris en un punt d'una secció i la concentració de colorant del líquid que ocupa el punt homòleg de la maqueta, s'ha plantejat un assaig destinat específicament a aquest fi (apartat IV.4.1). Si bé el coneixement de la relació esmentada no serà utilitzat directament per al càlcul dels increments relatius de densitat, ja que tal com s'ha explicat a l'apartat IV.4.2 el procediment utilitzat consistirà en establir a cada un dels experiments la relació existent entre l'increment de conductivitat elèctrica i els increments d'intensitat de gris; si que serà necessari per conèixer dins de quins límits podem establir una relació lineal entre els increments d'intensitat de gris i els increments relatius de densitat.

Els resultats obtinguts a l'assaig descrit a l'apartat IV.4.1. es mostren a la figura.V.1., on s'observen dos perfils longitudinals d'intensitats de gris: El primer, obtingut al llarg de l'eix horitzontal que travessa tot el panell d'il·luminació, en el qual només s'observen les oscil·lacions de les intensitats de gris provocades per la disposició vertical dels fluorescents (apartat III.1.2.). El segon, obtingut al llarg d'un eix paral·lel a l'anterior però a una alçada tal que travessi els recipients plens de solució de colorant de les concentracions que s'indiquen a l'eix d'abscisses, en aquest s'observen les disminucions d'intensitat de gris provocades pels recipients en els trams d'eix que els travessen.

Com que pretenem conèixer el nivell d'atenuació de llum provocat pel colorant present a cada un dels recipients, es realitza també un assaig en blanc, idèntic a l'anterior, però amb els recipients plens només d'aigua sense colorant, si calculem el valor promig de les intensitats de píxel en els trams que travessen els recipients i en els trams homòlegs de l'eix que no travessa el recipient, trobem que aquest darrer valor és superior a l'anterior en 6,9. Donat que les

intensitats de referència son molt similars en els dos assaigs i que la posició dels eixos és idèntica, suposarem que la mateixa diferència es mantindrà en l'assaig anterior.

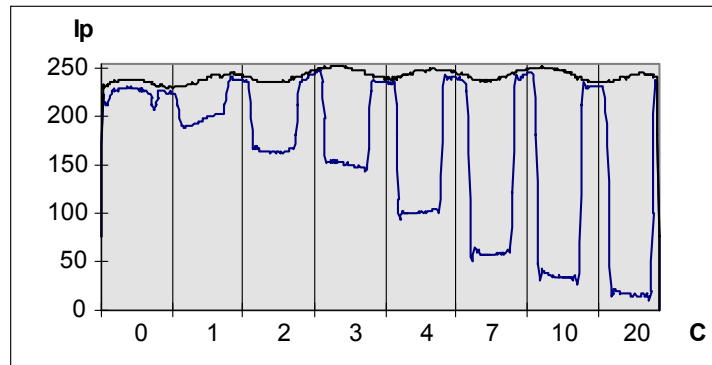


Fig. V.1: Intensitat de gris (I_p) al llarg d'un eix que travessa el panell d'il·luminació (línea superior) i al llarg d'un eix que travessa els recipients (línea inferior) plens de solucions de colorant amb concentracions de C p.p.m.

Per calcular l'atenuació de la intensitat de gris provocada pel colorant present a cada un dels recipients del primer assaig, dividirem el promig de les intensitats de gris al llarg del tram de l'eix que travessa el recipient (I_p), pel promig de les intensitats de gris al llarg del tram homòleg de l'eix que no travessa els recipients menys 6,9 (I_{p_0}). Els valors de I_p/I_{p_0} obtinguts amb cada concentració de colorant s'indiquen a la taula V.1.

| C (ppm) | L (m) | I_p/I_{p_0} |
|----------------|--------------|---------------------------------|
| 0 | 0,079 | 0,986 |
| 1 | 0,079 | 0,849 |
| 2 | 0,079 | 0,715 |
| 3 | 0,079 | 0,620 |
| 5 | 0,079 | 0,424 |
| 7 | 0,079 | 0,252 |
| 10 | 0,079 | 0,145 |
| 20 | 0,079 | 0,069 |

Taula V.1: Valors de I_p/I_{p_0} corresponents a les concentracions de colorant C amb gruixos de capa de fluid L

Ajustem els valors $L \cdot C$ i I_p/I_{p_0} a una funció exponencial del tipus: $(I_p / I_{p_0}) = (1-a) + a \cdot e^{-k \cdot L \cdot C}$ mitjançant regressió no lineal, on a i k són els paràmetres de regressió i on estem forçant que I_p/I_{p_0} sigui igual a 1 quan la concentració de colorant sigui 0. Els valors de a i k obtinguts són, respectivament 0,9455 i 2,723, sent els errors estàndard asimptòtics respectius 0,0080 i 0,148 i la desviació tipus residual 0,094. Així, podem relacionar les intensitats de gris amb les concentracions de colorant mitjançant la funció

$$\frac{I_p}{I_{p_0}} = 0,0545 + 0,9455 \cdot e^{-2,723 \cdot L \cdot C} \quad (\text{V.1})$$

El fet que la funció exponencial obtinguda no tingui l'asímtota a zero sinó a un valor lleugerament superior, pot ser degut a la petita quantitat de llum que, procedent del plafó de fluorescents, il·lumina l'habitació i és reflexada pel tanc; així com al propi procés de captura i digitalització de les imatges.

Podem calcular les concentracions de colorant a partir de I_p/I_{p_0} fent:

$$C = -\frac{\ln\left(\frac{(I_p / I_{p_0}) - 0,0545}{0,9455}\right)}{2,723 \cdot L} \quad (\text{V.2})$$

Experiències idèntiques però realitzades amb obertures de diafragma diferents a les utilitzades en els nostres experiments, ens donen igualment bons ajustos amb valors similars de la constant " a ", però pendents sensiblement diferents (els intervals de confiança asimptòtics del 95% no s'intersecten).

Si treballem amb valors de $L \cdot C$ prou petits, podem aproximar la relació exponencial obtinguda per una funció lineal. Així, si considerem valors de I_p/I_{p_0} superiors a 0,65 que corresponen a valors de $L \cdot C$ inferiors a 0,17, podem establir, per mínims quadrats, la següent relació lineal:

$$I_p = I_{p_0} - 2,178 \cdot L \cdot C \cdot I_{p_0} \quad (\text{V.3})$$

Sent l'error mig entre els valors de I_p/I_{p_0} predits per aquesta funció i per l'anterior de 0,0092, que considerem insignificant en front de la desviació estàndard de la regressió.

Amb els resultats anteriors podem indicar que si volem poder considerar, amb l'error mig abans indicat, que hi ha proporcionalitat entre els increments relatius d'intensitat de gris obtinguts als nostres experiments (definites aquests com $(I_{p_0} - I_p)/I_{p_0}$ que serà igual a $1 - (I_p/I_{p_0})$) i les concentracions de solució salina caldrà que les concentracions de colorant a l'interior de les maquetes utilitzades als nostres experiments ($L = 0,05$) no siguin superiors a 3,4 ppm ($I_p/I_{p_0} > 0,65$). Podem arribar fins a concentracions de colorant superiors, tenint present però que en aquestes condicions la proporcionalitat entre la concentració i els increments relatius d'intensitat de gris es perd, havent-se d'ajustar ambdós paràmetres mitjançant la funció exponencial descrita a l'equació V.1.

D'altra banda, si no volem haver de fer càlculs complexos píxel a píxel amb cada una de les figures, caldrà que els valors de I_{p_0} a l'interior de la maqueta siguin prou uniformes com per poder considerar $(I_{p_0} - I_p)/I_{p_0}$ proporcional a $I_{p_0} - I_p$ en tots els punts, de forma que puguem relacionar directament els increments relatius de densitat amb aquest darrer valor, el qual serà fàcil d'obtenir operant aritmèticament amb les imatges del background i foreground de cada experiment.

A l'apartat III.1.2., hem vist que les intensitats de gris a l'interior de la maqueta a les imatges del background, per una I_{p_0} mitjana de 226, tenien una desviació estàndard de 4,57, el que es tradueix en un coeficient de variació de 0,020, així doncs l'error relatiu provocat pel fet de no dividir a cada punt $I_{p_0} - I_p$ per la I_{p_0} del punt en qüestió i considerar $(I_{p_0} - I_p)/I_{p_0}$ proporcional a $I_{p_0} - I_p$ (on la constant de proporcionalitat serà el valor promig de I_{p_0}), serà de l'ordre del 2%.

V.2. Assaigs de laboratori amb models d'hivernacle-túnel

Es varen realitzar onze assaigs amb models a diferents escales d'un hivernacle-túnel amb una finestra lateral i una a la part superior, de les característiques que s'indiquen a la figura V.2; variant en els diferents experiments, a més de l'escala de longitud, els cabals (Q_{SS}) i els increments relatius de densitat $(\Delta\rho/\rho)_{SS}$ de la solució salina injectada. El resum d'aquests paràmetres en cada un dels experiments el trobem a la taula V.2.

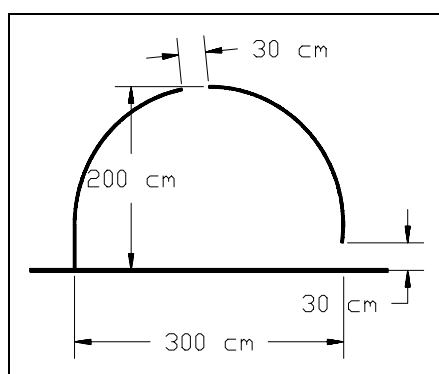


Fig. V.2: Secció transversal i dimensions a escala real de l'hivernacle túnel estudiat.

| Exper. | Esc. 1: | $(\Delta\rho/\rho)_{SS}$ | Q_{SS} (cm ³ /h) |
|--------|---------|--------------------------|-------------------------------|
| A-1 | 12 | 0,1262 | 3720 |
| A-2 | 12 | 0,1262 | 1740 |
| A-3 | 12 | 0,14 | 1850 |
| A-4 | 12 | 0,07 | 1850 |
| A-5 | 12 | 0,0108 | 1890 |
| A-6 | 20 | 0,127 | 720 |
| A-7 | 20 | 0,062 | 540 |
| A-8 | 20 | 0,01776 | 750 |
| A-9 | 32 | 0,17 | 700 |
| A-10 | 32 | 0,01662 | 630 |
| A-11 | 32 | 0,00803 | 460 |

Taula V.2: Escala de longitud (Esc.), increment relatiu de densitat $(\Delta\rho/\rho)_{SS}$ i cabal (Q_{SS}) de la solució salina per cada un dels assaigs realitzats (A-1 a A-11)

Pel que fa a les escales de longitud cal dir que, per una major claredat en l'exposició, hem partit d'unes dimensions de referència a escala real, però tal com hem vist a l'apartat IV.2, podem utilitzar les mateixes dades experimentals obtingudes per analitzar seccions a escala real de mides diferents a les indicades; sempre que es mantingui per totes les longituds d'una mateixa secció la mateixa relació d'escala.

V.2.1. Relació entre els increments de conductivitat elèctrica i d'intensitat de gris

Tal com hem indicat a l'apartat IV.4.2, el procediment escollit per conèixer la distribució dels increments de densitat a partir de les imatges capturades consisteix en trobar, al llarg de cada un dels experiments, la relació existent entre els increments d'intensitat de gris en un punt i els increments de conductivitat elèctrica en el mateix punt. La relació entre els increments de conductivitat elèctrica i els increments relatius de densitat ens ve donada per l'equació III.2.

Els resultats de la regressió lineal a cada un dels experiments entre els increments de la conductivitat elèctrica a 25°C (CE) enregistrats pel conductímetre i els increments d'intensitat de píxel (ΔIp) del punt de control es mostren a la taula V.3, així com els coeficients de determinació obtinguts a cada regressió. Les significacions són en tots els casos inferiors a 10^{-5} .

| Assaig | m | b | r ² | Assaig | m | b | r ² |
|--------|---------|-------|----------------|--------|---------|-------|----------------|
| A-1 | 0.01022 | 2.01 | 0,943 | A-7 | 0.01721 | -0.54 | 0,955 |
| A-2 | 0.01176 | -1.22 | 0,966 | A-8 | 0.04075 | -0.57 | 0,902 |
| A-3 | 0.00830 | 0.72 | 0,948 | A-9 | 0.01189 | 1.03 | 0,985 |
| A-4 | 0.02064 | -0.82 | 0,961 | A-10 | 0.04897 | 0.41 | 0,957 |
| A-5 | 0.10070 | -1.71 | 0,961 | A-11 | 0.04634 | 0.58 | 0,906 |
| A-6 | 0.01240 | -0.39 | 0,961 | | | | |

Taula V.3: pendent (m), ordenada a l'origen (b) i coeficient de determinació (r²) de la regressió lineal dels increments d'intensitat de píxel respecte els increments de CE a 25°C en $\mu\text{mhos}/\text{cm}^2$ per cada un dels assaigs (A-1 a A-11)

V.2.2. Distribució dels valors de θ a les seccions transversals

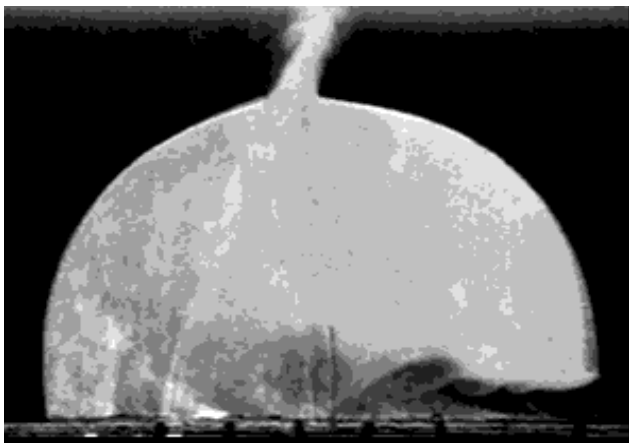
Per caracteritzar la distribució de temperatures que obtindríem en un hivernacle similar a escala real, ho farem calculant per cada punt de la secció del model el valor del paràmetre θ tal com ha estat definit a l'equació IV.9. Les temperatures a escala real seran, per un flux de buoyancy, temperatura exterior i longitud característica donats, directament proporcionals a l'increment de temperatura (equació IV.10). Concretament, si suposem un flux de calor aportat a l'aire interior de l'hivernacle de 377 W/m^2 , una temperatura exterior de 300 K i una amplada de l'hivernacle en condicions reals de 3 m , cada unitat del paràmetre adimensional θ correspon a un increment de temperatura d'un grau Kelvin.

A la figura V.3 s'observa la distribució dels valors de θ a les seccions transversals dels hivernacles una vegada s'ha assolit el règim permanent. Cada valor d'intensitat de gris es correspon amb el valor de θ indicat a la taula de colors que es mostra al final de la figura. S'ha treballat amb intervals discrets d'intensitats de gris per tal de facilitar l'observació de les característiques del flux en els diferents experiments.

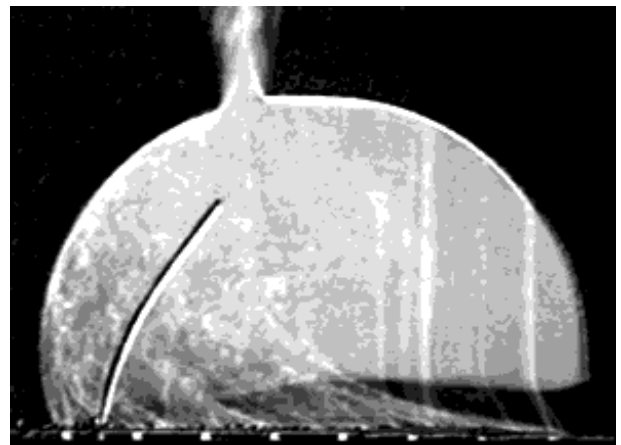
Les característiques del perfil vertical de valors de θ al centre de la secció de l'hivernacle en cada un dels assaigs es mostren a la figura V.4. Cal tenir present en l'observació dels esmentats perfils que aquests han estat obtinguts a partir d'una sola imatge captada durant l'experiment, el que pot explicar algunes de les diferències existents entre experiments realitzats en condicions molt similars, ja que fins i tot quan considerem que hem assolit condicions permanents, continuen existint fluctuacions en les característiques del flux degudes al seu caràcter turbulent.

A la figura V.3 observem també que el nivell d'heterogeneïtat dels valors de θ a la secció transversal de l'hivernacle varia de forma molt important d'uns experiments a uns altres, sent aquesta molt més gran en els darrers experiments que no pas en els primers. Així mateix, pel que fa als perfils verticals centrals (fig.V.4), podem observar que en els primers experiments existeix una diferenciació clara de la corrent de gravetat que penetra a l'hivernacle a través de la finestra inferior amb la resta, sense observar-se pràcticament cap gradient vertical de

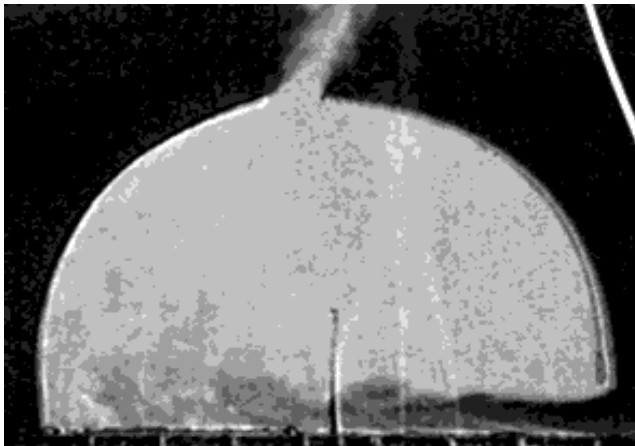
temperatures fora d'aquesta zona; en canvi, en els darrers experiments, la delimitació de la zona afectada per la corrent de gravetat no és gens clara i existeix un gradient important dels valors de θ al llarg de tot el perfil vertical. De l'explicació i la quantificació d'aquestes diferències en parlarem en els propers apartats.



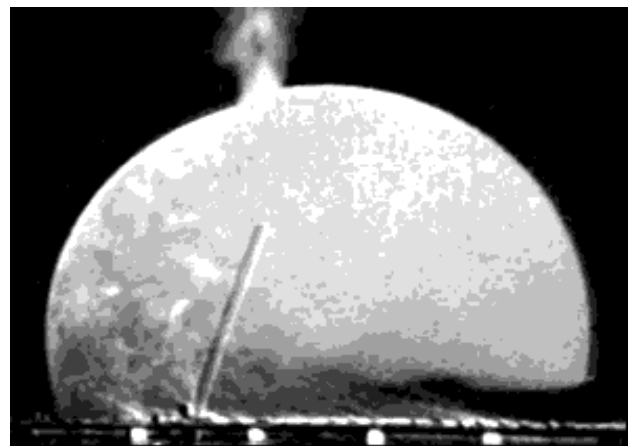
A-1 (Re=1289)



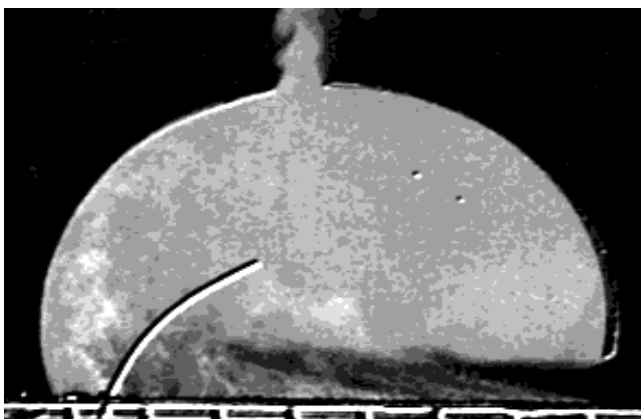
A-5 (Re=485)



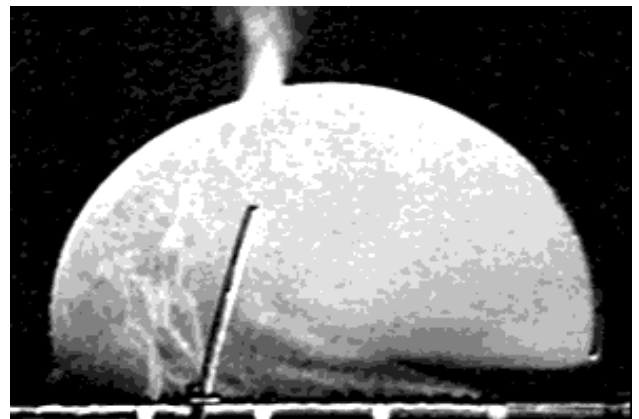
A-2 (Re=1015)



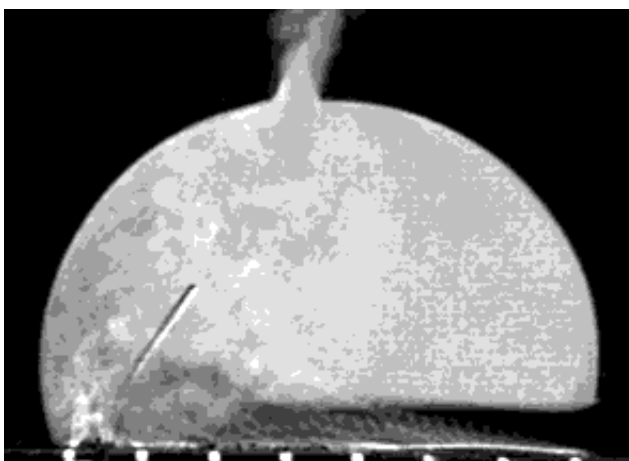
A-6 (Re=467)



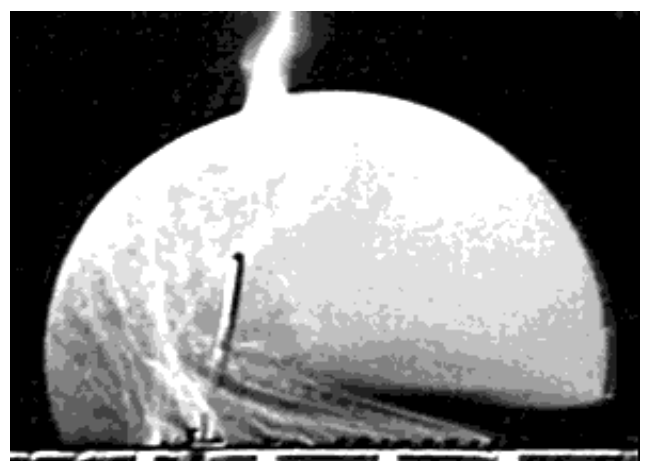
A-3 (Re=1034)



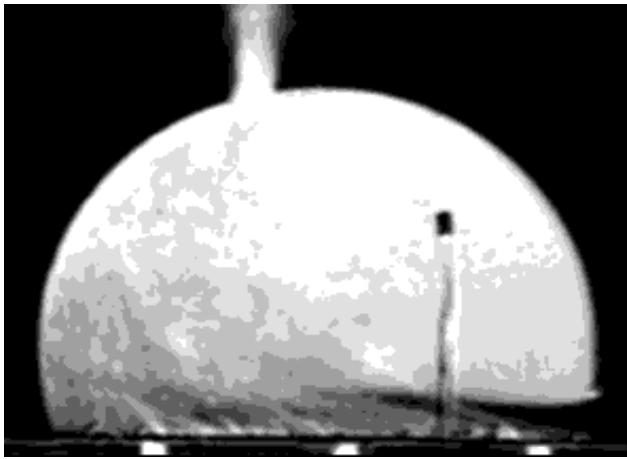
A-7 (Re=347)



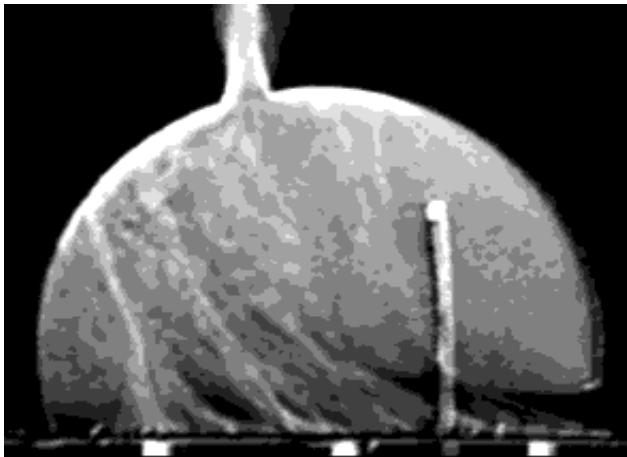
A-4 (Re=902)



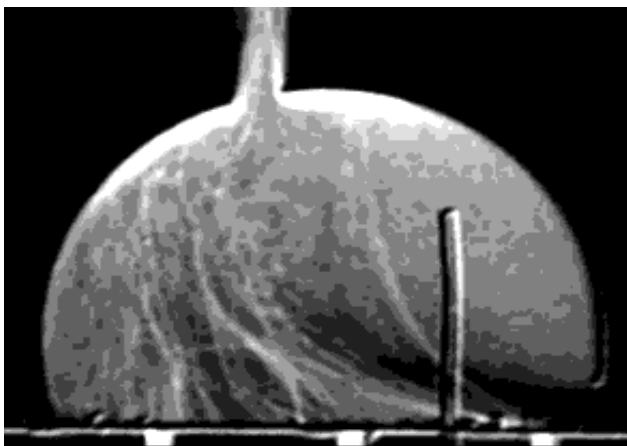
A-8 (Re=263)



A-9 (Re=328)



A-10 (Re=126)



A-11 (Re=87)

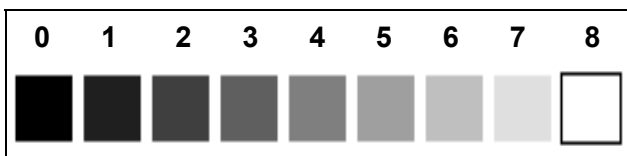


Fig V.3: Distribució dels valors de θ a la secció transversal dels onze experiments realitzats a números de Reynolds compresos entre 87 i 1289. Cada nivell de gris correspon al valor de θ mostrat a la taula.

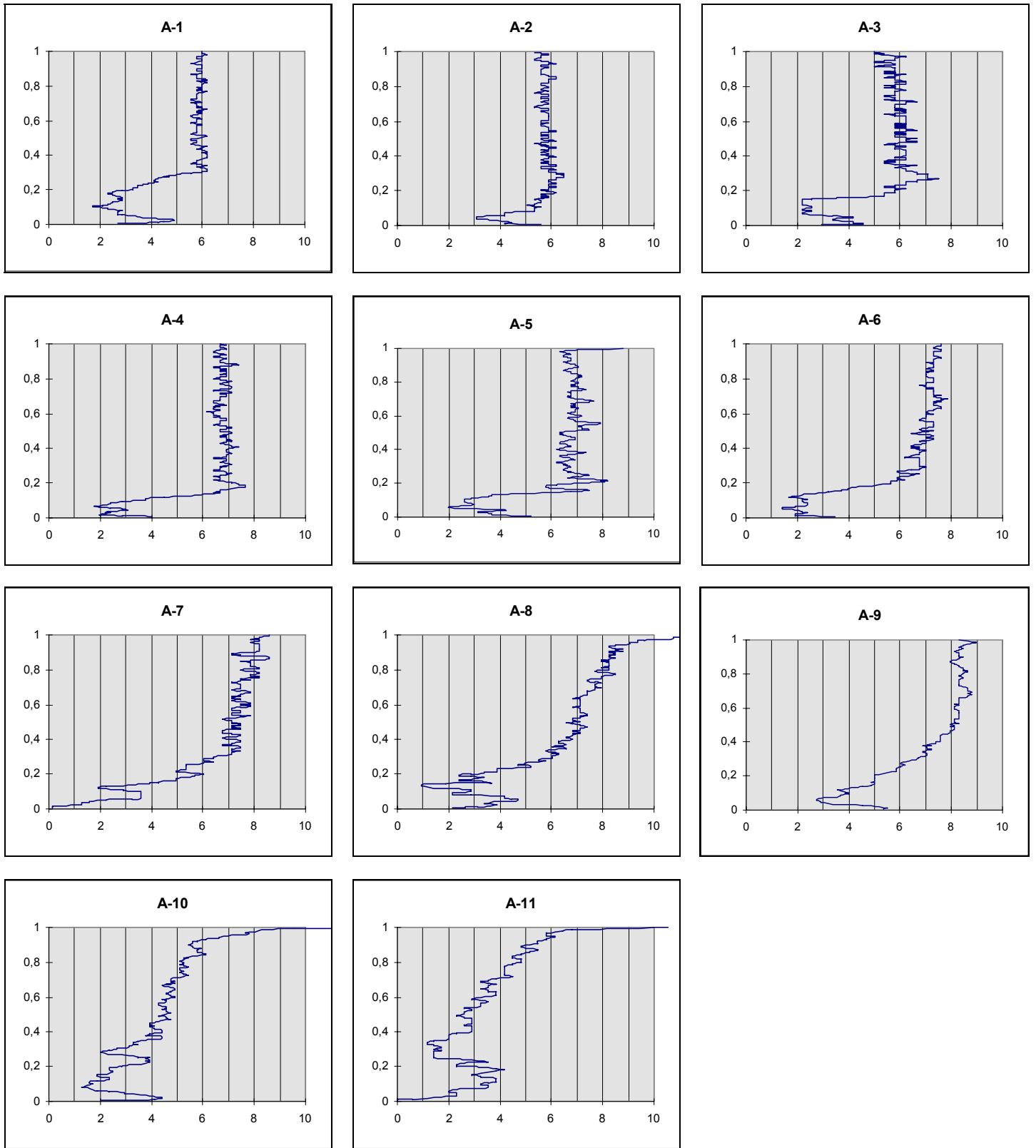


Fig. V.4: Perfils dels valors del paràmetre adimensional θ (eix d'abcises) al llarg d'un eix vertical central que va del sòl de l'hivernacle (altura 0) al punt més alt (altura 1) a cada un dels experiments (A-1 a A-11).

V.2.3. N° de Reynolds amb el que s'ha realitzat cada assaig

Per calcular el número de Reynolds amb el que es realitza cada experiment, proposem dos procediments alternatius, la diferència fonamental entre els quals consisteix en que amb el primer procediment no podem calcular el número de Reynolds fins que no disposem dels resultats experimentals, mentre que el segon ens permetrà fer una estimació a priori de l'esmentat paràmetre.

En tots dos casos prenem com a longitud característica l'obertura de la finestra de ventilació (x) i també en tots dos casos prenem com a velocitat característica la calculada a partir de l'aplicació de l'equació de Bernouilli entre els dos costats de l'obertura (equació II.15) (Bruce 1978). En el cas que ens ocupa, anomenant H a la diferència d'altura del centre de la finestra inferior a la superior i considerant que aquesta és molt superior a x , podem considerar $H \approx 2 \cdot |h_o - h|$ i escriure $V = (H \cdot g \cdot \Delta\rho/\rho)^{1/2}$. En tractar-se de finestres contínues, el producte de la velocitat característica per la longitud característica serà igual al cabal ideal per unitat de longitud a través de l'obertura (Timmons i Baughman 1981)

Amb el primer procediment el valor de $\Delta\rho/\rho$ que prenem per calcular la velocitat característica és el valor mig a l'interior de l'hivernacle, calculat a partir de les imatges obtingudes, seguint el procediment explicat a l'apartat IV.5.

Amb el segon procediment, calculem el valor teòric esperat de $\Delta\rho/\rho$ a partir del cabal i increment relatiu de densitat de la solució salina (Q_{SS} i $(\Delta\rho/\rho)_{SS}$) i de les característiques geomètriques de la maqueta. Per fer-ho establirem el balanç de volums i el balanç de masses del fluid que entra i surt de la maqueta de l'hivernacle en condicions de règim permanent, suposant aquest incompressible tenim:

$$Q_{SS} + Q_{in} = Q_{out} \quad (V.4)$$

$$Q_{SS} \cdot \rho_{SS} + Q_{in} \cdot \rho_T = Q_{out} \cdot \rho_M \quad (V.5)$$

sent Q_{in} , Q_{out} , i Q_{SS} els cabals d'entrada i sortida de la maqueta i de la solució salina respectivament. ρ_T , ρ_M i ρ_{SS} seran les densitats del fluid que ocupa inicialment el tanc, del

fluid que ocupa l'interior de la maqueta i de la solució salina respectivament. Així, si designem amb $(\Delta\rho/\rho)_{SS}$ i $(\Delta\rho/\rho)_M$ als increments relatius de densitat de la solució salina i del fluid que ocupa l'interior de la maqueta respecte el fluid del tanc, podem establir la relació:

$$Q_{out} = Q_{SS} \cdot \frac{(\Delta\rho/\rho)_{SS}}{(\Delta\rho/\rho)_M} \quad (V.6)$$

Si incorporem a les dues equacions de conservació de volum i massa anteriors, l'equació II.15 que ens permet calcular el flux volumètric a partir de la teoria de l'eix neutre; en el cas que ens ocupa (dues finestres contínues amb la mateixa obertura x situades a una distància vertical H molt superior a x) i suposant un coeficient de descàrrega 1, tindrem:

$$Q_{out} = (g \cdot (\Delta\rho/\rho)_M \cdot H)^{1/2} \cdot x \cdot L \quad (V.7)$$

Amb la incorporació d'aquesta tercera equació, podem calcular l'increment de densitat previst a l'interior de la maqueta fent:

$$(\Delta\rho/\rho)_M = \left(\frac{Q_{SS} \cdot (\Delta\rho/\rho)_{SS}}{(g \cdot H)^{1/2} \cdot x \cdot L} \right)^{2/3} \quad (V.8)$$

Fem notar que amb el plantejament realitzat estem suposant en tot moment un increment relatiu de densitat uniforme a l'interior de la maqueta, que coincideix amb l'increment relatiu de densitat del fluid sortint. Tot i que aquestes condicions no coincideixen exactament amb les que observem en els resultats dels experiments i que concretament, en els experiments realitzats amb valors de Re més baixos s'allunyen força de la realitat, observem que els increments relatius de densitat teòrics s'acosten molt als calculats mitjançant el procediment teòric explicat, sent per tant els números de Reynolds obtinguts pels dos procediments també molt similars (taula V.4).

Hem d'aclarir, pel que fa als quatre primers experiments, en els que ja hem vist que hi ha un nivell d'homogeneïtat interior molt alt, que els valors de $\Delta\rho/\rho$ (mitjana) expressats en la taula estan afectats per l'àrea ocupada per la corrent de gravetat que entra per la finestra inferior. Si aquesta àrea hagués estat ignorada en el càlcul de la mitjana (cosa que farem per al càlcul dels increments de temperatura interior-exterior i de les pèrdues a través de la coberta en els apartats V.3.1 i V.3.2), els valors promitjos de $(\Delta\rho/\rho)_{int}$ dels 4 primers experiments haurien estat 0,00194 , 0,00117 , 0,00125 i 0.00095 respectivament i els valors promitjos de θ_{int} 5,93 , 5,95 , 5,71 i 6,65

| Assaig | $\Delta\rho$ (mitjana) | $\Delta\rho/\rho$ (mitjana) | θ (mitjana) | $\Delta\rho/\rho$ (teòrica) | Re (1) | Re (2) |
|---------------|--|---|--|---|-------------------|-------------------|
| A-1 | 30,1 | 0,001757 | 5,37 | 0,001931 | 1289 | 1351 |
| A-2 | 19,66 | 0,001090 | 5,53 | 0,001163 | 1015 | 1049 |
| A-3 | 14,4 | 0,001132 | 5,19 | 0,001299 | 1034 | 1108 |
| A-4 | 26,23 | 0,000861 | 6,00 | 0,000818 | 902 | 879 |
| A-5 | 42,5 | 0,000249 | 5,73 | 0,000239 | 485 | 475 |
| A-6 | 22,65 | 0,001070 | 5,85 | 0,001081 | 467 | 470 |
| A-7 | 17,85 | 0,000590 | 6,05 | 0,000553 | 347 | 336 |
| A-8 | 24,5 | 0,000339 | 6,25 | 0,000299 | 263 | 247 |
| A-9 | 41,5 | 0,002157 | 6,33 | 0,002062 | 328 | 321 |
| A-10 | 28,8 | 0,000316 | 4,28 | 0,000408 | 126 | 143 |
| A-11 | 14,5 | 0,000152 | 4,09 | 0,000204 | 87 | 101 |

Taula V.4: n° de Reynolds amb el que s'ha realitzat cada assaig, calculats Re(1) a partir de la mitjana dels increments relatius de densitat obtinguts experimentalment a l'interior de la maqueta i Re(2) a partir de l'increment relatiu de densitat teòric

És interessant indicar que si considerem un hivernacle-túnel a escala real de les característiques indicades a la figura V.2 i considerem increments de temperatura entre l'interior i l'exterior de l'hivernacle de l'ordre de 5 a 10 K, podem calcular les velocitats a les finestres d'entrada i sortida utilitzant la teoria de l'eix neutre (Bot 1983) i a partir d'aquí calcular els números de Reynolds, obtenint-se valors de l'ordre de 10^4 , molt superiors als assolits en els nostres assaigs.

V.2.4. Distribució de freqüències dels valors de θ de cada secció

A l'observar la distribució de valors de θ a les seccions transversals dels experiments realitzats (fig. V.3), veiem que amb números de Reynolds més baixos, el nivell d'heterogeneïtat dels esmentats valors és molt més alt que amb números de Reynolds més alts, tal com indiquen també els histogrames de freqüències obtinguts en les seccions dels hivernacles dels assaigs A-1 i A-11, amb $Re=1289$ i $Re=87$ respectivament (fig V.5)

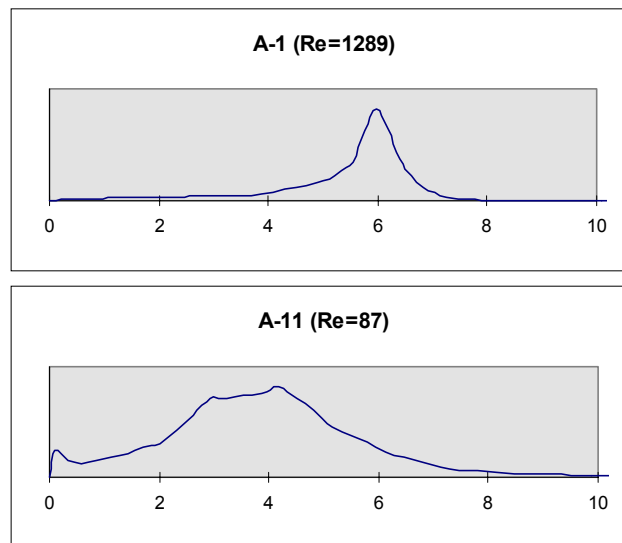


Fig V.5: Histograma dels valors de θ obtinguts a les seccions transversals de les maquetes dels experiments A-1 i A-11 amb números de Reynolds de 1289 i 87 respectivament

Per quantificar el nivell d'heterogeneïtat dels valors de θ a l'interior de les maquetes utilitzades als nostres experiments, hem calculat els coeficients de variació dels valors de θ (CV) (desviació estàndard dividit per la mitjana) corresponents als increments d'intensitat de gris de cada píxel de l'interior de les seccions transversals. Posteriorment, hem relacionat els coeficients de variació de θ (CV) amb els números de Reynolds de cada experiment. El resultat obtingut es mostra a la figura V.6, on podem observar una disminució progressiva de C.V. en augmentar Reynolds, fins arribar a un valor que podríem estimar al voltant de $Re = 900$, a partir del qual C.V. es manté més o menys constant. El valor obtingut no s'aparta massa del $Re = 1000$ recomanat per Simpson (1987) com aquell que cal mantenir per assegurar que

les característiques del flux en una corrent de gravetat siguin independents del número de Reynolds.

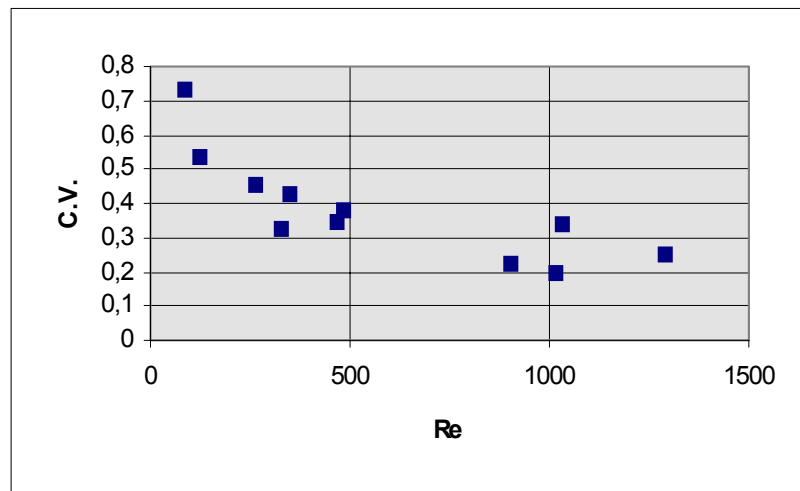


Fig. V.6: Relació entre els números de Reynolds de cada experiment i els Coeficients de Variació de θ (CV)

V.2.5. Característiques del flux als hivernacles-túnel: influència de Re

Tal com calia esperar, en tots els experiments l'obertura lateral es comporta com a finestra d'entrada i la zenital com a finestra de sortida. Així i tot, s'observen diferències importants pel que fa a les característiques del flux (fig V.3).

Als quatre primers experiments (A-1 a A-4), amb Re superiors a 900, observem una delimitació força clara de l'àrea ocupada per la corrent de gravetat que penetra a l'hivernacle a través de l'obertura lateral, produint-se una barreja important del fluid que entra amb el fluid interior i amb la solució salina injectada que es tradueix, fora de l'àrea abans esmentada, en una uniformitat important dels increments de densitat.

Als cinc experiments següents (A-5 a A-9), amb Re compresos entre 250 i 500, la delimitació de l'àrea ocupada per la corrent de gravetat és molt menys clara, existint una zona força important en la que hi ha un increment progressiu dels increments de densitat del fluid a mesura que ens allunyem de la corrent de gravetat, el que es tradueix en una major estratificació vertical de densitats.

Als dos experiments darrers (A-10 i A-11), amb Re inferiors a 150, observem que la barreja entre la solució salina injectada i el fluid que circula per l'interior de l'hivernacle és molt deficient. Intuint-se que una part important de la solució salina injectada surt a través de la finestra zenital sense pràcticament haver-se barrejat amb la resta de fluid.

A partir dels resultats mostrats a les figures V.3 i V.6 podem, per la geometria analitzada, situar el valor de Re a partir del qual les característiques del flux seran independents de la viscositat (Re crític) al voltant de 900, reproduint-se així sense desviacions apreciables les característiques del flux en un hivernacle de les característiques indicades a escala real, tot i no arribar a assolir els números de Reynolds que en aquelles condicions es produirien.

V.2.6. Formulació de la metodologia per la determinació "a priori" de les condicions experimentals necessàries.

A partir dels resultats obtinguts, observem que és necessari complir una sèrie de condicionants per tal d'aconseguir, d'una banda, obtenir una simulació realista de les característiques del flux i d'altra banda, que els resultats dels experiments ens surtin dins d'un rang de valors que faciliti al màxim la seva interpretació. Alguns d'aquests condicionants caldrà tenir-los present a l'hora de decidir algunes característiques dels experiments a realitzar, tals com l'escala de longituds (L_F/L_M), que a partir d'ara anomenarem " n ", el cabal i l'increment relatiu de densitat de la solució salina (Q_{SS} i $(\Delta\rho/\rho)_{SS}$) i la concentració de colorant de la solució salina (C_{SS}). Els condicionants més importants que caldrà tenir present per decidir aquests paràmetres seran:

- Que s'assoleixi un número de Reynolds prou gran. Establint-se un valor mínim que cal assolir que anomenarem " Re_c ".

- Que el cabal de la solució salina injectada en la maqueta (Q_{SS}) sigui prou petit en relació al cabal intercanviat a través de les finestres (Q_{out}) com per poder ser menyspreat. Establirem un valor màxim per la relació $a=Q_{SS}/Q_{out}$ que anomenarem " a_{max} ".

- Que l'atenuació de la llum provocada pel colorant del fluid que ocupa l'interior de la maqueta sigui prou petita per poder establir una relació lineal entre aquesta i la concentració de colorant (C). El que ens conduirà a establir un valor màxim de la concentració de colorant admissible a l'interior de la maqueta que anomenarem " C_{max} ".

Per garantir que s'assolirà el valor de Re_c , calcularem el valor de Re a partir de les característiques geomètriques de la maqueta que, tal com hem vist a l'apartat V.2.3, en el cas d'un hivernacle amb dues finestres contínues amb la mateixa obertura (x) i amb una separació entre ambdues (H) molt superior a x serà:

$$Re = \frac{[H_M \cdot g \cdot (\Delta\rho / \rho)_M]^{1/2} \cdot x_M}{\nu} \quad (V.9)$$

on el subíndex M indica que s'està fent referència a les mides de la maqueta, i no a les mides a escala real que s'indicaran amb el subíndex F .

Si considerem que el cabal de la solució salina serà el màxim admissible ($Q_{SS} = a \cdot Q_{out}$), aleshores $(\Delta\rho/\rho)_M$ serà, segons l'equació V.6, igual a $(a \cdot (\Delta\rho/\rho)_{SS})$, estant $(\Delta\rho/\rho)_{SS}$ limitat tan sols per la solubilitat de la sal en el fluid. D'altra banda, les dimensions lineals de la maqueta les podrem escriure en funció de les dimensions a escala real, dividint aquestes últimes per " n ". La expressió anterior es convertirà en:

$$Re = \frac{[H_F \cdot g \cdot a \cdot (\Delta\rho / \rho)_{SS}]^{1/2} \cdot x_F}{n^{3/2} \cdot \nu} \quad (V.10)$$

El que permet calcular la relació de longituds (L_F / L_M) màxima admissible (n_{max}) com:

$$n_{max} = \left[\frac{[H_F \cdot g \cdot a \cdot (\Delta\rho / \rho)_{SS}]^{1/2} \cdot x_F}{Re_c \cdot \nu} \right]^{2/3} \quad (V.11)$$

El cabal de la solució salina que injectarem el calcularem com:

$$Q_{SS} = a \cdot Q_{out} = a^{3/2} \cdot (H_M \cdot g \cdot (\Delta\rho / \rho)_{SS})^{1/2} \cdot x_M \cdot L_M \quad (V.12)$$

on L_M és l'amplada de la finestra del model, que coincidirà amb la fondària de la maqueta (en les experiències realitzades 0,05 m) i havent-se de complir que $a \leq a_{max}$.

Si en comptes del tipus d'hivernacle suposat, es tractés d'un hivernacle amb una sola finestra contínua vertical d'alçada H , calcularíem Re com:

$$Re = \frac{(1/3) \cdot [g \cdot (\Delta\rho / \rho)_M]^{1/2} \cdot H_M^{3/2}}{\nu} \quad (V.13)$$

i calcularíem la relació de longituds màxima admissible fent:

$$n_{max} = \left[\frac{[g \cdot a \cdot (\Delta\rho / \rho)_{SS}]^{1/2} \cdot H_F^{3/2}}{3 \cdot Re_c \cdot \nu} \right]^{2/3} \quad (V.14)$$

i el cabal de la solució salina com:

$$Q_{SS} = \frac{a^{3/2}}{3} \cdot (g \cdot (\Delta\rho / \rho)_{SS})^{1/2} \cdot H_M^{3/2} \cdot L_M \quad (V.15)$$

Pel que fa a la concentració de colorant a la solució salina (C_{SS}), si volem poder establir una relació lineal entre els increments d'intensitat de gris de les imatges i la concentració de colorant a l'interior de la maqueta, caldrà que quan s'assoleixi el règim permanent aquesta darrera no superi el valor C_{max} , el que implica que es compleixi la condició:

$$C_{SS} \leq \frac{C_{max}}{a} \quad (V.16)$$

V.3. Model teòric

V.3.1. Increments de temperatura: Correspondència dels resultats de laboratori amb el model teòric

Per tal de poder comparar els increments de temperatura obtinguts als assaigs de laboratori amb els obtinguts amb el model de càlcul, considerarem 3 valors diferents per al flux que escalfa l'aire interior de l'hivernacle ($w = 200, 350$ i 500 W/m^2) i calcularem els increments de temperatura obtinguts en ambdós casos per cada nivell de w . Considerarem tan sols els quatre primers experiments, en ser els únics realitzats amb un número de Reynolds prou alt per poder considerar el flux independent d'aquest valor.

Els increments de temperatura obtinguts s'indiquen a la taula V-5. En el cas dels resultats experimentals de laboratori, han estat calculats d'una banda a partir dels valors de θ promitjos a l'interior de tota la secció (θ (mitjana)) i d'altra banda, a partir dels valors de θ promitjos calculats ignorant l'àrea ocupada per la corrent de gravetat que entra a l'hivernacle (θ (int)). Aquest darrer valor serà el que utilitzarem per comparar amb els resultats del model teòric i dels assaigs de camp, així com per calcular la importància relativa de les pèrdues de calor a través del material de coberta, ja que serà el que indicarà de forma més aproximada l'increment de temperatura de l'aire que ocupa la major part del volum interior de l'hivernacle i de l'aire que surt a través de la finestra superior.

Observant els resultats mostrats a la taula V.5, observem que en els assaigs de laboratori obtenim valors que són, de promig, un 20% inferiors als obtinguts per aplicació del model teòric. Si el valor de θ considerat hagués estat el valor promig de tota la secció de l'hivernacle (inclosa l'àrea ocupada per la corrent de gravetat) (θ (mitjana)), el percentatge anterior seria del 25%.

| Assaig | θ | w (watts/m ²) | | | θ | w (watts/m ²) | | |
|---------------------|-------------|-----------------------------|------|------|-------------|-----------------------------|------|------|
| | mitjana | 200 | 350 | 500 | (in) | 200 | 350 | 500 |
| A-1 | 5,37 | 3.52 | 5.11 | 6.48 | 5,93 | 3,88 | 5,64 | 7,15 |
| A-2 | 5,53 | 3.62 | 5.26 | 6.67 | 5,95 | 3,90 | 5,66 | 7,18 |
| A-3 | 5,19 | 3.40 | 4.93 | 6.26 | 5,71 | 3,74 | 5,43 | 6,89 |
| A-4 | 6,00 | 3.93 | 5.71 | 7.24 | 6,65 | 4,36 | 6,32 | 8,02 |
| Model teòric | - | - | - | - | - | 4.88 | 7.09 | 9.00 |

Taula V.5: Comparació dels increments de temperatura obtinguts, per 3 fluxos de calor w diferents, entre l'interior i l'exterior de l'hivernacle mitjançant el mètode experimental de laboratori (A-1 a A-4) i mitjançant el model teòric. Les columnes 3, 4 i 5 indiquen els increments calculats promitjant tots els punts de la secció transversal i les columnes 7, 8 i 9 excloent del promig l'àrea ocupada per la corrent de gravetat que entra per la finestra inferior.

V.3.2. Importància relativa de les pèrdues de calor a través de la coberta

Tal com s'ha indicat a l'apartat IV.1 i IV.2, una de les limitacions del mètode experimental de laboratori proposat en aquest treball, consisteix en la impossibilitat de simular la transmissió de calor que es produeix a través de la coberta, la qual és tinguda en compte a efectes de balanç global, per tal de calcular el flux de calor aportat a l'aire interior de l'hivernacle, però s'ignoren les modificacions que aquestes pèrdues puguin introduir en el comportament del flux. És previsible que la importància d'aquesta simplificació sigui menyspreable en aquells casos en que les pèrdues de calor per renovació de l'aire interior siguin molt superiors a les pèrdues a través del material de coberta

Per realitzar una estimació de la importància relativa d'aquest tipus de pèrdues, hem calculat, per als valors de ΔT indicats a la taula V.5, el flux de calor per metre quadrat de sòl perdut a través del material de coberta (w_{cb}) a partir de l'anàlisi realitzat per Garzoli (1981), tal com s'ha indicat a l'apartat IV.6, obtenint-se els resultats que es mostren a la taula V.6, expressats com a fracció w_{cb}/w per als quatre casos estudiats en l'apartat anterior.

Observem que en un hivernacle de les característiques de l'aquí estudiat, amb valors de w superiors a 200 W/m², la relació w_{cb}/w és prou petita com per que no siguin d'esperar modificacions importants de les característiques del flux degudes a w_{cb} . En la mesura en que

disminuís el grau d'obertura de les finestres de l'hivernacle o la distància vertical entre ambdues, la importància relativa de w_{cb} aniria augmentant.

| w_{cb}/w | w (W/m ²) | | |
|---------------------|-------------------------|-------|-------|
| | 200 | 350 | 500 |
| A-1 | 0,118 | 0,098 | 0,087 |
| A-2 | 0,119 | 0,099 | 0,088 |
| A-3 | 0,114 | 0,095 | 0,084 |
| A-4 | 0,133 | 0,110 | 0,098 |
| Model teòric | 0,149 | 0,124 | 0,110 |

Taula V.6: Relació entre el flux de calor a través del material de coberta (w_{cb}) i el flux de calor que escalfa l'aire interior de l'hivernacle (w), calculada a partir dels increments de temperatura obtinguts experimentalment (A-1 a A-4) i amb el model teòric.

V.4. Assaigs de camp

V.4.1. Fluxos de calor i increments de temperatura

Les temperatures a l'interior del túnel i a l'exterior d'aquest (interior de l'hivernacle gran) en cada un dels assaigs, calculades fent el promig de les temperatures enregistrades per cada sensor al llarg d'una hora i promitjant alhora els resultats dels diferents sensors instal·lats a l'interior i exterior de l'hivernacle, s'indiquen a la taula V.7. Els increments de temperatura obtinguts s'hauran de comparar amb els obtinguts a partir de l'estimació del flux de calor que escalfa l'aire interior, calculant els que correspondrien teòricament als fluxos esmentats i per aplicació dels resultats dels assaigs de laboratori.

En relació als errors estàndard, hem de dir que en tractar-se d'un hivernacle-túnel instal·lat a l'interior d'un hivernacle molt més gran, les lectures, tant a l'interior del primer com a l'exterior d'aquest i interior del gran, són quasi bé sempre superiors a 40°C, mentre que, en canvi, els increments de temperatura són petits. Això fa que els errors estàndard dels increments de temperatura obtinguts dels diferents sensors siguin relativament grans en relació als esmentats increments, el que dificulta la utilització del mètode de camp proposat com a sistema de

"calibració" del mètode de laboratori, però sí que permet observar si hi ha grans desviacions entre els increments de temperatura obtinguts per ambdós mètodes.

| | Assaig | | | | | |
|------------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | C-1 | | C-2 | | C-3 | |
| T_{ext} | 42,05 | | 40,65 | | 35,82 | |
| T_{int} | 46,27 | | 44,97 | | 40,28 | |
| ΔT | 4,22 | (0,55) | 4,32 | (0,52) | 4,46 | (0,59) |

Taula V.7: *Temperatures interiors i exteriors (T_{int} i T_{ext}) i increments de temperatura (entre parèntesi els errors estàndard) en els tres assaigs de camp realitzats (C-1, C-2 i C-3).*

Per calcular el flux de calor que escalfa l'aire interior restarem, a la radiació neta per unitat de superfície mesurada a l'interior del túnel, els fluxos de calor per unitat de superfície de sòl corresponents a les pèrdues a través del material de coberta i a les pèrdues per conducció a través del sòl.

Per conèixer aquest darrer valor, hem calculat la difusivitat tèrmica del sòl (α) pel procediment explicat a l'apartat IV.7 sent aquesta de $2,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. La correspondència entre les temperatures a cinc i deu centímetres de fondària obtingudes experimentalment i les calculades pel procediment numèric utilitzat (prenent el valor de α indicat) la podem observar a la figura V.6 on podem observar, també, la derivada de la temperatura del sòl respecte de z per $z=0$, és a dir, el gradient tèrmic a la superfície.

La capacitat calorífica (per unitat de volum) del sòl, calculada a partir dels seus components (De Vries 1966) és de $1,125 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, obtenint-se una conductivitat tèrmica $k=0,28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

El promig, per cada un dels experiments, dels valors de radiació neta mesurada a l'interior del túnel (Rn) i del gradient tèrmic a la superfície del sòl ($(dT/dz)_{z=0}$), el trobem a la taula V.8. El període de temps considerat ha estat el mateix que per la mesura del promig de temperatures a l'interior i a l'exterior. A la mateixa taula s'indiquen les pèrdues de calor per unitat de superfície de sòl a través del material de coberta (w_{cb}) i a través del sòl (w_s), així com el flux de calor que escalfa l'aire interior (w)

| | Assaig | | |
|--|--------|--------|--------|
| | C-1 | C-2 | C-3 |
| $(dT/dz)_{z=0}$ (K·m ⁻¹) | -364,5 | -331,0 | -382,7 |
| Rn (W·m ⁻²) | 313 | 288 | 298 |
| w_{cb} (W·m ⁻²) | 26 | 26 | 27 |
| w_s (W·m ⁻²) | 102 | 93 | 107 |
| w (W·m ⁻²) | 185 | 169 | 164 |

Taula V.8: gradient tèrmic a la superfície del sòl ((dT/dz)_{z=0}), radiació neta a l'interior del túnel (Rn), pèrdues de calor per unitat de superfície de sòl a través del material de coberta (w_{cb}) i a través del sòl (w_s) i flux de calor que escalfa l'aire interior (w) a cada un dels assaigs de camp (C-1 a C-3)

Hem d'assenyalar que els valors obtinguts de w_s són molt més alts dels que serien habituals en un hivernacle comercial, degut a que en el nostre cas l'absència de cultiu i el baixíssim contingut d'humitat del sòl fa que s'assoleixin temperatures molt més altes a la superfície d'aquest.

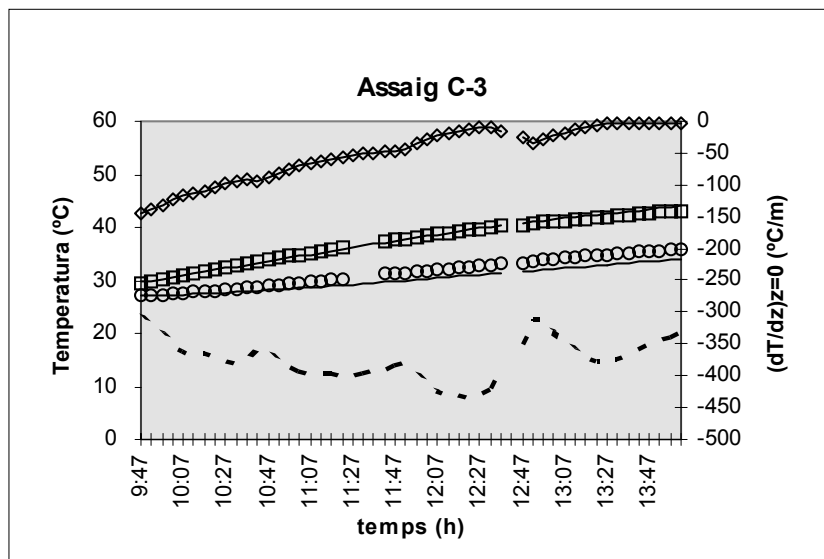
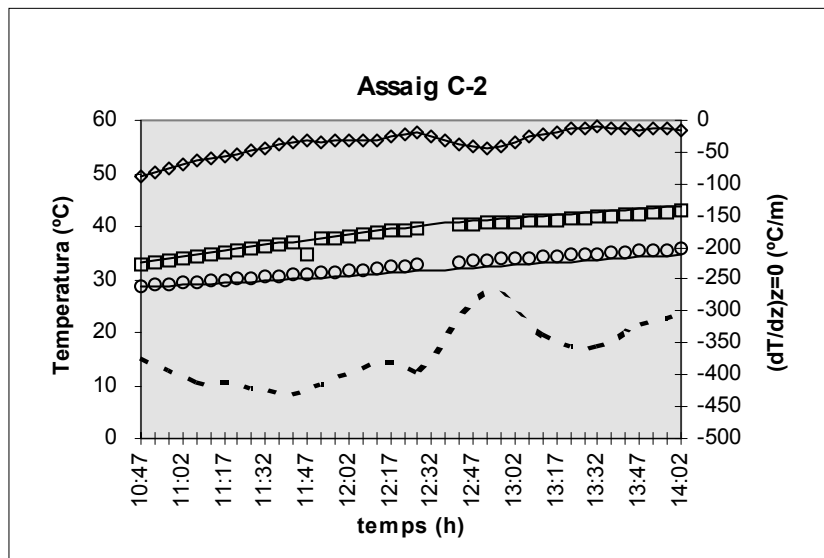
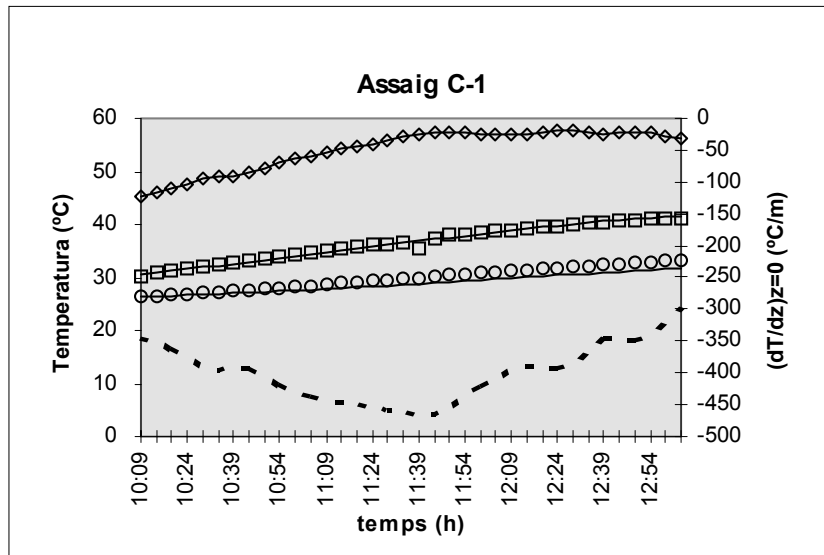


Fig. V.7: Correspondència entre l'evolució de les temperatures del sòl mesurades a 0 (rombe), -5 (quadrat) i -10 (cercle) cm de fondària i les obtingudes numèricament (línia contínua). En línia discontinua, evolució en el temps del gradient tèrmic a la superfície del sòl $(dT/dz)_{z=0}$.

V.4.2 Correspondència dels resultats de laboratori amb els de camp i els del model teòric

A partir dels valors de w obtinguts a l'apartat anterior, podem comparar els increments de temperatura obtinguts en els assaigs de camp amb els calculats per aplicació del model teòric utilitzat a l'apartat V.3. i amb els corresponents als valors de θ (*int*) obtinguts a cada un dels quatre assaigs de laboratori amb $Re > 900$ (A-1 a A-4). A la taula V.9 s'indiquen els increments obtinguts per aplicació dels diferents procediments.

Podem observar que no hi ha diferències estadísticament significatives entre els valors mesurats (al camp) i els obtinguts als assaigs de laboratori ni entre els mesurats i els teòrics, degut principalment a que l'error estàndard en els experiments de camp és, comparativament, molt alt. Això fa que no sigui possible quantificar amb precisió la desviació existent entre els resultats de camp i els obtinguts pels altres dos procediments. En tot cas, podem afirmar que els resultats obtinguts amb els assaigs de laboratori son prou propers als obtinguts pels altres procediments com per fer-ne, del mètode proposat, una eina vàlida per l'estudi del flux de ventilació per efecte tèrmic; presentant l'avantatge addicional sobre els procediments de camp de proporcionar una informació molt més completa amb un cost més reduït tant d'equipament com de temps.

| | | Assaig | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | C-1 | C-2 | C-3 |
| ΔT mesurat | | 4,22 (0,55) | 4,32 (0,52) | 4,46 (0,59) |
| ΔT model teòric | | 4,71 | 4,43 | 4,32 |
| ΔT segons assaig de laboratori | A-1 | 3,75 | 3,52 | 3,44 |
| | A-2 | 3,76 | 3,54 | 3,45 |
| | A-3 | 3,61 | 3,39 | 3,31 |
| | A-4 | 4,20 | 3,95 | 3,85 |
| | tots | 3,83 (0,13) | 3,60 (0,12) | 3,51 (0,12) |

Taula V.9: Incrementos de temperatura obtinguts experimentalment en els assaigs de camp (entre parèntesi els errors estàndard), calculats utilitzant el model teòric i calculats a partir dels resultats obtinguts a cada un dels quatre assaigs de laboratori (A-1 a A-4).

V.5. Assaigs de laboratori amb altres models d'hivernacle

Hem aplicat el mètode experimental de laboratori proposat a l'estudi de la ventilació natural per efecte tèrmic en hivernacles de geometries i disposicions de finestres diferents a les utilitzades al llarg de l'apartat V.2. Els resultats obtinguts s'indiquen a continuació i en ells podrem observar que, en molts casos, les dimensions de l'equipament experimental disponible han esdevingut una limitació important.

V.5.1 Hivernacle-túnel amb una sola finestra lateral

S'han realitzat 2 assaigs amb dues maquetes a escales 1/12 i 1/6 d'hivernacles túnel de característiques geomètriques idèntiques a les descrites per als assaigs de l'apartat V.2, però sense la presència de la finestra zenital, el que eliminava l'efecte xemeneia dominant en els assaigs anteriors. Fem notar que la maqueta a escala 1/6 tindrà una alçada de 333 mm, molt propera a l'altura del tanc, el que ens generarà alguns problemes en l'obtenció d'imatges que explicarem més endavant.

Els cabals i increments relatius de densitat de la solució salina utilitzada a cada assaig han estat de 1,65 l/h i 0,19 a la maqueta a escala 1/12 i 5 l/h i 0,057 a la maqueta a escala 1/6.

Els números de Reynolds calculats a priori mitjançant el procediment descrit a l'apartat V.2.3. i utilitzant l'equació II.33 per al càlcul del cabal intercanviat a través de l'única finestra vertical existent (considerem com abans un coeficient de descàrrega 1), són de 310 per l'assaig a escala 1/12 i de 600 per l'assaig a escala 1/6.

A l'observar la distribució de valors de θ a la fig V.8, on en aquesta ocasió cada increment d'intensitat de gris es correspon amb un increment de θ de 5 unitats, a la secció transversal de la maqueta realitzada a escala 1/6, veiem una àrea força important en la que es produeix una interferència del colorant que al llarg de l'experiment s'ha anat dipositant a la part més fonda del tanc (colorant “de fons”) i que a l'ocupar la maqueta només 5 cm dels 23 cm d'amplada interior del tanc, l'atenuació de la llum provocada pel colorant de fora de la maqueta s'afegeix, en l'àrea afectada, a la provocada pel colorant de dintre de la maqueta. Això no afecta, en

canvi, al flux de fluid a través de la finestra lateral, ja que aquesta està molt allunyada del fons del tanc.

Si ignorem l'àrea afectada pel colorant "de fons", podem comparar els resultats obtinguts amb les dues maquetes, observant-se diferències importants en les característiques del flux. Així, a la maqueta a escala 1/6, amb $Re = 600$, observem un alt grau d'uniformitat fora de l'àrea afectada per la corrent de gravetat, sent el valor de θ del flux de sortida de la maqueta molt similar al de l'interior d'aquesta; en canvi a la maqueta a escala 1/12, amb $Re = 310$, observem una estratificació important en un àrea àmplia, d'altura molt superior a la de la finestra lateral; això fa que el valor de θ del flux de sortida sigui molt inferior al que tenim en el fluid que ocupa la major part de la secció, sent aquest darrer força superior al que teníem en l'experiment anterior.

El valor promig de θ a l'experiment a escala 1/6 ($Re=600$), fora de l'àrea afectada per la corrent de gravetat i pel colorant "de fons" és de 26,96. A la taula V.10 s'indiquen els increments de temperatura calculats, per al valor de θ esmentat, suposant valors de w de 200, 350 i 500 W i suposant una temperatura exterior de 300 K. A la mateixa taula, s'indiquen els increments de temperatura, en les mateixes condicions, calculats mitjançant el model teòric proposat a l'apartat IV-6, utilitzant l'equació II.34 per al càlcul del flux volumètric ($C=0,75$). Podem observar que els valors calculats a partir dels resultats experimentals de l'assaig a escala 1/6 ($Re=600$) coincideixen força amb els predits per al model teòric (no així els resultats de l'assaig a escala 1/12 ($Re=310$), que a més de mostrar una gran heterogeneïtat, ens donaria increments de temperatura molt més grans que els anteriors)

A la mateixa taula V.10 trobem la relació entre les pèrdues de calor a través de la coberta i la calor que escalfa l'aire interior de l'hivernacle (w_{cb}/w), observant-se que en aquest cas, en ser la ventilació natural molt més deficient i l'increment de temperatures obtingut molt més gran que en el tipus d'hivernacle anterior, les pèrdues a través de la coberta tenen una importància relativa molt gran, el que qüestiona l'aplicabilitat del mètode al ignorar-se les modificacions que aquestes puguin introduir en el comportament del flux. Així mateix, hem de fer notar que els valors de w considerats, tot i ser idèntics als de l'hivernacle anterior, correspondrien (suposant materials de coberta de característiques idèntiques) a radiacions incidents molt

superiors, ja que els valors de w corresponen únicament a aquella part de l'energia total rebuda que contribueix a escalfar l'aire interior de l'hivernacle.

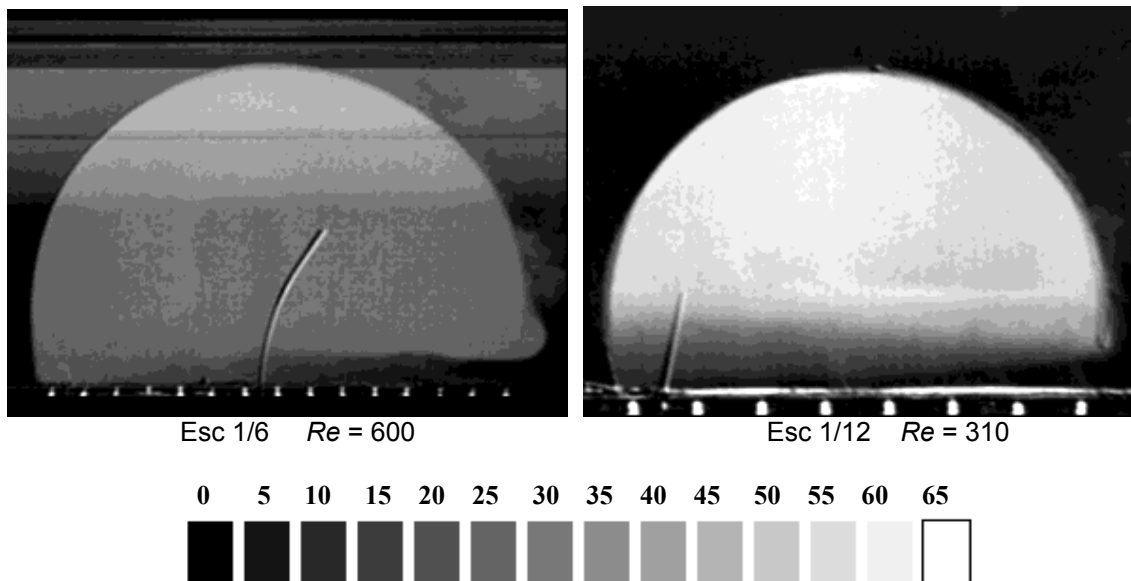


Fig V.8: Distribució dels valors de θ a les dues seccions transversals dels experiments realitzats a números de Reynolds de 600 i de 310. Cada nivell de gris correspon al valor de θ mostrat a la taula

| | w (W/m ²) | ΔT (°C) | w_{cb}/w |
|---------------------|-------------------------|-----------------|------------|
| Assaig | 200 | 17,65 | 0,54 |
| | 350 | 25,64 | 0,45 |
| | 500 | 32,52 | 0,340 |
| Model teòric | 200 | 16,50 | 0,503 |
| | 350 | 23,97 | 0,418 |
| | 500 | 30,40 | 0,371 |

Taula V.10: Comparació dels increments de temperatura i de la relació entre el flux de calor a través de la coberta i el que escalfa l'aire interior (w_{cb}/w) obtinguts, per 3 fluxos de calor w diferents entre l'interior i l'exterior de l'hivernacle mitjançant l'assaig de laboratori a escala 1/6 ($Re=600$) i el model teòric

V.5.2 Hivernacle multi-túnel

S'han realitzat 8 assaigs amb maquetes a escala 1/40 d'un hivernacle multitúnel de sis naus de les característiques que s'indiquen a la figura V.9. S'han assajat les quatre combinacions diferents de finestres que s'indiquen a la fig V.10 i que designarem amb la numeració del 1 al 4, realitzant-se dues repeticions de cada una de les combinacions que anomenarem a i b.

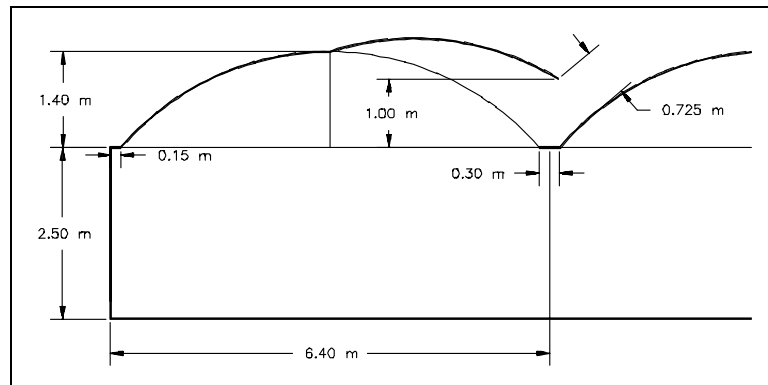


Fig. V.9: Característiques i dimensions a escala real de les naus de l'hivernacle multi-túnel estudiat.

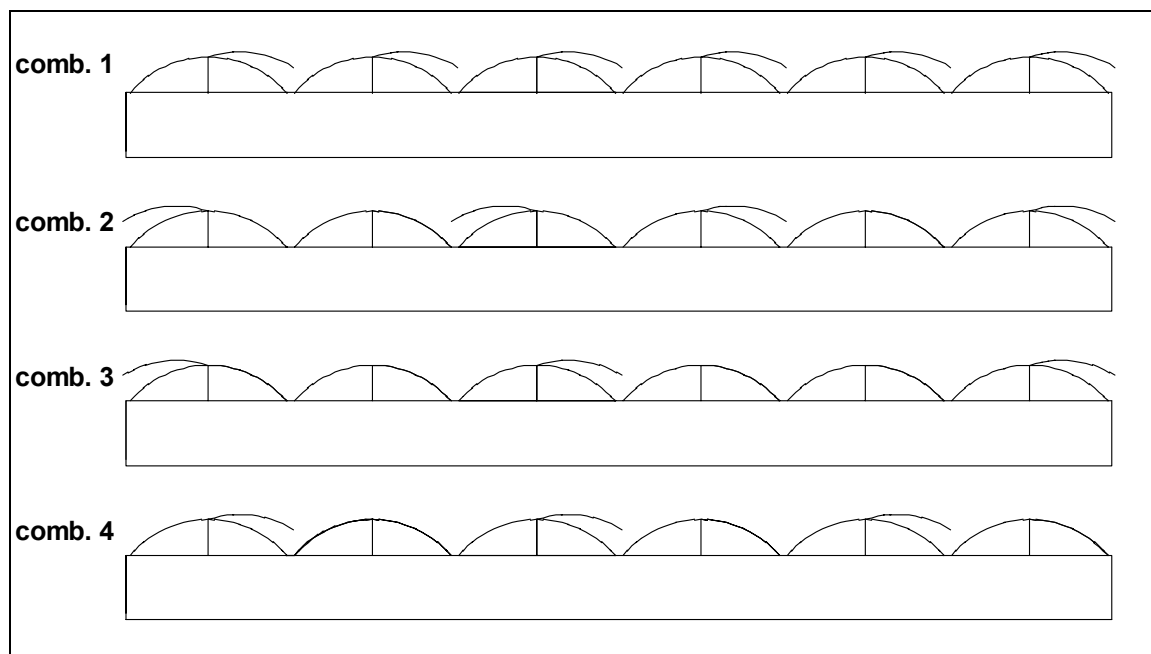


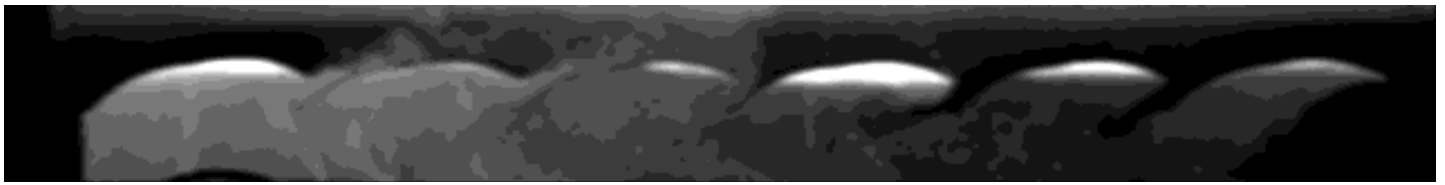
Fig V.10: Diferents combinacions d'obertures assajades amb els hivernacles multi-túnel.

Els cabals i increments relatius de densitat de la solució salina utilitzada a cada assaig han estat els que s'indiquen a la taula V.11. A la mateixa taula, s'indiquen els números de Reynolds calculats a priori mitjançant el mateix procediment de l'apartat anterior, considerant totes les finestres idèntiques i suposant, per tant, que la solució salina injectada s'evacua a parts iguals per cada una d'elles.

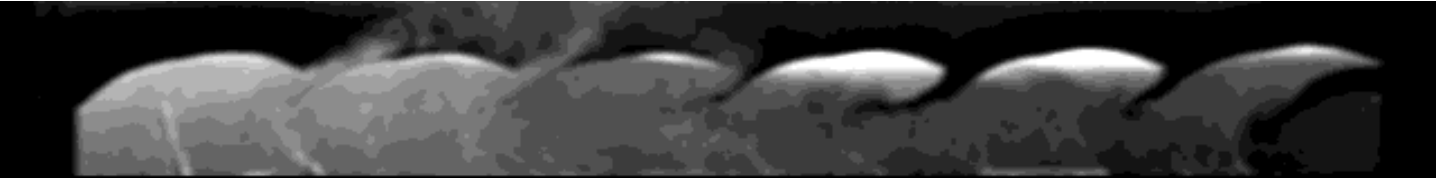
Podem observar que els valors de Re utilitzats en els assaigs son molt baixos si els comparem amb els que en els assaigs anteriors han proporcionat una simulació realista de les característiques del flux. Això és degut a que la construcció de la maqueta ha estat condicionada per les mides del tanc del que es disposava i del panell d'il.luminació, de forma que tot i intentant assolir els increments relatius de densitat més alts possibles a la solució salina, no podem assolir valors de Re teòrics superiors a 400 i com a conseqüència, tal i com veurem a continuació, no aconseguirem una reproducció realista de les característiques del flux.

| Config. | Assaig | Q_{SS} (l/h) | $(\Delta\rho/\rho)_{SS}$ | Re |
|----------------|---------------|----------------------------------|--|------------------------|
| 1 | a | 10,47 | 0,2044 | 323 |
| | b | 10,47 | 0,1921 | 317 |
| 2 | a | 10,47 | 0,1772 | 353 |
| | b | 10,47 | 0,1890 | 360 |
| 3 | a | 10,47 | 0,1944 | 400 |
| | b | 10,47 | 0,1960 | 401 |
| 4 | a | 10,47 | 0,1876 | 396 |
| | b | 10,47 | 0,1870 | 395 |

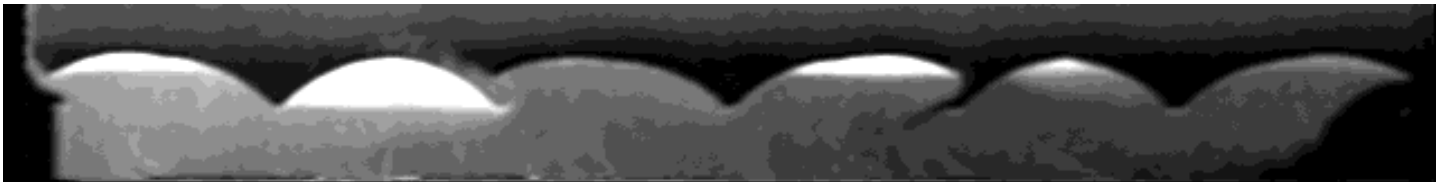
Taula V.10: Cabals de les solucions salines (Q_{SS}), increments relatius de densitat d'aquestes ($(\Delta\rho/\rho)_{SS}$) i números de Reynolds teòrics de cada experiment (Re).



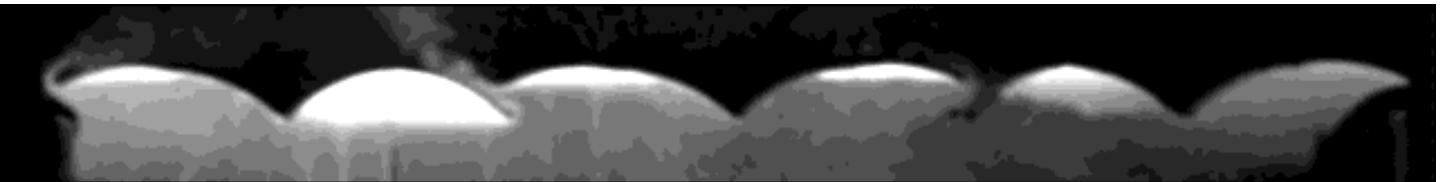
Comb. 1 a $Re = 323$



Comb. 1 b $Re = 317$



Comb. 2 a $Re = 353$



Comb. 2 b $Re = 360$



Comb. 3 a $Re = 400$



Comb. 3 b $Re = 401$



Comb. 4 a $Re = 396$



Comb. 4 b $Re = 395$

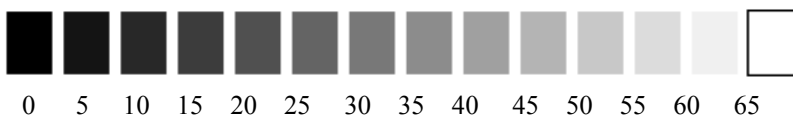


Fig. V.11: Distribució dels valors de θ a la secció transversal dels 8 assaigs realitzats, corresponents a 4 combinacions de finestres amb 2 repeticions. Cada nivell de gris correspon al valor de θ mostrat a la taula.

A la figura V.11 observem la distribució de valors de θ ; corresponent cada increment d'intensitat de gris a un increment de θ de 5 unitats. És interessant aclarir, que en aquesta ocasió, en estar considerant un hivernacle a escala real molt més gran que els anteriors, la relació entre ΔT i θ variarà per unes mateixes condicions exteriors, ja que aquesta relació és funció, també, de L_F (equació IV.10) que ha passat de ser 3 m a ser 38,4 m. Així, si suposem un flux de calor aportat a l'aire interior de l'hivernacle de 342 W/m^2 i una temperatura exterior de 300 K, cada unitat del paràmetre adimensional θ correspon a un increment de temperatura de 0,4 K.

A l'observar la distribució de valors de θ a les seccions transversals de la figura V.11, constatem l'existència d'una gran heterogeneïtat i d'un elevat grau d'estratificació, tal com era previsible degut als valors de Re massa baixos amb que hem hagut de treballar, condicionats per les característiques de l'equipament experimental disponible. Tot i que les característiques del flux obtingudes en els experiments no reproduïxen de forma realista les característiques que tindriem a escala real, comentarem els aspectes dels resultats obtinguts en els assaigs de laboratori que creiem més interessants.

Crida especialment l'atenció el comportament de les finestres de ventilació, que tot i estar situades totes a la mateixa altura es comporten, en la majoria d'ocasions, com a finestres únicament d'entrada o únicament de sortida de fluid; mantenint-se sempre el mateix tipus de comportament (a excepció de la configuració 2), que tot sembla indicar que es veu fortament condicionat per la forma geomètrica de la secció, ja que en aquelles configuracions en que totes les naus s'obren pel mateix costat (configuracions 1 i 4) s'estableix una circulació del flux en el conjunt de naus que fa que les finestres situades a l'extrem corresponent al costat pel que s'obren les naus es comportin com a finestres d'entrada i les situades a l'extrem contrari com a finestres de sortida, podent existir un comportament mixt en alguna de les finestres centrals; això provoca, en les configuracions esmentades, un gradient horitzontal de valors de θ molt important. La configuració 2 presenta la particularitat de ser simètrica; en els experiments realitzats amb aquesta configuració s'observa en tots els casos un comportament inicial del flux també simètric, fins arribar un instant a partir del qual aquest tipus de comportament es perd, arribant-se a la situació d'equilibri que s'observa a la figura, en que les

dues finestres d'un costat de l'eix de simetria tendeixen a comportar-se únicament com a finestres d'entrada i les dues del costat oposat com a finestres de sortida.

Seria interessant conèixer si algunes de les característiques del flux obtingut en els assaigs de laboratori poden mantenir-se en unes condicions de flux similars a les reals. Així mateix, seria necessari determinar el número de Reynolds mínim que cal mantenir en aquests assaigs per poder garantir que estem realitzant una simulació realista del flux. Aquestes determinacions haurien de fer-se, inevitablement, amb un tanc de dimensions més grans, que permetés treballar amb maquetes de mida superior a les utilitzades i amb proua fondària per assegurar que, abans d'assolir-se el règim permanent, no s'arribarà a salinitzar i a omplir de colorant la zona ocupada per la maqueta.

VI. CONCLUSIONS

La ventilació natural per efecte tèrmic en hivernacles pot ser estudiada utilitzant models a escala i aigua com a fluid de treball, aconseguint les diferències de densitat que, a escala real, serien provocades per l'escalfament de l'aire a l'interior de l'hivernacle i que serien les responsables del flux de ventilació, a base d'introduir sal a l'interior de la maqueta de l'hivernacle.

La tècnica de l'addició de colorant permet, a més de la visualització del flux, la quantificació dels increments relatius de densitat a l'interior de les maquetes bidimensionals utilitzades mitjançant un mètode indirecte de mesura consistent en determinar els esmentats valors a partir de l'atenuació de la llum provocada pel colorant introduït juntament amb la solució salina.

Existeix una relació de tipus exponencial entre les concentracions de colorant presents a l'interior de les maquetes i l'atenuació de la llum provocada per aquest. S'ha comprovat que si el nivell d'atenuació de la llum no és superior al 35%, podem considerar com a lineal l'esmentada relació. En aquestes condicions, es pot establir també una relació lineal entre els increments d'intensitat de gris provocats pel colorant en un punt qualsevol de la secció de la maqueta estudiada i els increments relatius de densitat del fluid que ocupa el mateix punt, sempre que les condicions d'il·luminació de la maqueta siguin prou homogènies i que els efectes de la difusió de la sal i del colorant siguin menyspreables.

La mesura simultània dels increments d'intensitat de gris i de la conductivitat elèctrica en un punt fix de la secció de cada un dels experiments realitzats permet establir una relació lineal entre ambdós paràmetres. En ser el segon paràmetre una mesura indirecta de l'increment de densitat del fluid, és possible, a partir de la distribució dels increments d'intensitat de gris en la secció analitzada, obtenir la distribució d'increments relatius de densitat.

El paràmetre adimensional θ definit en aquest treball permet determinar, a partir dels valors dels increments relatius de densitat obtinguts a l'interior de les maquetes, els valors dels increments de temperatura que correspondrien a escala real, per unes condicions ambientals donades de radiació i temperatura exterior.

Pel tipus d'hivernacle utilitzat per determinar els límits d'aplicabilitat del mètode, s'ha establert el valor de Re a partir del qual les forces viscoses deixen de ser importants al voltant de 900; per hivernacles amb geometries diferents a l'estudiada caldrà determinar experimentalment aquest valor crític, podent servir el valor obtingut com a referència.

Amb el procediment de laboratori proposat no és possible simular el flux de calor a través del material de coberta, sent possible però fer una estimació de la importància relativa d'aquest en front del flux de calor per renovació de l'aire interior, que pel tipus d'hivernacle analitzat representa un percentatge entre el 10 i el 15% per valors del flux de calor per renovació compresos entre 200 i 500 W/m².

L'aplicació dels criteris establerts en aquest treball per l'elecció en futurs experiments de l'increment relatiu de densitat, cabal i concentració de colorant de la solució salina, així com per l'estimació de l'escala de longituds mínima necessària, permet aconseguir que els resultats obtinguts dels assaigs de laboratori ens surtin dins d'un rang de valors que faci possible i faciliti la seva interpretació.

La comparació dels resultats obtinguts en els experiments de laboratori amb els calculats a partir de la teoria de l'eix neutre mostra que, pel tipus d'hivernacle analitzat, els increments de temperatura obtinguts amb els primers són de l'ordre d'un 20% inferiors als obtinguts amb els darrers. En comparar els resultats de laboratori amb els de camp les diferències observades entre ambdós són lleugerament inferiors, si bé el nivell de precisió de l'instrumental utilitzat per la determinació dels fluxos de calor i dels increments de temperatura tan sols ens permet afirmar que no existeixen diferències significatives entre els resultats obtinguts amb ambdós tipus d'experiències. En aquest sentit, un primer suggeriment de cara a la continuació de la recerca seria la realització d'assaigs a escala real que permetin mesurar amb més precisió tant els fluxos de calor com els increments de temperatura, per tal de quantificar la correcció que cal introduir als increments de temperatura obtinguts als assaigs de laboratori.

En l'aplicació del mètode a l'estudi dels hivernacles multitúnel, tot i que per limitacions en les dimensions de l'equipament disponible no s'han pogut satisfer totes les condicions exigibles per obtenir una simulació realista del flux, s'ha pogut observar un comportament d'aquest diferent a l'esperat. En concret s'ha observat que la circulació del fluid a través de les diferents finestres s'acostuma a produir a cada una d'elles en un únic sentit, tot i trobar-se totes a la mateixa altura; estant el sentit de circulació estretament lligat a la forma geomètrica de la secció de l'hivernacle. Un segon suggeriment per a la continuació de la recerca consistiria en construir un dispositiu experimental de dimensions suficients per permetre l'estudi d'hivernacles multicapella i multitúnel treballant a escales adients que permetin obtenir una simulació realista del flux i comprovar fins a quin punt la geometria de la secció pot determinar el comportament del flux a les diferents finestres.

El mètode de laboratori proposat s'ha mostrat com una eina útil, d'aplicació en el disseny d'hivernacles, permetent la comparació del comportament de diferents tipus d'estructures amb característiques geomètriques diferents i amb diferents disposicions de finestres; presentant l'avantatge addicional del seu baix cost econòmic.

També pot ser interessant la seva utilització per la validació de models numèrics que puguin desenvolupar-se en un futur per a l'estudi de la ventilació en hivernacles. Aquests podrien ser utilitzats al mateix temps, en sentit contrari, per avaluar la incidència en el comportament del flux d'aquells fenòmens ignorats en el nostre procediment, com ara el flux de calor a través del material de coberta, ja que fer-ho en condicions de camp representaria un elevadíssim grau de dificultat.

Un dels aspectes no abordats en el present treball i que podria ser objecte de recerques posteriors és l'estudi de la incidència que sobre les característiques del flux pot tenir la presència d'un cultiu i el seu estat de desenvolupament.

VII. Bibliografía:

Albright, L.D., Controlling greenhouse ventilation inlets by pressure difference. *HortTechnology*. 5(3). 1995

ASHRAE, Handbook of Fundamentals. *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*. Atlanta, EE.UU.. 1985

Awbi, H.B., Ventilation of buildings. *E & FN Spon*, 212-268. 1991

Baturin, V.V., Fundamentos de ventilación industrial. *Labor S.A.*. 1976

Bot, G.P.A., Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. *Thesis Agricultural University Wageningen*. Holanda. 1983

Boucher, R.F., Kamala, M.A., Near real-time particle image velocimetry (PIV) by streak analysis. *Flucom'1991, 3rd triennial international symposium on fluid control, measurement, and visualization papers*, A.S.M.E.. 1991

Boulard, T., Baille, A., A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 65, 145-157. 1993

Boulard, T., Baille, A., Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 61, 37-48. 1995

Boulard, T., Draoui B., Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: Measurements and data analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 61, 27-36. 1995

Boulard, T., Meneses, J.F., Mermier, M., Papadakis, G., Characterisation of the mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Symposium IFAC-ISHS on mathematical and control applications in agriculture and horticulture*. Silsoe G.B.. September 1994.

Boulard, T., Meneses, J.F., Mermier, M., Papadakis, G., The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*. 79, 61-77. 1996.

Brockett, B.L., Albright, L.D., Natural ventilation in single airspace buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 37, 141-154. 1987

Brown, F.N.M., A photographic technique for the mensuration and evaluation of aerodynamic patterns. *Photog. Eng.* 4, 146-156. 1953

Brown, W.G., Solvason, K.R., Natural convection through rectangular openings in partitions -1- Vertical partitions. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 5, 859-868. 1962

Bruce, J.M., A computer program for the calculation of natural ventilation due to wind. *Farm Building Research and Development Studies*. 7: 1-3, 6. 1975

Bruce, J.M., Natural Convection through openings and its application to cattle building ventilation. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 23, 151-167. 1978

Bruce, J.M., Ventilation of a model livestock building by thermal buoyancy. *Transactions of the A.S.A.E.* 25, 1724-1726. 1982

Buchhave, P., Particle image velocimetry - status and trends. *Experimental Thermal and Fluid Science* 5:586-604. 1992

Chiapale, J.P., de Villele, O., Kittas, C., Estimation des besoins de ventilation d'une serre plastique. *Acta Horticulturae*. 154 "Plastics in Mediterranean regions", 257-266. 1984

Davies, P.A., Aspects of flow visualisation and density field monitoring of stratified flows. *Optics and Lasers in Engineering* 16: 311-335. 1992

De Jong, T., Natural ventilation of large multi-span greenhouses. *Thesis Agricultural University Wageningen. Holanda.* 1990

De Vries, D.A., Thermal properties of soils, in *W.R. Van Wijk (eds.), Physics of plant environment. North-Holland Publ. Co.. pp 210-235.* 1966

Domingo, A., Tratamiento digital de imágenes. *Anaya. Madrid.* 1993

Down, M.J., Foster, M.P., McMahon T.A., Experimental verification of theory for ventilation of livestock buildings by natural convection. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 45, 269-279. 1990

Dvorak, V., Über eine neue einfache Art der Schlierenbeobachtung. *Ann. Phys. Chem.* 9, 502-512. 1880

Emswiler, J.E., The neutral zone in ventilation. *American Society of Heating and Ventilating Engineers.* 32: 59-63. 1926

Fernandez, J.E., Bailey, B.J., Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology.* 58: 229-245. 1992

Gandemer, J., Bietry, J., Cours d'aérodynamique REEF, Vol. 2, Sciences du bâtiment. *CSTB Nantes.* 1989

Garzoli, K.W., Blackwell, J., An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 26:203-214. 1981

Goedhart, M., Nederhoff, E.M., Udink ten Cate, A.J., Bot, G.P.A., Methods and instruments for ventilation rate measurements. *Acta Horticulturae.* 148, 393-400. 1984

Gonzalez, R.C., Wintz, P., Digital image processing. *Addison-Wesley Publishing Company*.
EE.UU.. 1987

Gröber, H., Erk, S., Grigull, V., Transmisión de calor. *Selecciones científicas*. 51-121. 1967

Herranz, A., Arenas A., Análisis dimensional y sus aplicaciones. *Universidad de Murcia*.
1989

Hewlett Packard, Practical temperature measurements. *Hewlett Packard, application note*
220. EE.UU.. 1980

Jain, A.K., Fundamentals of digital image processing. *Prentice-Hall internacional, Inc.*.
EE.UU.. 1989

Jaluria, Y., Lee, S.H., Mercier, G.P., Tan, Q., Visualization of transport across a horizontal
vent due to density and pressure differences. *HTD-Vol. 252, Visualization of heat transfer*
processes, ASME. 1993

Jolliet, O., Modelisation du comportement thermique d'une serre horticole. *These Doct.*
Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. 1988

Jolliet, O., Horticorn: An improved static model for predicting the energy consumption of
greenhouse. *Agric. For. Meteorol.*. 55:265-294. 1991

Kawasue, K., Ishimatsu, T., Fast measuring technique of velocity distribution of water
flow. *Flucom'1991, 3rd triennial international symposium on fluid control, measurement,*
and visualization papers, A.S.M.E.. 1991

Keane, R.D., Adrian, R.J., Theory and simulation of particle image velocimetry. *SPIE Vol.*
2052 Laser Anemometry Advances and Applications, pp 477-492. 1993

Kimoto, H., Miyawaki, Y., Imajyo M., Three-dimensional flow generated in the multicellular natural-convection field of a vertical slot. *Transactions J.S.M.E.* 57 (533B): 236-242. 1991

Kittas, C., Contribution théorique et expérimentale à l'étude du bilan d'énergie des serres. *These Doct. Ing., Univ. Perpignan.* 1980

Kittas, C., Estimation des besoins d'aération des serres en Grèce. *Agronomie.* 6(7), 629-632. 1986

Kittas, C., Draoui, B., Boulard, T., Quantification du taux d'aération d'une serre à ouvrant continu en toiture. *Agricultural and Forest Meteorology.* 77, 95-111. 1995

Kozai, T., Sase, S., A simulation of natural ventilation for a multi-span greenhouse. *Acta Horticulturae.* 87, 39-49. 1978

Kozai, T., Sase, S., Nara, M., A modeling approach to greenhouse ventilation control. *Acta Horticulturae.* 106, 125-136. 1980

Lane-Serff, G.F., Heat flow and air movements in buildings. *Ph.D. thesis, University of Cambridge.* . 1989

Lane-Serff, G.F., Linden, P.F., Galtry, M., Baker, N.V., Laboratory and mathematical modelling: the design of a naturally ventilated building, in *F. Lunau and G.L. Reynolds (eds.), Indoor air quality and ventilation. Selver.* pp45-54. 1990

Lane-Serff, G.F., Linden, P.F., Parker, D.J., Smeed, D.A., Laboratory modelling of natural ventilation via chimneys, in *S.Alvarez et al (eds.), Architecture and Urban Space. Kluwer Academic Publishers.* 1992

Linden, P.F., Jagger, S.F., Redondo, J.M., Britter, B.F., Moodie, K., The effect of water spray barrier on a tunnel fire. *IMEchE* 1992 C438/013. 1992

Linden, P.F., Lane-serff, G.F., Smeed, D.A., Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation. *Journal of Fluid Mechanics.* 212, 309-335. 1990

Linden, P.F., Redondo, J.M., Molecular mixing in Rayleigh-Taylor instability. Part I: Global mixing. *Phys. Fluids A.* 3(5), 1269-1276. 1991

Linden, P.F., Simpson, J.E., Buoyancy driven flows through an open door. *Air Infiltration Rev.* 6:4-5. 1985

Maghirang, R.G., Manbeck, H.B., Modeling particle transport in slot-inlet ventilated airspaces. *Transactions of the A.S.A.E..* 36(5), 1449-1459. 1993

Maltby, R.L., Keating, R.F.A., Smoke techniques for use in low speed wind tunnels. *AGARDograph.* 70, 29-38. 1962

Markatos, M.C., Cox, G., Hydrodynamics and heat transfer in enclosures containing a fire source. *Phys. Chem. Hydrodyn.,* 5, 53-66. 1984

Massons, J., Ruiz, X., Díaz, F., Image processing of the near wakes of stationary and rotating cylinders. *Journal of Fluid Mechanics.* 204, 167-184. 1989

Merzkirch, W., Flow Visualization. *Academic Press, Inc.. London.* 1974

Montero, J.I., Antón, A., Greenhouse cooling during warm periods. *Acta Horticulturae.* 357, 49-61. 1994

Morris, L.G., Neale F.E., The infra-red carbon dioxide gas analyser and its use in glasshouse research. *National Institute of Agricultural Engineering Tech. Memo N° 99, Silsoe. United Kingdom.* 1954

Nederhoff E.M., Vooren, J. van de, Udink ten Cate, A.J., A method to determine ventilation in greenhouses. *Acta Horticulturae.* 148. 1983

Nederhoff E.M., Vooren, J. van de, Udink ten Cate, A.J., A practical tracer gas method to determine ventilation in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 31 (4): 309-319. 1985

Okada, M., Takakura, T., Guide and data for greenhouse air conditioning. 3: Heat loss due to air infiltration of heated greenhouses.. *J. Agric. Meteorol.. (Tokyo)* 28(4), 223-230. 1973

Palacios, J., Análisis dimensional. *Espasa-Calpe.* 1964

Papadakis G., Mermier M., Meneses J.F., Boulard T., Measurements and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *XII CICGR, AgEng'94, Milano (Italy).* 1994

Papadakis G., Mermier M., Meneses J.F., Boulard T., Measurements and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. . *Journal of Agricultural Engineering Research.* 63, 219-228. 1996

Patankar, S.V., Numerical heat transfer and fluid flow. *Hemisphere, New York.* 1980

Perez-Segarra, C.D., Oliva A., Costa, M., Escanes F., Numerical experiments in turbulent natural and mixed convection in internal flows. *Int. J. Num. Meth. heat fluid flow.* 5, 13-33. 1995

Pruna, L., Simulació numèrica de conducció de calor en aliments. *TFC. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona.* 1995

Redondo J.M., Difusión turbulenta en fluidos estratificados. *Tesi. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.* 1987

Revesz, Z., Tanner, P.A., Gottschalk, G., Suter, P., Visual control of the flow field in air conditioned/ventilated rooms. *Industrial and agricultural applications of fluid mechanics. FED-Vol.86.* 1989

Rodi, W., Turbulence models and their application in Hydraulics. *International Association for Hydraulic Research.* 1984

Rüther, M., Natural ventilation rates of closed greenhouses. *Acta Horticulturae. 170, 185-191.* 1985

Shaw, B.H., Heat and mass transfer by natural convection and combined natural convection and forced air flow through large rectangular openings in a vertical partition. *Inst. Mech. Engrs Proc. of 1971 Conf. C117/71, 31-39.* 1971

Sherman, M.H., Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment. 25 (4): 365-374.* 1990

Simpson, J.E., Gravity currents in the laboratory, atmosphere and ocean. *Ann.Rev.Fluid Mech. 14:213-234*

Simpson, J.E., Gravity currents in the environment and the Laboratory. *John Wiley & Sons. New York, EE.UU.* 1987

Strachan, N.J.C., Length measurement of fish by computer vision. *Computers and Electronics in Agriculture. 8, 93-104.* 1993

Tam W.Y., Swinney, H.L., Mass transport in turbulent Couette-Taylor flow. *Physical Review A. 36(3), 1374-1281.* 1987

- Taylor E.S.**, Dimensional analysis for Engineers. *Clarendon Pres. Oxford*. 1974
- Timmons, M.B., Albright, L.D., Furry, R.B., Torrance, K.E.**, Experimental and numerical study of air movement in slot-ventilated enclosures. *A.S.H.R.A.E. Transactions*. 86 (1), 221-240. 1980
- Timmons, M.B., Baughman, G.R.**, Similitude analysis of ventilation by the stack effect from an open ridge livestock structure. *Transactions of the A.S.A.E.* 24(4), 1030-1034. 1981
- Timmons, M.B., Bottcher, R.W., Baughman, G.R.**, Nomographs for predicting ventilation by thermal buoyancy. *Transactions of the A.S.A.E.* 27(6), 1891-1893. 1984
- Udink ten Cate, A.J.**, Modeling and (adaptive) control of greenhouse climates. *Thesis Agricultural University Wageningen. Holanda*. 1983
- Van Wijk, W.R., De Vries, D.A.**, Periodic temperature variations in a homogeneous soil, in *W.R. Van Wijk (eds.), Physics of plant environment. North-Holland Publ. Co.. pp 102-143*. 1966
- Verheye, Ph., Verloot, H.**, Comparison of different systems for static ventilation of hemispheric plastic greenhouses. *Acta Horticulturae*. 281, 183-197. 1990
- Vernet, M.P.**, Particle displacement tracking applied to air flows. *Proc. 4th Int. Conference on Laser Anemometry-Advances and Applications, Cleveland, Ohio, pp. 327-335*. 1991
- Whittle, R.M., Lawrence, W.J.C.**, The climatology of glasshouses. II Ventilation. *Journal of Agricultural Engineering Research* 1960, 5, 36-41. 1960
- Willert, C.E., Gharib, M.**, Digital particle image velocimetry applied to an evolving vortex ring. *Proc. 5th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisboa. Paper 18.1*. 1990

Yabuki, K., Designing greenhouse mist cooling system. *Environment Control in Biology*. 2 (1), 14-20. 1974

Yeheskel, J., Kehat, E., Wakes of vertical and horizontal assemblages of drops. *Chem. Eng. Sci.* 26, 2037-2042. 1971

Zhang, J.S., Janni, K.A., Jacobson, L.D., Modeling natural ventilation induced by combined thermal buoyancy and wind. *Transactions of the A.S.A.E.* 32(6), 2165-2174. 1989