



# Trabajo Fin de Grado

Estudio del intercambio de gases en las hojas de  
*Quercus ilex* mediante Fluidodinámica  
Computacional

Study of gas exchange in leaves of *Quercus ilex*  
using Computational Fluid Dynamics

Autor

José Jacinto Cavero Alonso

Directores

Norberto Fueyo Díaz  
Ana Cubero García

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza

2017

## **Resumen**

Durante la fotosíntesis la absorción de CO<sub>2</sub> desde el exterior al interior de las hojas de las plantas a través de los estomas lleva aparejada la pérdida de H<sub>2</sub>O debido a que la humedad relativa del aire ambiente es menor que en el interior de la hoja. Diversos trabajos de investigación sugieren que la presencia de tricomas sobre las hojas de las plantas supone una mayor adaptación a condiciones de sequía debido a su posible influencia sobre el intercambio de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. La medida experimental del efecto de los tricomas sobre el intercambio de estos gases es muy difícil. El objetivo del trabajo es estudiar la influencia de los tricomas presentes en la superficie de las hojas de la encina (*Quercus ilex* L.) sobre el intercambio de gases entre la hoja y el exterior, mediante el uso de Fluidodinámica Computacional. Para ello se han utilizado dos configuraciones computacionales basadas en la anatomía de las hojas de la encina (una con tricomas y otra sin tricomas). Se ha estudiado el intercambio de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> con distintas condiciones ambientales de dirección y velocidad de viento y de humedad relativa. La eficiencia en el uso del agua (WUE) definida como el cociente entre el CO<sub>2</sub> absorbido y el H<sub>2</sub>O perdido determina las relaciones hídricas de la planta con su entorno. En condiciones de velocidad de viento y humedad relativa similares, los valores de flujo de H<sub>2</sub>O y WUE obtenidos mediante simulación fueron similares a los valores observados experimentalmente en hojas de encina. Cuando el viento es perpendicular a la superficie de la hoja la presencia de tricomas reduce la velocidad del viento en la capa de tricomas, lo que disminuye el flujo convectivo de H<sub>2</sub>O cerca de los estomas, y aumenta la WUE, siendo este efecto muy importante para velocidades de 1 m s<sup>-1</sup>. Cuando el viento es paralelo a la superficie de la hoja la presencia de una capa de tricomas conlleva que las capas límite viscosa y másica se originen por encima de la capa de tricomas, en lugar de originarse sobre la superficie de la hoja como ocurre en ausencia de estos. De esta forma, la presencia de tricomas reduce el flujo de H<sub>2</sub>O y aumenta la WUE. La humedad relativa ambiental no influye en esta reducción, pero sí la velocidad del viento de forma que el efecto de los tricomas es mayor a mayor velocidad de viento. En todos los casos estudiados la presencia de una capa de tricomas en las hojas disminuyó la pérdida de H<sub>2</sub>O desde la hoja y aumentó la WUE (14-93 %), confirmando la relación entre presencia de tricomas y mayor adaptación a condiciones de baja disponibilidad de agua.



**DECLARACIÓN DE  
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dª. José Jacinto Cavero Alonso,

con nº de DNI 73132408K en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales, (Título del Trabajo)  
Estudio del intercambio de gases en las hojas de Quercus ilex mediante Fluidodinámica Computacional

---

---

---

---

, es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 28 de Agosto de 2017

Fdo: José Jacinto Cavero Alonso

## **Agradecimientos**

A los profesores Norberto Fueyo Díaz y Ana Cubero García por la gran ayuda que me han prestado dirigiendo la realización de este trabajo. A Ramón Chordá Pérez por su ayuda en los cálculos de la capa límite. A los investigadores Eustaquio Gil Pelegrín y José Javier Peguero Pina del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria del Gobierno de Aragón (CITA) por los datos experimentales aportados. A Carlos Montañés Bernal, de la empresa Nabladot S.L., por su ayuda con el software ANSYS Fluent.

# Índice general

---

<b>Índice de figuras</b>	<b>7</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>9</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>11</b>
<b>1. El problema y los objetivos</b>	<b>13</b>
1.1. La fisiología de la planta, y su análisis . . . . .	13
1.1.1. El intercambio de gases entre las hojas y la atmósfera . . . . .	13
1.1.2. La eficiencia en el uso del agua y su relación con los tricomas . . . . .	15
1.1.3. El uso de modelos para estudiar el intercambio de gases entre las hojas y la atmósfera . . . . .	17
1.1.4. Características de las hojas de <i>Quercus ilex</i> . . . . .	19
1.2. Contexto en que se realiza el trabajo . . . . .	21
1.3. Metodología y objetivos de este trabajo . . . . .	22
<b>2. Modelado Computacional</b>	<b>23</b>
2.1. Mallas y dominios . . . . .	23
2.2. Aplicabilidad de la hipótesis del medio continuo . . . . .	28
2.3. Modelo matemático . . . . .	29
2.4. Viento perpendicular a la hoja: números de Péclet . . . . .	30
2.5. Viento paralelo a la hoja: capa límite . . . . .	31

2.5.1. Capa límite viscosa . . . . .	32
2.5.2. Capa límite másica . . . . .	33
2.5.3. Integración . . . . .	34
2.6. Condiciones de contorno . . . . .	39
2.6.1. Condiciones de contorno comunes a ambas situaciones . . . . .	40
2.6.2. Casos con viento perpendicular . . . . .	40
2.6.3. Casos con viento paralelo . . . . .	41
<b>3. Resultados</b>	<b>48</b>
3.1. Viento perpendicular a la hoja . . . . .	49
3.2. Viento paralelo a la hoja . . . . .	55
3.2.1. Efecto de la humedad relativa . . . . .	57
3.2.2. Efecto de la velocidad del viento . . . . .	59
3.3. Efecto de los tricomas de <i>Quercus ilex</i> en la eficiencia del uso del agua, y comparación con datos experimentales . . . . .	63
<b>4. Conclusiones</b>	<b>65</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>
<b>A. Figuras</b>	<b>72</b>
<b>B. Tablas</b>	<b>75</b>

# Índice de figuras

---

1.1.	Envés de una hoja de encina parcialmente depilada. Proporcionada por la Unidad de Recursos Forestales del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón . . . . .	15
1.2.	Fotografía microscópica de los tricomas de una hoja de encina. Proporcionada por la Unidad de Recursos Forestales del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón . . . . .	20
2.1.	Representación del dominio y la malla con tricomas . . . . .	24
2.2.	Capa de tricomas usada en el código de simulación (izda) y representación de los estomas y tricomas en detalle (dcha) . . . . .	25
2.3.	Vista superior de las configuraciones computacionales . . . . .	26
2.4.	Vista lateral de la configuración con tricomas . . . . .	27
2.5.	Perfil de velocidades (izda), perfil de fracciones másicas de $H_2O$ (centro) y perfil de fracciones másicas de $CO_2$ (dcha) . . . . .	31
2.6.	Solución numérica de la ecuación de Blasius y su extensión para especies químicas	36
2.7.	Espesor de la capa límite viscosa, bidimensional, laminar y plana, en función de la velocidad de la corriente externa . . . . .	38
2.8.	Representación de las caras que limitan el dominio. $T$ es la cara top, $N$ la cara norte, $S$ la cara sur, $E$ la cara este y $O$ la cara oeste. La cara inferior corresponde a la superficie de la hoja, en la que se encuentran los estomas . . .	39
2.9.	Representación esquemática de los perfiles de velocidades y fracciones míasicas introducidos como condición de contorno en la Cara oeste de la configuración sin tricomas (A) y de la configuración con tricomas (B) para los casos estudiados con viento paralelo a la hoja . . . . .	46

3.1. Vectores del módulo de la velocidad del aire (en $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en el caso con $1 \text{ m s}^{-1}$ de velocidad con viento perpendicular	49
3.2. Contornos del módulo de la velocidad del aire (en $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en el caso con $1 \text{ m s}^{-1}$ de velocidad con viento perpendicular	50
3.3. Contornos de la humedad relativa (en %) en un plano medio perpendicular a la hoja en el caso con $1 \text{ m s}^{-1}$ de velocidad con viento perpendicular	51
3.4. Contornos del módulo de la velocidad del aire (en $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en cada uno de los casos con viento perpendicular estudiados	53
3.5. Vectores del módulo de la velocidad del aire (en $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en cada uno de los casos con viento perpendicular estudiados	54
3.6. Vectores del módulo de la velocidad del aire (en $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en el caso con viento paralelo de $4 \text{ m s}^{-1}$	55
3.7. Contornos del módulo de la velocidad del aire (en $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en el caso con viento de $4 \text{ m s}^{-1}$ y 60% de humedad relativa en el ambiente	56
3.8. Contornos de la humedad relativa (en %) en un plano medio perpendicular a la hoja en los casos con velocidad de viento paralelo de $1 \text{ m s}^{-1}$ ( $u_a$ )	58
3.9. Contornos de la humedad relativa (en %) en un plano medio perpendicular a la hoja en los casos con 60% de humedad relativa en el ambiente con viento paralelo	61
3.10. Contornos del módulo de la velocidad del aire (en $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en los casos con 60% de humedad relativa en el ambiente con viento paralelo	62
A.1. Fotografía de una hoja de encina y representación esquemática de la ubicación de la malla que se ha escogido en el estudio	73
A.2. Contornos de velocidad del aire en un plano medio perpendicular a la hoja en la configuración con tricomas cuando se introduce un perfil de velocidades con origen en la superficie de la hoja (perfil semejante al que se introduce en la configuración sin tricomas). La figura <b>b</b> representa en detalle donde se hace nula la velocidad por debajo de la capa de tricomas	74

# Índice de cuadros

---

2.1. Dimensiones y características del dominio computacional. La longitud es en dirección X, la anchura en dirección Z y la altura en dirección Y . . . . .	25
2.2. Números de knudsen característicos del dominio . . . . .	29
2.3. Fenómeno de transporte dominante en función de la velocidad del viento para CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> O. Los paréntesis significan que el transporte se debe mayormente a ese fenómeno pero éste no llega a ser dominante . . . . .	30
2.4. Solución numérica de la ecuación de Blasius y su extensión para H <sub>2</sub> O . . . . .	35
2.5. Solución numérica de la ecuación de Blasius y su extensión para CO <sub>2</sub> . . . . .	35
2.6. Condiciones de contorno implementadas en los estomas de las configuraciones con y sin tricomas. $\phi''_{CO_2}$ es el flujo de CO <sub>2</sub> que absorben los estomas e $Y_{e,H_2O}$ es la fracción molarica de H <sub>2</sub> O en el estoma . . . . .	40
2.7. Condiciones de contorno implementadas en la entrada de las configuraciones con y sin tricomas para los casos con viento perpendicular a la superficie de la hoja . . . . .	41
2.8. Condiciones de contorno implementadas en las entradas de las configuraciones con y sin tricomas para los casos con viento paralelo a la superficie de la hoja . .	47
3.1. Flujo de H <sub>2</sub> O transpirado y WUE de cada uno de los casos con viento perpendicular estudiados, donde $u_a$ es la velocidad del aire y $HR_a$ la humedad relativa del aire ambiente . . . . .	52
3.2. Flujo de H <sub>2</sub> O transpirado y WUE de los casos con velocidad de viento paralelo de 1 m s <sup>-1</sup> ( $u_a$ ) con diferentes valores de la humedad relativa del ambiente ( $HR_a$ )	57
3.3. Flujo de H <sub>2</sub> O transpirado y WUE de los casos con 60 % de humedad relativa en el ambiente con viento paralelo con diferentes valores de velocidad de viento ( $u_a$ )	59

3.4. Eficacia de la capa de tricomas en cada uno de los casos estudiados, donde $HR_a$ la humedad relativa en el aire ambiente . . . . .	64
B.1. Valores medios horarios de la humedad relativa (HR) y la velocidad del viento (V) en Montaña (Zaragoza) a lo largo del año (Periodo 1995-2015). Estos datos han sido medidos a 2 m sobre el suelo (200 m sobre el nivel del mar) . . . . .	76
B.2. Valores numéricos de constantes, coeficientes y propiedades de las especies químicas $H_2O$ y $CO_2$ . . . . .	77
B.3. Datos experimentales del flujo de $CO_2$ y $H_2O$ (por unidad de superficie de hoja) intercambiados a través de los estomas en las hojas de <i>Quercus ilex</i> . Proporcionados por la Unidad de Recursos Forestales del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria del Gobierno de Aragón (CITA) . . . . .	77
B.4. Tipo de capa límite (en caso de existir) en función de la velocidad del viento, considerando una longitud de hoja de 6 cm y la viscosidad del aire seco a 25°C . . . . .	77
B.5. Datos usados para calcular los perfiles de velocidades y fracciones máscas de las configuraciones con y sin tricomas para los casos con viento paralelo a la superficie de la hoja . . . . .	78

# Nomenclatura

---

Símbolo	Descripción	Unidades
$\delta_x$	Espesor de la capa límite viscosa	m
$\lambda$	Recorrido libre medio del aire	m
$\nu$	Viscosidad cinemática del aire	$m^2 s^{-1}$
$\rho$	Densidad del aire	$kg m^{-3}$
$\vec{\tau}'$	Tensor de esfuerzos viscosos	$N m^{-2}$
$\phi''_{CO_2}$	Flujo másico de $CO_2$	$kg m^{-2} s^{-1}$
$\phi''_{H_2O}$	Flujo másico de $H_2O$	$kg m^{-2} s^{-1}$
$D$	Coeficiente de difusión másica	$m^2 s^{-1}$
$D_{CO_2}$	Coeficiente de difusión másica del $CO_2$	$m^2 s^{-1}$
$D_{H_2O}$	Coeficiente de difusión másica del $H_2O$	$m^2 s^{-1}$
$E$	Eficacia de la capa de tricomas	%
$\vec{f}_m$	Fuerzas másicas	$N kg^{-1}$
$HR$	Humedad relativa	%
$HR_a$	Humedad relativa en el aire ambiente	%
$Kn$	Número de Knudsen	—
$L$	Longitud característica genérica	m
$p$	Presión estática	Pa
$Pe$	Número de Péclet	—
$Pe_{CO_2}$	Número de Péclet del $CO_2$	—
$Pe_{H_2O}$	Número de Péclet del $H_2O$	—

Símbolo	Descripción	Unidades
Re	Número de Reynolds	—
$S_i$	Tasa de creación/destrucción de la especie $i$ por reacción química	$\text{kg}_i \text{ m}^{-3} \text{ s}^{-1}$
Sc	Número de Schmidt	—
$\text{Sc}_{\text{CO}_2}$	Número de Schmidt del $\text{CO}_2$	—
$\text{Sc}_{\text{H}_2\text{O}}$	Número de Schmidt del $\text{H}_2\text{O}$	—
$u$	Componente longitudinal de la velocidad local	$\text{m s}^{-1}$
$u_a$	Velocidad del aire (viento perpendicular) o del viento (viento paralelo)	$\text{m s}^{-1}$
$u_t$	Componente longitudinal del aire en la cara $\text{top}$	$\text{m s}^{-1}$
$u_h$	Componente longitudinal del aire en la superficie de la hoja	$\text{m s}^{-1}$
$V$	Velocidad del viento	$\text{m s}^{-1}$
$v$	Componente transversal de la velocidad local	$\text{m s}^{-1}$
$\vec{v}$	Velocidad local del viento	$\text{m s}^{-1}$
$WUE$	Eficiencia en el uso del agua	$\text{g}_{\text{CO}_2} \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$
$WUE_c$	Eficiencia en el uso del agua con tricomas	$\text{g}_{\text{CO}_2} \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$
$WUE_s$	Eficiencia en el uso del agua sin tricomas	$\text{g}_{\text{CO}_2} \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}^{-1}$
$Y_{\text{CO}_2}$	Fracción másica local de $\text{CO}_2$	$\text{kg}_{\text{CO}_2} \text{ kg}_{\text{aire}}^{-1}$
$Y_{\text{H}_2\text{O}}$	Fracción másica local de $\text{H}_2\text{O}$	$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ kg}_{\text{aire}}^{-1}$
$Y_{a,\text{CO}_2}$	Fracción másica de $\text{CO}_2$ en el aire ambiente	$\text{kg}_{\text{CO}_2} \text{ kg}_{\text{aire}}^{-1}$
$Y_{a,\text{H}_2\text{O}}$	Fracción másica de $\text{H}_2\text{O}$ en el aire ambiente	$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ kg}_{\text{aire}}^{-1}$
$Y_{e,\text{CO}_2}$	Fracción másica de $\text{CO}_2$ en el estoma	$\text{kg}_{\text{CO}_2} \text{ kg}_{\text{aire}}^{-1}$
$Y_{e,\text{H}_2\text{O}}$	Fracción másica de $\text{H}_2\text{O}$ en el estoma	$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ kg}_{\text{aire}}^{-1}$
$Y_{h,\text{CO}_2}$	Fracción másica de $\text{CO}_2$ en la superficie de la hoja	$\text{kg}_{\text{CO}_2} \text{ kg}_{\text{aire}}^{-1}$
$Y_{h,\text{H}_2\text{O}}$	Fracción másica de $\text{H}_2\text{O}$ en la superficie de la hoja	$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ kg}_{\text{aire}}^{-1}$
$Y_{t,\text{CO}_2}$	Fracción másica de $\text{CO}_2$ en la cara $\text{top}$	$\text{kg}_{\text{CO}_2} \text{ kg}_{\text{aire}}^{-1}$
$Y_{t,\text{H}_2\text{O}}$	Fracción másica de $\text{H}_2\text{O}$ en la cara $\text{top}$	$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ kg}_{\text{aire}}^{-1}$

---

## CAPÍTULO 1

# El problema y los objetivos

---

## 1.1 La fisiología de la planta, y su análisis

---

### 1.1.1 El intercambio de gases entre las hojas y la atmósfera

La fotosíntesis es el proceso fundamental que permite la vida de las plantas autótrofas. La radiación solar es la fuente de energía necesaria para que se produzca la fotosíntesis, por lo que en condiciones naturales la fotosíntesis en las plantas sólo se produce durante el día. Mediante la fotosíntesis las plantas son capaces de sintetizar compuestos carbonados utilizando como fuente de carbono el gas CO<sub>2</sub> de la atmósfera circundante (Taiz y Zeiger, 1991). La fotosíntesis se realiza en los cloroplastos, que de forma mayoritaria se encuentran en las hojas de las plantas.

Las hojas de las plantas tienen una estructura plana que favorece la penetración de la radiación solar hasta los cloroplastos. Las hojas están recubiertas casi en su totalidad por la cutícula que impide el intercambio de gases entre la hoja y la atmósfera. Sin embargo, las hojas de las plantas presentan unos orificios, llamados estomas, que ocupan entre un 0,2% y un 2% de su superficie dependiendo de las especies (Nobel, 2005), y que permiten que el CO<sub>2</sub> entre desde la atmósfera al interior de la hoja para que pueda ser absorbido en los cloroplastos.

Los estomas de las hojas no solo permiten la entrada de CO<sub>2</sub> para la fotosíntesis sino que también intercambian otros dos gases entre la hoja y la atmósfera: H<sub>2</sub>O y O<sub>2</sub>.

La concentración del gas H<sub>2</sub>O en la atmósfera circundante a las hojas de la planta varía de forma importante a lo largo del día, y en las condiciones de clima mediterráneo la variación también se produce a lo largo del año (Cuadro B.1). Sin embargo, en el interior de la hoja su concentración es tal que si se mide como humedad relativa, está generalmente cerca de la saturación (Nobel, 2005; Taiz y Zeiger, 1991). El gradiente de concentración entre el interior de

la hoja y el exterior genera un flujo de H<sub>2</sub>O hacia el exterior cuando los estomas están abiertos. Este flujo se denomina transpiración y es tanto mayor cuanto mayor es el gradiente, por lo que en condiciones mediterráneas el flujo es mayor entre las 12 y las 20 horas y en los meses de primavera y verano. Durante la noche la humedad relativa del ambiente es generalmente cercana a la saturación, por lo que apenas existe flujo de H<sub>2</sub>O desde el interior de la hoja al exterior.

La apertura de los estomas puede ser regulada por la planta, de forma que cuando la planta dispone de poco agua puede provocar un cerrado parcial o total de los estomas. Este cierre estomático supone una mayor resistencia al flujo de H<sub>2</sub>O desde la hoja al exterior y por lo tanto disminuye la transpiración (Jarvis y col., 1986). Como contrapartida, este cierre estomático también supone una mayor resistencia al flujo de CO<sub>2</sub> desde la atmósfera al interior de la hoja, disminuyendo el mismo y por lo tanto la fotosíntesis.

Cuando la planta realiza la fotosíntesis se genera O<sub>2</sub> como subproducto. Como consecuencia, la concentración de O<sub>2</sub> en el interior de la hoja es superior a la del aire exterior (21 %) durante el día, de forma que se produce un flujo de O<sub>2</sub> desde el interior de la hoja hacia el exterior (Canvin y col., 1980).

Además de la fotosíntesis, otro proceso fundamental para la vida de las plantas es la respiración celular, en la que a partir de compuestos carbonados, previamente sintetizados, la planta obtiene energía para su mantenimiento y para la elaboración de nuevos compuestos (Taiz y Zeiger, 1991). Esta respiración utiliza O<sub>2</sub> como reactivo y supone la producción de CO<sub>2</sub> como subproducto.

En general, durante el día la fotosíntesis absorbe más CO<sub>2</sub> que el que se genera por la respiración, de forma que la concentración de CO<sub>2</sub> en el interior de la hoja es de alrededor de 250 ppm de CO<sub>2</sub> en plantas C3 (el primer compuesto de fijación de CO<sub>2</sub> tiene tres átomos de carbono), frente a valores de 400 ppm de CO<sub>2</sub> en la atmósfera exterior, existiendo un flujo hacia el interior de la hoja (Taiz y Zeiger, 1991). Sin embargo, durante la noche, al no existir fotosíntesis pero sí respiración, la concentración de CO<sub>2</sub> es mayor en el interior de la hoja que en el aire exterior, por lo que se produce un flujo hacia el exterior de la hoja.

Durante el día la fotosíntesis produce más O<sub>2</sub> que el que se utiliza en la respiración, de forma que la concentración de O<sub>2</sub> en el interior de la hoja es mayor, existiendo un flujo hacia fuera de la hoja (Taiz y Zeiger, 1991). Sin embargo, durante la noche, al no existir fotosíntesis pero sí respiración, la concentración de O<sub>2</sub> es menor en el interior de la hoja que en el aire exterior, por lo que se produce un flujo hacia el interior de la hoja.

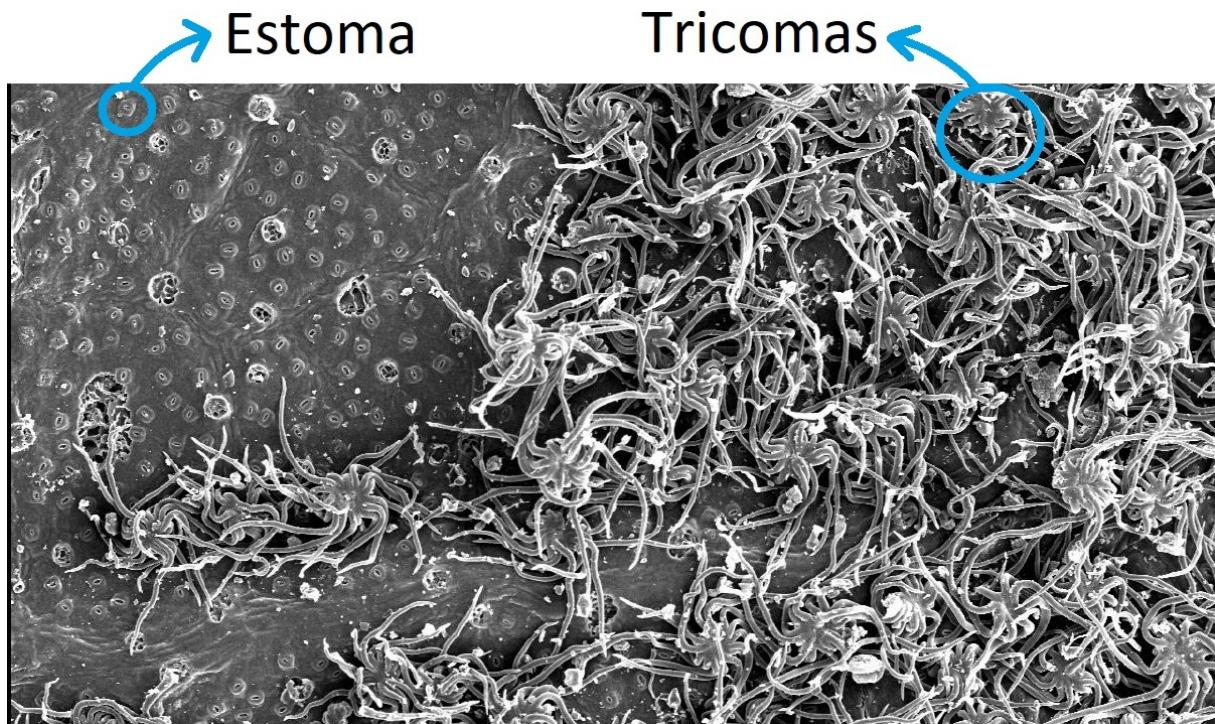


Figura 1.1: Envés de una hoja de encina parcialmente depilada. Proporcionada por la Unidad de Recursos Forestales del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón

### 1.1.2 La eficiencia en el uso del agua y su relación con los tricomas

La mayor parte de las plantas pertenecen a los denominados tipos fotosintéticos C3 y C4 (el primer compuesto de fijación de CO<sub>2</sub> tiene cuatro átomos de carbono), que realizan la fotosíntesis durante el día. Debido a que el contenido en H<sub>2</sub>O gaseoso de la atmósfera circundante a las hojas es menor que en el interior de las mismas, a la par que entra CO<sub>2</sub> en la hoja sale H<sub>2</sub>O.

Se denomina *eficiencia en el uso del agua* (*water-use efficiency, WUE*) a la cantidad de CO<sub>2</sub> absorbido por unidad de H<sub>2</sub>O perdida (transpirada). Es un parámetro de gran importancia para caracterizar las plantas en ambientes áridos o semiáridos, como los de climas mediterráneos.

Los tricomas de las hojas son unas estructuras uni o pluricelulares que pueden recubrir tanto la superficie superior de las hojas (haz) como la superficie inferior de las hojas (envés) (Figura 1.1). Se considera que los tricomas ejercen diversas funciones en las plantas. Una de sus funciones es repeler el ataque de herbívoros, bien por dificultar su acceso a las células del interior de la hoja o bien por contener sustancias que actúan como repelentes (Agrawal y col., 2009; Johnson, 1975; Wagner, 1991).

Diversos trabajos han puesto de manifiesto que las plantas mejor adaptadas a ambientes con

escasez de agua presentan mayores densidades de tricomas (Sandquist y Ehleringer, 2003; Bachelar y col., 2004; Ning y col., 2016) y que el estrés hídrico puede inducir a una mayor densidad de tricomas en las hojas (Ennajeh y col., 2010; Fu y col., 2013).

Desde el punto de vista de la eficiencia del agua se considera que los tricomas pueden influir a través de dos mecanismos distintos. Algunos trabajos han demostrado que la presencia de tricomas en la superficie de la hoja refleja parte de la radiación solar que llega a la superficie de la hoja (Baldini y col., 1997; Karabourniotis y Bornman, 1999; Morales y col., 2002), lo cual disminuye el calentamiento de la misma (Ehleringer y Björkman, 1978; Skelton y col., 2012) y reduce la transpiración (Ehleringer y Mooney, 1978), lo que puede aumentar su eficiencia en el uso del agua. Por otra parte, la presencia de tricomas en la superficie de las hojas puede modificar el espesor de la capa límite y aumentar la resistencia al flujo de  $H_2O$ , reduciendo la transpiración (Baldini y col., 1997; Choinsky y Wise, 1999; Schreuder y col., 2001; Kenzo y col., 2008), si bien otros autores han indicado que los tricomas no afectaron a la resistencia al flujo de  $H_2O$  (Liakopoulos y col., 2006).

El efecto que esto tenga sobre la eficiencia en el uso del agua por parte de la planta, dependerá también de su efecto sobre el flujo de  $CO_2$ . Así, Ichie y col. (2016) observaron que las plantas con mayores densidades de tricomas eran más eficientes en el uso del agua y Kenzo y col. (2008) que las hojas con tricomas fueron más eficientes en el uso del agua que las hojas depiladas (sin tricomas).

Dado que la presencia de tricomas afecta tanto a la reflectancia de la radiación solar como a la difusión del  $H_2O$  su efecto sobre la eficiencia en el uso del agua es difícil de predecir y puede depender de cada especie y de las condiciones en que crece. Skelton y col. (2012) determinaron que en varias Proteaceas la presencia de tricomas contribuyó en menos del 5 % de la resistencia total de la hoja a la difusión de  $H_2O$ , de forma que la transpiración de las hojas con tricomas fue similar al de las hojas sin tricomas, si bien las hojas con tricomas presentaban una mayor densidad de estomas. Sin embargo, la presencia de tricomas incrementó la reflectancia de la radiación solar en un 19 %.

En la reciente revisión sobre la ecofisiología de los tricomas realizada por Bickford (2016), este autor señala que además de su conocido efecto de reducción de la absorción de la radiación solar, los tricomas tienen un papel mayor en la interacción de las plantas con el medioambiente. Los tricomas cuando son densos modulan el balance de calor de la hoja y la intercepción de energía lumínica y consecuentemente afectan al intercambio de gases. También indica que pocos estudios han observado un efecto importante de los tricomas sobre la capa límite de la superficie de la hoja y sobre la transpiración, pero que estudios recientes indican que pueden jugar un papel importante en las relaciones hídricas de las hojas ya que afectan a la mojabilidad

de las hojas, a la retención de las gotas y a la absorción de agua. Según este autor, distintas líneas de evidencia indican que los tricomas del haz y del envés de las hojas pueden ejercer funciones distintas, incluso en una misma hoja.

### **1.1.3 El uso de modelos para estudiar el intercambio de gases entre las hojas y la atmósfera**

La medida experimental del intercambio de gases entre las hojas de las plantas y la atmósfera se realiza habitualmente mediante aparatos que analizan la variación de la concentración de los gases por infrarrojos. Generalmente la medida implica que la hoja queda encerrada total o parcialmente en una pequeña cámara (Driscoll y col., 2006), lo cual altera las condiciones naturales de la atmósfera que rodea a la hoja en cuanto a la concentración de los gases de estudio (particularmente del H<sub>2</sub>O) y a la velocidad del viento. Esto afecta al intercambio de gases desde una superficie plana como las hojas de las plantas.

En los últimos años se han empezado a utilizar microelectrodos para la medida del flujo en pequeñas áreas de las hojas tales como un solo estoma (Mancuso y col., 2000; Zhu y col. 2008). Esta técnica es muy prometedora, pero su uso se ha limitado al laboratorio.

También existen cámaras que pueden englobar plantas enteras o grupos de plantas en condiciones de campo, si bien para poder realizar las medidas es preciso cerrar las cámaras por un tiempo breve (<1 minuto) en el que se mide la variación en la concentración de los gases (Steduto y col., 2002). Evidentemente, las cámaras modifican las condiciones ambientales (particularmente la velocidad del viento) respecto de las naturales.

En las últimas décadas, el uso conjunto de métodos micrometeorológicos (covarianza de torbellinos, Bowen ratio) junto con analizadores de gases por infrarrojos en abierto ha permitido la medida del intercambio de gases entre las plantas y la atmósfera a nivel de parcelas (>1 hectárea) sin alterar las condiciones naturales en las que se encuentran las plantas (Asseng y Hsiao, 2000; Soegaard y col., 2003). Sin embargo, ni el uso de cámaras ni los métodos micrometeorológicos y analizadores de gases por infrarrojos permiten determinar cómo influyen las características de las hojas, como la presencia o no de tricomas, en el intercambio de gases.

Trabajos experimentales como el de Skelton y col. (2012) ponen de manifiesto la dificultad de determinar cuál es el efecto de la presencia de tricomas sobre el intercambio de gases entre las hojas y la atmósfera que las rodea. En algunos casos para hacer la comparación se ha recurrido a eliminar los tricomas de las hojas (Kenzo y col., 2008) y en otros se han hecho comparaciones entre hojas con o sin tricomas (Skelton y col., 2012), que generalmente van acompañados de

otras diferencias como la densidad y tamaño de los estomas (Skelton y col., 2012).

Schreuder y col. (2001) han modelizado la influencia de los tricomas en la capa límite y el intercambio de gases entre una hoja modelo (no real) y la atmósfera. Para ello utilizaron fórmulas teóricas y semiempíricas. Estos autores concluyeron que los tricomas juegan un papel importante en el grosor de la capa límite sobre las hojas y por lo tanto en el intercambio de gases. Indican que esta influencia es sobretodo importante en ambientes con vientos bajos, como la parte baja de los bosques.

El trabajo de Vesala y col. (1996) es pionero en el uso de métodos numéricos para el estudio del intercambio de CO<sub>2</sub> desde el exterior al interior de una hoja a través de un estoma, considerando las características anatómicas. Los modelos de Fluidodinámica Computacional son una herramienta que se ha utilizado en los últimos años para estudiar el intercambio de gases entre las hojas de las plantas y la atmósfera (Aalto y Juurola, 2002; Roth-Nebelsick, 2007; Defraeye y col., 2013; Roth-Nebelsick y col., 2013). A diferencia de otros modelos utilizados anteriormente (Defraeye y col., 2013), los modelos de fluidodinámica computacional permiten la simulación tridimensional del flujo de gases, lo cual puede ser muy importante para una correcta simulación cuando existen estructuras de carácter tridimensional como los estomas y los tricomas de las hojas de las plantas.

Aalto y Juurola (2002) construyeron un modelo numérico tridimensional para estudiar el transporte de CO<sub>2</sub> desde el exterior hasta el interior de una hoja de abedul. Para ello utilizaron el programa Gambit para construir un modelo tridimensional de la hoja. La simulación del transporte de CO<sub>2</sub> al interior de la hoja se simuló con el programa de CFD (Computational Fluid Dynamics) Fluent. Este trabajo es muy detallado en cuanto a las concentraciones de CO<sub>2</sub> en distintos lugares desde el aire ambiente hasta el interior de la hoja. El trabajo pone de manifiesto las ventajas de usar los programas CFD para analizar la influencia de aspectos anatómicos y fisiológicos de las hojas en el intercambio de CO<sub>2</sub>.

Roth-Nebelsick (2007) utilizó el software FIDAP de Fluidodinámica Computacional (CFD) para simular cómo la arquitectura del estoma afecta al intercambio de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. En otro trabajo utilizando el mismo software, Roth-Nebelsick y col. (2009) estudiaron el efecto de la encriptación de los estomas en el intercambio de H<sub>2</sub>O entre las hojas de *Banksia ilicifolia* y la atmósfera. En un trabajo posterior, Roth-Nebelsick y col. (2013) estudiaron con el mismo software FIDAP la relevancia de la presencia de cera en los estomas de *Quercus coccifera* en cuanto al intercambio de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> y también en cuanto a la eficiencia en el uso del agua.

Defraeye y col. (2014) utilizaron el software de CFD ANSYS Fluent 13 para determinar el efecto de la densidad de la superficie estomática y de la velocidad del viento paralelo a la hoja

en el intercambio de H<sub>2</sub>O de las hojas con el exterior y observaron una gran influencia de ambas variables. Estos autores han demostrado la importancia de realizar la simulación considerando la microescala de los estomas, e indican la importancia de considerar el microrelieve de la superficie de las hojas (determinado por la presencia de nerviaciones y tricomas), que no fue considerado en su estudio.

Todos estos trabajos han demostrado la gran capacidad de los modelos de Fluidodinámica Computacional para analizar la relevancia de la morfología de la superficie de las hojas en el intercambio de gases con el exterior, aportando información que no es posible obtener de forma experimental actualmente.

### 1.1.4 Características de las hojas de *Quercus ilex*

La encina o carrasca (*Quercus ilex* L.) es una de las especies arbóreas más importantes de zonas mediterráneas como la península Ibérica. Se adapta bien a condiciones semiáridas, pero desaparece en zonas áridas.

Las hojas de la encina (Figura A.1) se renuevan cada 2-4 años y suelen tener una longitud de 4-8 centímetros y una anchura de 1,2-2,5 centímetros (Karabourniotis y Fasseas, 1996). Los estomas se localizan únicamente en el envés de la hoja con densidades entre 300 y 500 mm<sup>-2</sup> (Paellotti y col., 2007; Deng y col., 2017). La presencia de tricomas varía a lo largo de su vida. Las hojas jóvenes presentan tricomas en el haz y en el envés. Conforme envejecen van perdiendo los tricomas del haz, de forma que las hojas adultas solo tienen tricomas en el envés (Llamas y col. 1995; Karabourniotis y Bornman, 1999; Morales y col., 2002; Fernández y col., 2014). Esto hace que las hojas tengan un color verde en el haz y grisáceo en el envés.

Los tricomas de las hojas de *Quercus ilex* son de tipo estrellado con 4 a 12 brazos con una longitud de unos 115 micrómetros y un diámetro de unos 6 micrómetros (Llamas y col. 1995; Fernández y col., 2014; Deng y col., 2017) (Figura 1.2). La densidad de tricomas es muy alta en las hojas adultas. Así, Paelotti y col (2007) indican densidades de 120 mm<sup>-2</sup>, pero Fernández y col. (2014) indican que la densidad es tan alta que es muy difícil determinar la densidad.

La alta densidad de tricomas en el envés de las hojas de la encina se ha relacionado con una función de protección frente a altas radiaciones solares (Liakoura y col., 1997; Karabourniotis y Bornman, 1999). Sin embargo, Fernández y col. (2014) señalan que el carácter hidrofóbico de los tricomas del envés de las hojas de la encina favorecen la absorción de CO<sub>2</sub> al impedir que las gotas de agua (de lluvia, rocío, niebla) formen una película sobre las hojas como se ha visto en otras especies (Brewer y Smith, 1994; Hanba y col., 2004; Urrego-Pereira y col., 2013)

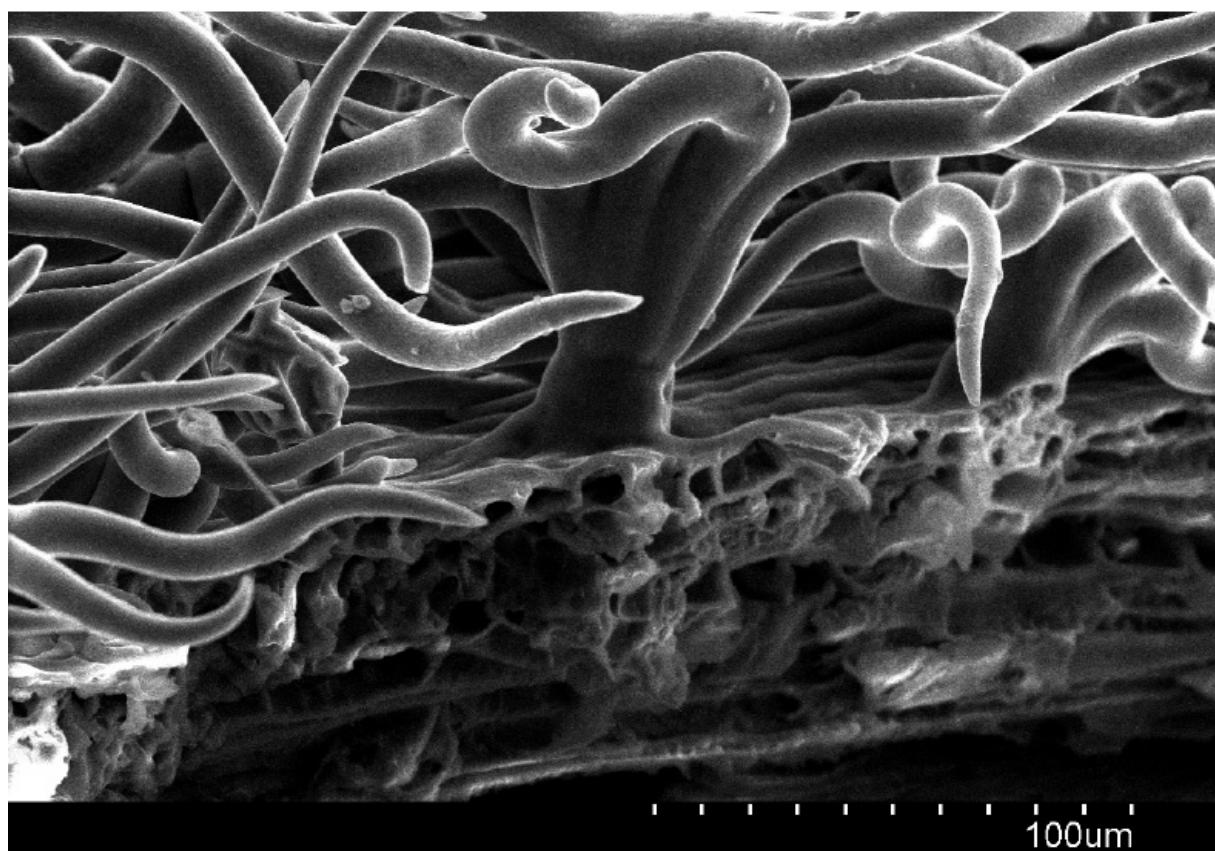


Figura 1.2: Fotografía microscópica de los tricomas de una hoja de encina. Proporcionada por la Unidad de Recursos Forestales del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón

## 1.2 Contexto en que se realiza el trabajo

---

Este trabajo se marca dentro de una colaboración informal entre el Grupo de Fluidodinámica Numérica de la Universidad de Zaragoza e investigadores de la Unidad de Recursos Forestales del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (Drs. Eustaquio Gil Pelegrin y Jose Javier Peguero Pina).

El Grupo de Fluidodinámica Numérica (GFN) es un grupo de investigación de la Universidad de Zaragoza que forma parte del Área de Mecánica de Fluidos, Dpto. de Ciencia y Tecnología de Materiales y del LIFTEC (Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión).

La principal actividad del GFN es la simulación numérica del flujo fluido, la transferencia de calor y de masa, y la reacción química. Dentro de las líneas de trabajo está el desarrollo y aplicación de modelos de simulación de flujo fluido.

El grupo de la Unidad de Recursos Forestales tiene como principal línea de trabajo la ecología forestal, habiendo realizado diversos trabajos con especies del género *Quercus* y sus relaciones hídricas.

### **1.3 Metodología y objetivos de este trabajo**

---

Diversos trabajos de investigación sugieren que la presencia de tricomas sobre las hojas de las plantas supone una mayor adaptación a condiciones de sequía debido a su posible influencia sobre el intercambio de vapor de agua y dióxido de carbono entre la superficie de las hojas y la atmósfera. La medida experimental del efecto de los tricomas sobre el intercambio de estos gases es muy difícil. El objetivo del trabajo es estudiar la influencia de los tricomas presentes en la superficie de las hojas de *Quercus ilex* sobre el intercambio de gases entre la hoja y el exterior, mediante el uso de Fluidodinámica Computacional.

Este trabajo se ha llevado a cabo a partir de dos configuraciones computacionales generadas en trabajos anteriores que han sido basadas en la anatomía de las hojas de *Quercus ilex*. Una de ellas presenta tricomas mientras que la otra carece de estos. El dominio de ambas configuraciones abarca desde la parte superior de la cavidad subestomática hasta una altura de 393 micrómetros sobre la superficie de la hoja. Debido al alto coste computacional que conlleva analizar la superficie de una hoja en su totalidad, se ha decidido que ambos modelos representen solo una pequeña porción de esta superficie. Se ha utilizado el software ANSYS Fluent de modelado numérico para estudiar el intercambio de vapor de agua y dióxido de carbono durante el día (cuando la planta realiza la fotosíntesis) y con los estomas completamente abiertos, bajo dos situaciones: cuando el viento va en dirección perpendicular a la hoja, y, cuando el viento es paralelo a esta.

---

## CAPÍTULO 2

# Modelado Computacional

---

En este capítulo se va a presentar la geometría y las dimensiones del dominio computacional (Sección 2.1), se va a estudiar la validez de la hipótesis del medio continuo en el problema (Sección 2.2) y, posteriormente, se describirán las ecuaciones que modelan el comportamiento del flujo de forma genérica (Sección 2.3).

Las hojas no siempre están alineadas con el flujo natural del aire. Por tanto, es importante determinar el efecto que tiene sobre el intercambio de gases la inclinación relativa de las hojas con respecto a la dirección del viento (Schuepp, 1993). Con objeto de observar este efecto se han estudiado dos situaciones: viento perpendicular a la hoja (Sección 2.4) y viento paralelo a la hoja (Sección 2.5).

Al final del capítulo se presentan las condiciones de contorno implantadas en cada caso estudiado (Sección 2.6). El tipo de condición de contorno varía en alguna de las caras del dominio según la orientación del viento respecto de la hoja. Los valores de las variables implantadas como condiciones de contorno cambian de un caso a otro para una misma orientación del viento.

## 2.1 Mallas y dominios

---

Para estudiar el efecto de los tricomas sobre el intercambio gaseoso mediante Fluidodinámica Computacional se han utilizado dos configuraciones: una con tricomas y otra sin tricomas. Éstas se pueden observar en la Figura 2.3 y en la Figura 2.4.

Debido a la alta complejidad técnica que conlleva analizar la superficie de una hoja en su totalidad, se ha decidido que ambas representen solo una pequeña porción de esta superficie (Figura 2.1). En el modelo computacional que se presenta en este capítulo este dominio es representativo de lo que ocurre en el centro de la hoja (Figura A.1).

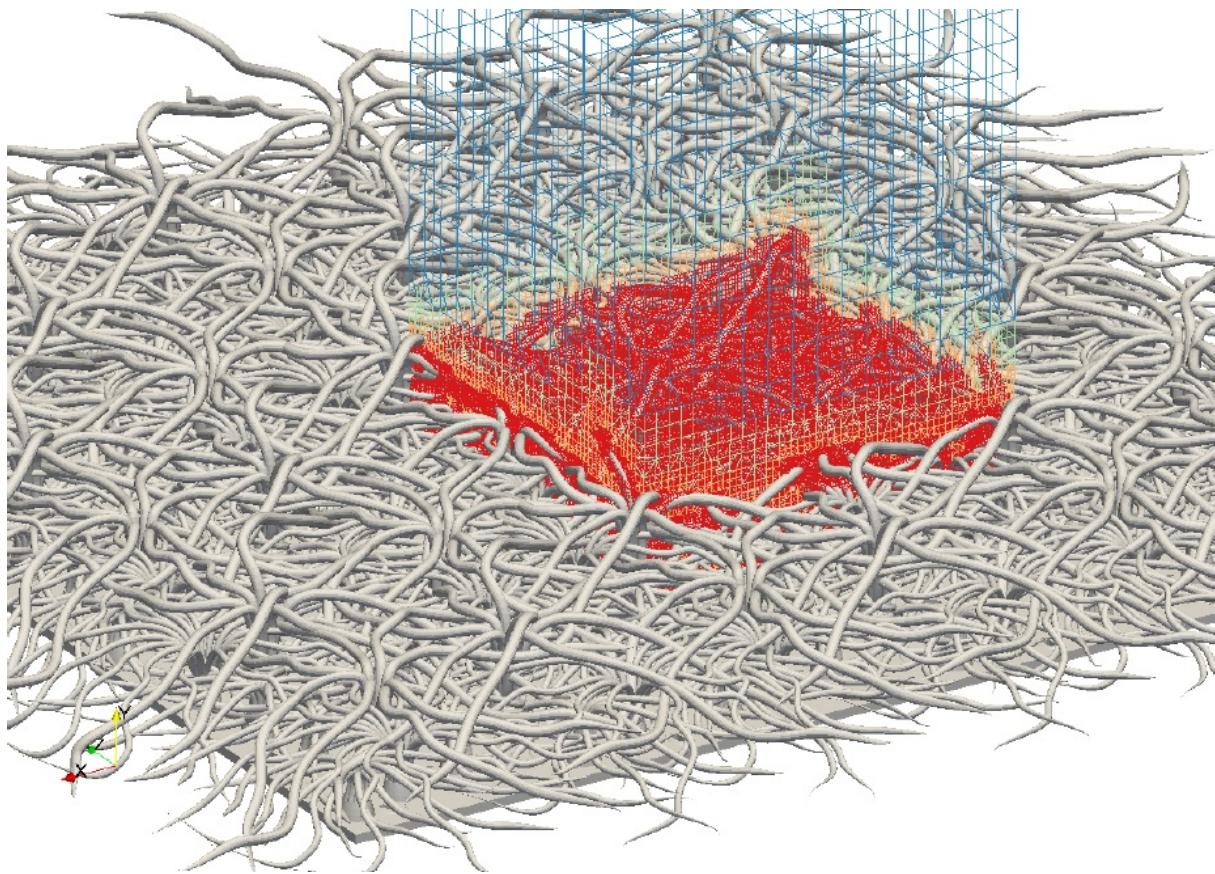


Figura 2.1: Representación del dominio y la malla con tricomas

La geometría se ha generado en el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón mediante un software de modelado de sólidos, a partir de fotografías de hojas reales. Las mallas se han generado a partir de esta geometría en trabajos anteriores en el Grupo de Fluidodinámica Numérica de la Universidad de Zaragoza, con el software snappyHexMex. En la Figura 2.2 se puede observar en detalle los estomas y tricomas. Los tricomas generados representan adecuadamente a los tricomas reales presentes en las hojas de encina presentados en la Figura 1.2 del capítulo anterior.

En el Cuadro 2.1 aparecen reflejadas las dimensiones y características del dominio computacional. La capa de tricomas se extiende hasta una altura de  $70 \mu\text{m}$  sobre la superficie de la hoja. Sin tener en cuenta la altura de los estomas, la altura del dominio es de  $393 \mu\text{m}$  sobre la superficie de la hoja (Figura 2.4), más de 5 veces mayor que la altura de la capa de tricomas.

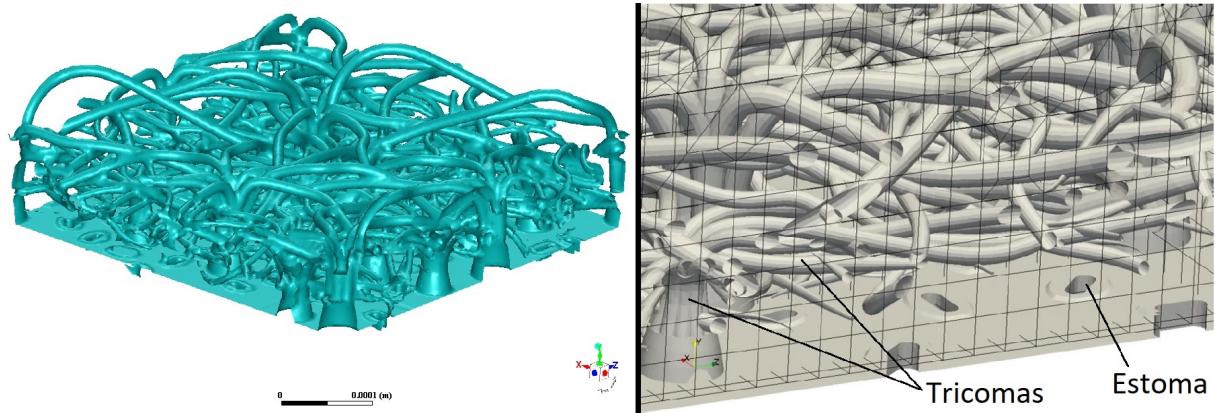
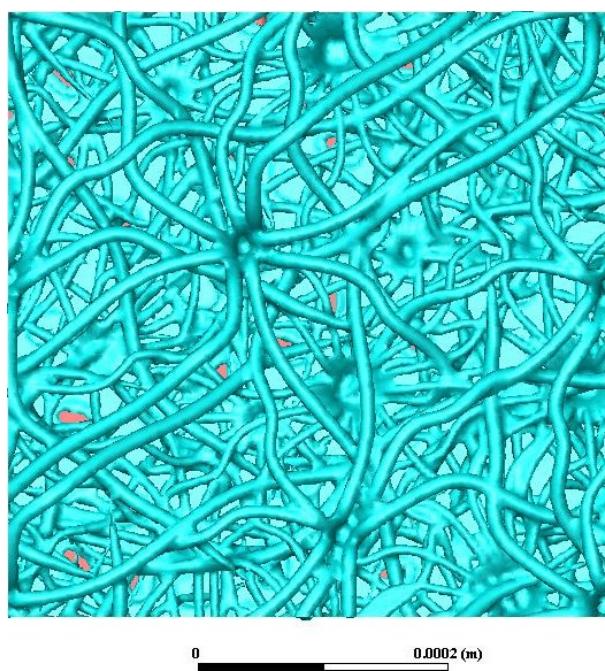


Figura 2.2: Capa de tricomas usada en el código de simulación (izda) y representación de los estomos y tricomas en detalle (dcha)

	Configuración con tricomas	Configuración sin tricomas
Longitud [ $\mu\text{m}$ ]	306	300
Anchura [ $\mu\text{m}$ ]	303	300
Altura [ $\mu\text{m}$ ]	400	396
Altura de la capa de tricomas [ $\mu\text{m}$ ]	70	-
Altura de las bases de tricomas [ $\mu\text{m}$ ]	20	-
Anchura de los estomas [ $\mu\text{m}$ ]	6	6
Profundidad de los estomas [ $\mu\text{m}$ ]	7	3
Superficie de estomas [ $\mu\text{m}^2$ ]	2.432	2.639
Superficie de la hoja [ $\mu\text{m}^2$ ]	92.185	90.072

Cuadro 2.1: Dimensiones y características del dominio computacional. La longitud es en dirección X, la anchura en dirección Z y la altura en dirección Y



(a) Configuración con tricomas



(b) Configuración sin tricomas

Figura 2.3: Vista superior de las configuraciones computacionales

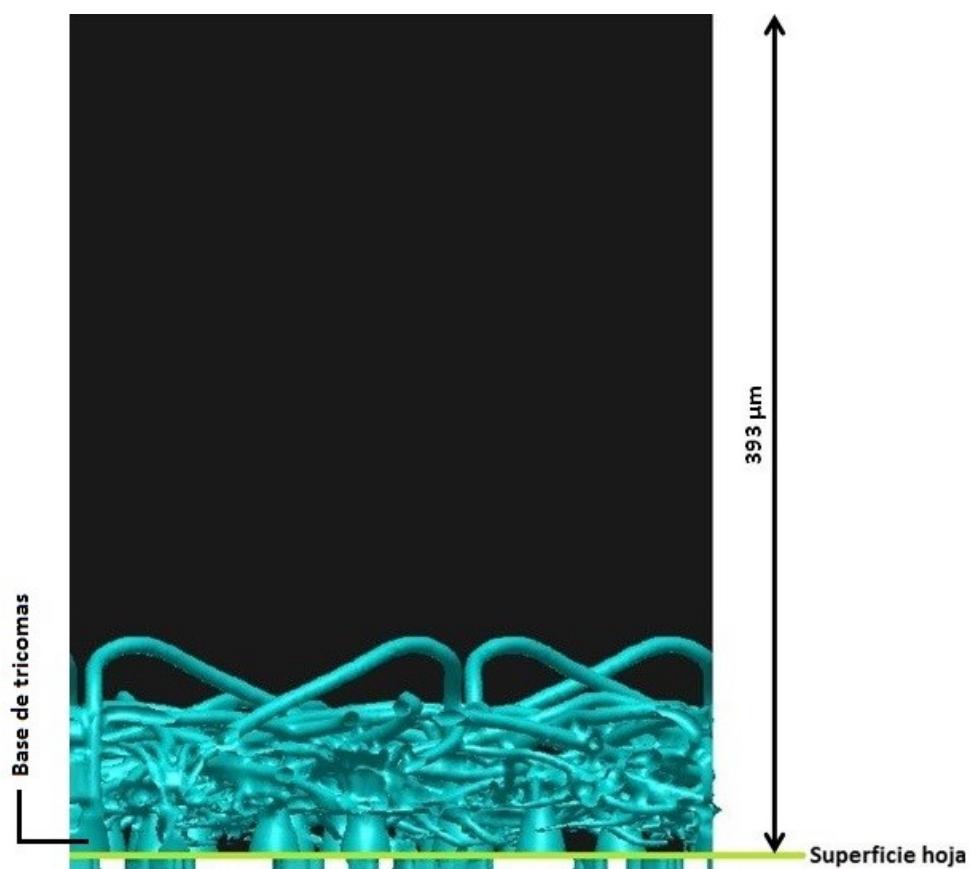


Figura 2.4: Vista lateral de la configuración con tricomas

## 2.2 Aplicabilidad de la hipótesis del medio continuo

El aire, como toda la materia, es de naturaleza marcadamente discontinua en la escala molecular. El fluido (y la materia en general) es esencialmente un gran vacío en el que la masa se concentra en pequeñas regiones de alta densidad muy separadas entre sí.

La Termodinámica considera únicamente estados en equilibrio. Sus conceptos y leyes son sólo aplicables por tanto en ausencia de inhomogeneidades espaciales y de variaciones temporales. Por el contrario, la Mecánica de Fluidos se ocupa del estudio de fluidos que pueden estar en movimiento, y pueden tener variaciones espaciales y temporales de sus propiedades. En consecuencia, los sistemas que se estudian en Mecánica de Fluidos no están en equilibrio.

La hipótesis del medio continuo permite describir el fluido como un continuo a lo largo del espacio que ocupa, ignorando por tanto su naturaleza molecular y las discontinuidades asociadas a esta. En otras palabras, con esta hipótesis se puede caracterizar el aire por sus propiedades locales, sin tener que especificar la posición y propiedades de cada molécula.

El criterio para determinar la validez de la hipótesis del medio continuo se basa en comparar el recorrido libre medio ( $\lambda$ ) de una molécula con la longitud macroscópica característica ( $L$ ) del sistema físico. Cuando  $\lambda$  es mucho menor que  $L$  las moléculas del fluido experimentarán muchas colisiones en el tiempo que recorren la longitud característica. Puesto que estas colisiones son las que originan el equilibrio termodinámico, puede suponerse que localmente existe equilibrio termodinámico, aunque globalmente no lo exista. En la situación opuesta, es decir, cuando  $\lambda$  es del orden de o mayor que  $L$ , no puede considerarse que exista equilibrio termodinámico, y por tanto la hipótesis del medio continuo deja de ser válida.

El ratio entre ambas longitudes se denomina **número de Knudsen** (Kn):

$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{L} \quad . \quad (2.1)$$

Cuando este número adimensional es mucho menor que la unidad, el fluido puede describirse como un continuo.

El recorrido libre medio del aire a 20°C, una atmósfera de presión y 50 % de humedad relativa, es de 0,06544 micrómetros (Jennings, 1988).

En el Cuadro 2.2 aparecen los números de Knudsen que se han calculado para varias longitudes macroscópicas características de este estudio. Se observa que para todas ellas el número de knudsen es mucho menor que la unidad. Por tanto, la hipótesis del medio continuo es válida en el problema.

Longitud macroscópica característica	L [ $\mu\text{m}$ ]	Kn
Anchura del estoma	6	0,0109
Distancia entre dos bases de tricomas	50	0,0013
Altura de la capa de tricomas	70	0,0009

Cuadro 2.2: Números de knudsen característicos del dominio

## 2.3 Modelo matemático

Para cualquier orientación del viento las ecuaciones que modelan de forma genérica el comportamiento del flujo son:

- **Ecuación de conservación de la masa (o de continuidad):**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad , \quad (2.2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire y  $\vec{v}$  es la velocidad local del viento.

- **Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) - \nabla \cdot (\vec{\tau}') = -\nabla p + \rho \vec{f}_m \quad , \quad (2.3)$$

donde  $p$  es la presión estática,  $\vec{\tau}'$  es el tensor de esfuerzos viscosos y  $\vec{f}_m$  las fuerzas másicas.

- **Ecuación de conservación de una especie química:**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) - \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) = S_i \quad , \quad (2.4)$$

donde  $Y_i$  es la fracción másica de la especie  $i$ ,  $D_i$  es el coeficiente de difusión másica de la especie  $i$  en la mezcla multicomponente de especies químicas (en este estudio la mezcla multicomponente consiste en aire + H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub>) y  $S_i$  es la tasa de creación o destrucción de la especie  $i$  por reacción química, que es cero en este trabajo.

## 2.4 Viento perpendicular a la hoja: números de Péclét

Cuando el viento es perpendicular a la superficie de la hoja el intercambio de gases entre la superficie de la hoja y la atmósfera se realiza por difusión y convección. Dependiendo de la velocidad del viento uno de los procesos puede ser dominante o los dos pueden ser del mismo orden de magnitud. Para conocer que fenómeno de transporte domina el intercambio de gases es necesario calcular el número de Péclét (Pe): un número adimensional que relaciona la velocidad de convección de un flujo con su velocidad de difusión. Para la transferencia de masa, el **número de Péclét** se define como:

$$Pe = \frac{LV}{D} , \quad (2.5)$$

donde  $L$  es la longitud característica (en este caso corresponde a la altura de la capa de tricomas),  $V$  es la velocidad del viento y  $D$  es el coeficiente de difusión mísica.

Cuando el número de Péclét es mucho menor que la unidad los fenómenos de difusión dominan el intercambio gaseoso. Si su valor es muy superior a la unidad la convección es el fenómeno que domina el intercambio, mientras que cuando éste es próximo a la unidad la difusión y la convección son semejantemente relevantes en el intercambio.

En el Cuadro 2.3 se observa que para la velocidad de viento de  $0,1 \text{ m s}^{-1}$  el transporte es mayormente difusivo aunque también es relevante el transporte convectivo. A velocidades de viento de  $1 \text{ m s}^{-1}$  los fenómenos convectivos, sin ser dominantes, adquieren más importancia que los fenómenos difusivos. Por tanto, a velocidades de viento comprendidas entre  $0,1$  y  $1 \text{ m s}^{-1}$  tanto la difusión como la convección son importantes.

$V [\text{m s}^{-1}]$	$Pe_{\text{CO}_2}$	$Pe_{\text{H}_2\text{O}}$	Flujo dominante
0,01	0,04	0,03	Difusivo
0,1	0,4	0,3	(Difusivo)
1	4	3	(Convectivo)
2	9	6	(Convectivo)
4	17	11	Convectivo

Cuadro 2.3: Fenómeno de transporte dominante en función de la velocidad del viento para  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Los paréntesis significan que el transporte se debe mayormente a ese fenómeno pero éste no llega a ser dominante

## 2.5 Viento paralelo a la hoja: capa límite

Cuando el viento es paralelo a la superficie de la hoja el intercambio de gases entre la superficie de la hoja y la atmósfera se realiza por difusión y convección en las **capas límite** que se forman.

En este estudio están presentes dos capas límite (planas y bidimensionales) simultáneamente: la viscosa (corresponde a la velocidad) y la másica (corresponde a la concentración de las especies). Sin embargo, éstas no siempre se forman aunque la velocidad sea paralela a la superficie.

Para determinar si existe capa límite se utiliza el **número de Reynolds** (Re):

$$Re = \frac{VL}{v} , \quad (2.6)$$

donde  $V$  es la velocidad del viento,  $L$  es la longitud característica a lo largo de la superficie y  $v$  es la viscosidad cinemática del aire. Para considerar que hay capa límite se exige que el número de Reynolds sea mayor que  $10^3$ . Por otra parte, la capa límite puede ser laminar ( $Re < 10^6$ , aproximadamente) o turbulenta ( $Re > 10^6$ , aproximadamente).

El Cuadro B.4 indica los números de Reynolds para diferentes velocidades considerando como longitud característica una longitud de hoja de 6 cm. Los números de Reynolds de este problema están comprendidos entre  $2 \cdot 10^3$  y  $2 \cdot 10^4$  (se han estudiado  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ ,  $1 \text{ m s}^{-1}$  y  $4 \text{ m s}^{-1}$  de velocidad de viento con esta orientación). Por tanto, en el rango de velocidades de viento de este estudio existe capa límite y es laminar.

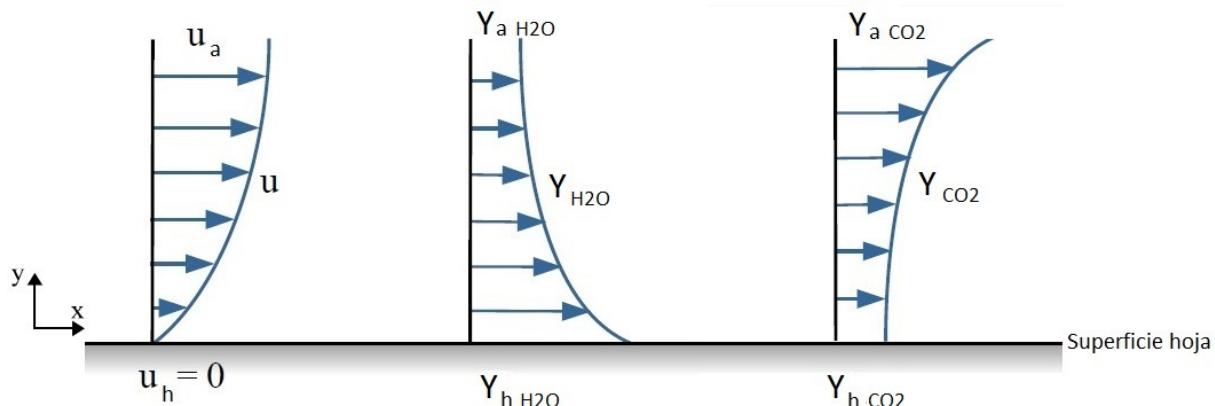


Figura 2.5: Perfil de velocidades (izda), perfil de fracciones másicas de  $\text{H}_2\text{O}$  (centro) y perfil de fracciones másicas de  $\text{CO}_2$  (dcha)

La existencia de las capas límite viscosa y másica conlleva la presencia de ciertos perfiles de

velocidades y fracciones másicas que hay que implementar como condición de contorno aguas arriba (Figura 2.5).

En este apartado se van a analizar teóricamente las dos capas límite. Es importante destacar que el modelo empleado es tridimensional, pues se resuelven geométricamente tanto los tricomas como los estomas. Por tanto, se resuelven las ecuaciones completas de Navier-Stokes. El estudio teórico de las capas límite en este apartado no sólo proporciona el contexto teórico: estas capas límite se usan como condiciones de contorno aguas arriba del dominio, como se verá en la Sección 2.6.

### 2.5.1 Capa límite viscosa

La capa límite viscosa (Figura 2.5) que se genera cerca de la superficie de la hoja viene dada por la solución de la ecuación de Blasius o solución de semejanza para capas límite laminares y planas en ausencia de gradientes de presión. Con ciertas manipulaciones se consigue transformar las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en una ecuación diferencial ordinaria, denominada **ecuación de Blasius**, mucho más fácil de resolver numéricamente que las originales.

La ecuación de continuidad para flujos bidimensionales y estacionarios, con densidad constante, es:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad , \quad (2.7)$$

donde  $u$  es la componente longitudinal de la velocidad,  $v$  es la componente transversal de la velocidad.

La ecuación de cantidad de movimiento que modela el comportamiento de flujos bidimensionales y estacionarios, con densidad constante, sin gradientes de presión y en ausencia de fuerzas másicas, viene dada por:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad , \quad (2.8)$$

donde  $v$  es la viscosidad cinemática del aire.

El método de Blasius utiliza la teoría de semejanza para convertir ambas en la ecuación diferencial ordinaria:

$$f''' + ff'' = 0 \quad , \quad (2.9)$$

donde  $f'''$  y  $f''$  son derivadas de  $f$ , y  $f$  es una función que depende de la variable independiente  $\eta$ , que a su vez viene dada por:

$$\eta = \sqrt{\frac{u_a}{2vx}} y \quad , \quad (2.10)$$

donde  $u_a$  es la velocidad de la corriente externa,  $y$  es la altura respecto de la superficie de la hoja y  $x$  es la posición a lo largo de la hoja.

La primera derivada de  $f$ ,  $f'$ , tiene un significado importante puesto que es el ratio entre la velocidad local ( $u$ ) y la velocidad de la corriente externa ( $u_a$ ):

$$f' = \frac{u}{u_a} \quad . \quad (2.11)$$

La Ecuación 2.9 se integra numéricamente en la Sección 2.5.3 mediante un código en Python para calcular el perfil de velocidades. Las condiciones de contorno para resolver esta ecuación son:

- En  $y = 0$ , las condiciones  $u = v = 0$  resultan en la siguiente condición para  $f$ :

$$\eta = 0, \quad f' = f = 0 \quad (2.12)$$

- En la corriente externa,  $y = \infty$ , la condición  $u = u_a$  da lugar a la siguiente condición para  $f$ :

$$\eta \rightarrow \infty, \quad f' \rightarrow 1 \quad (2.13)$$

## 2.5.2 Capa límite másica

La presencia de los estomas, con concentraciones de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O distintas a las ambientales predominantes en la corriente libre, causa la aparición de capas límite de concentración, semejantes a la de cantidad de movimiento.

La capa límite másica de las especies químicas H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> (Figura 2.5) que se genera cerca de la superficie de la hoja viene dada por una ecuación análoga a la ecuación de Blasius.

La ecuación de transporte que modela el comportamiento de las especies químicas para flujos bidimensionales y estacionarios, con densidad constante y en ausencia de reacciones químicas, es:

$$u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + v \frac{\partial Y_i}{\partial y} = D_i \frac{\partial^2 Y_i}{\partial y^2} ; \quad (2.14)$$

Con manipulaciones similares a las que se hacen en las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento de la capa límite viscosa se consigue transformar estas en una **extensión de la ecuación de Blasius** para especies químicas:

$$g'' + \text{Sc } f g' = 0 , \quad (2.15)$$

donde Sc es el número de Schmidt (que compara la viscosidad con la difusividad másica de la especie  $i$ ) y  $g$  es una fracción másica normalizada con sus valores en la pared y en la corriente libre, dada por:

$$g = \frac{Y_i - Y_{h,i}}{Y_{a,i} - Y_{h,i}} , \quad (2.16)$$

donde  $Y_i$  es la fracción másica de la especie  $i$  en un punto  $(x,y)$ ,  $Y_{h,i}$  es la fracción másica de la especie  $i$  en la superficie de la hoja e  $Y_{a,i}$  es la fracción másica de la especie  $i$  en el aire ambiente.

La Ecuación 2.15 se integra numéricamente en la Sección 2.5.3 mediante un código en Python para calcular los perfiles de fracciones másicas de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. Las condiciones de contorno para resolver esta ecuación son:

- En la superficie de la hoja ( $y = 0$ ):

$$\eta = 0, \quad g = 0 \quad (2.17)$$

- En la corriente externa ( $y = \infty$ ):

$$\eta = \infty, \quad g = 1 \quad (2.18)$$

### 2.5.3 Integración

La solución numérica (Cuadro 2.4, Cuadro 2.5 y Figura 2.6) se obtiene integrando numéricamente las Ecuaciones 2.9 (capa límite viscosa) y 2.15 (capa límite másica) para cada especie

$\eta$	$f'''(\eta)$	$f''(\eta)$	$f'(\eta)$	$f(\eta)$	$g''(\eta)$	$g'(\eta)$	$g(\eta)$
0,0	0,000000	0,469572	0,000000	0,000000	0,000000	0,396305	0,000000
0,1	-0,001102	0,469535	0,046956	0,002348	-0,000577	0,396286	0,039630
0,2	-0,004407	0,469277	0,093900	0,009391	-0,002307	0,396151	0,079253
0,3	-0,009899	0,468578	0,140797	0,021126	-0,005184	0,395786	0,118852
0,4	-0,017543	0,467220	0,187593	0,037547	-0,009197	0,395076	0,158399
0,5	-0,027267	0,464993	0,234212	0,058639	-0,014321	0,393909	0,197853
0,6	-0,038958	0,461693	0,280556	0,084380	-0,020517	0,392176	0,237162
0,7	-0,052450	0,457132	0,326509	0,114737	-0,027727	0,389772	0,276265
0,8	-0,067519	0,451139	0,371935	0,149664	-0,035873	0,386600	0,315091
0,9	-0,083880	0,443572	0,416684	0,189102	-0,044854	0,382570	0,353557
1,0	-0,101184	0,434318	0,460593	0,232973	-0,054543	0,377605	0,391574

Cuadro 2.4: Solución numérica de la ecuación de Blasius y su extensión para H<sub>2</sub>O

$\eta$	$f'''(\eta)$	$f''(\eta)$	$f'(\eta)$	$f(\eta)$	$g''(\eta)$	$g'(\eta)$	$g(\eta)$
0,0	0,000000	0,469572	0,000000	0,000000	0,000000	0,459479	0,000000
0,1	-0,001102	0,469535	0,046956	0,002348	-0,001014	0,459446	0,045947
0,2	-0,004407	0,469277	0,093900	0,009391	-0,004054	0,459209	0,091882
0,3	-0,009899	0,468578	0,140797	0,021126	-0,009107	0,458568	0,137775
0,4	-0,017543	0,467220	0,187593	0,037547	-0,016141	0,457322	0,183576
0,5	-0,027267	0,464993	0,234212	0,058639	-0,025095	0,455276	0,229213
0,6	-0,038958	0,461693	0,280556	0,084380	-0,035871	0,452242	0,274598
0,7	-0,052450	0,457132	0,326509	0,114737	-0,048323	0,448046	0,319623
0,8	-0,067519	0,451139	0,371935	0,149664	-0,062257	0,442528	0,364163
0,9	-0,083880	0,443572	0,416684	0,189102	-0,077422	0,435553	0,408080
1,0	-0,101184	0,434318	0,460593	0,232973	-0,093514	0,427013	0,451221

Cuadro 2.5: Solución numérica de la ecuación de Blasius y su extensión para CO<sub>2</sub>

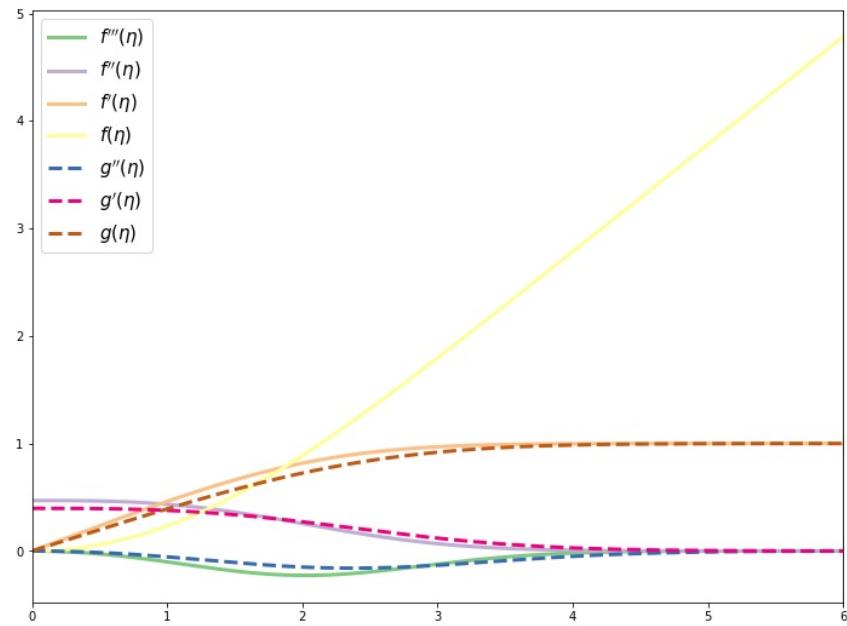
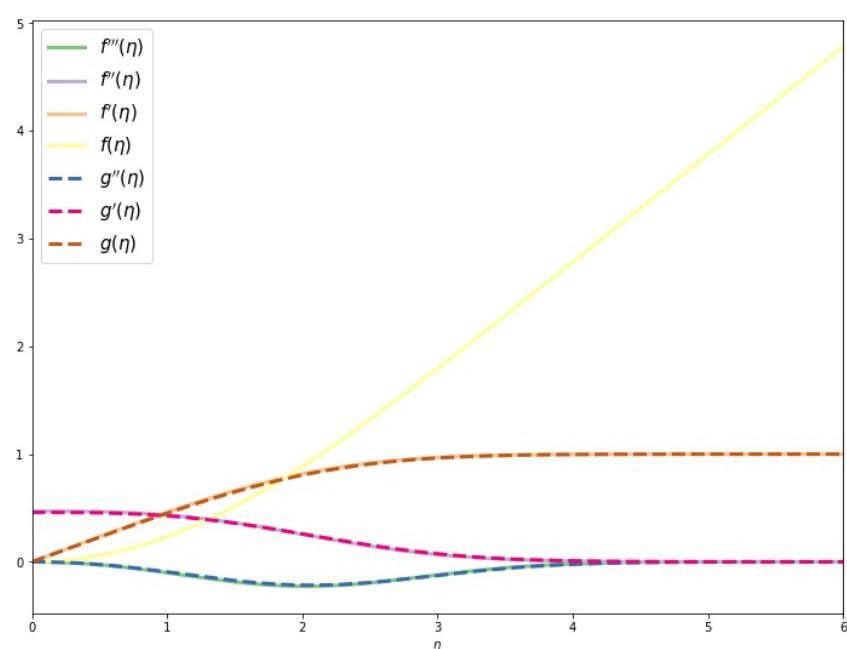
(a) H<sub>2</sub>O(b) CO<sub>2</sub>

Figura 2.6: Solución numérica de la ecuación de Blasius y su extensión para especies químicas

química ( $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$ ), utilizando un código en Python<sup>1</sup>. La ligera diferencia entre ambas soluciones se debe a que el número de Schmidt de cada especie es distinto.

Con los valores de  $f$  y  $g$ , y sus derivadas, es posible calcular todos los parámetros de interés: el espesor de capa límite y los perfiles de velocidades y fracciones másicas. El espesor de capa límite viscosa varía en función de la posición a lo largo de la hoja:

$$\delta_x = \frac{5}{\sqrt{\text{Re}_x}} x \quad , \quad (2.19)$$

donde  $\delta_x$  es el espesor de la capa límite viscosa y  $\text{Re}_x$  es el número de Reynolds local (basta con cambiar  $L$  por  $x$  en la Ecuación 2.6). La Ecuación 2.19 muestra cómo el espesor de capa límite aumenta conforme avanza el flujo a lo largo de la superficie de la hoja.

En la Figura 2.7 aparecen representados los espesores de capa límite calculados para las diferentes velocidades de viento estudiadas. La altura del dominio esta representada por la línea discontinua. En esta figura se observa que la capa límite es más ancha que el dominio en el rango de velocidades del problema. Este hecho será de gran relevancia en la aplicación de las condiciones de contorno.

---

<sup>1</sup>Este código no ha sido escrito por el presente autor.

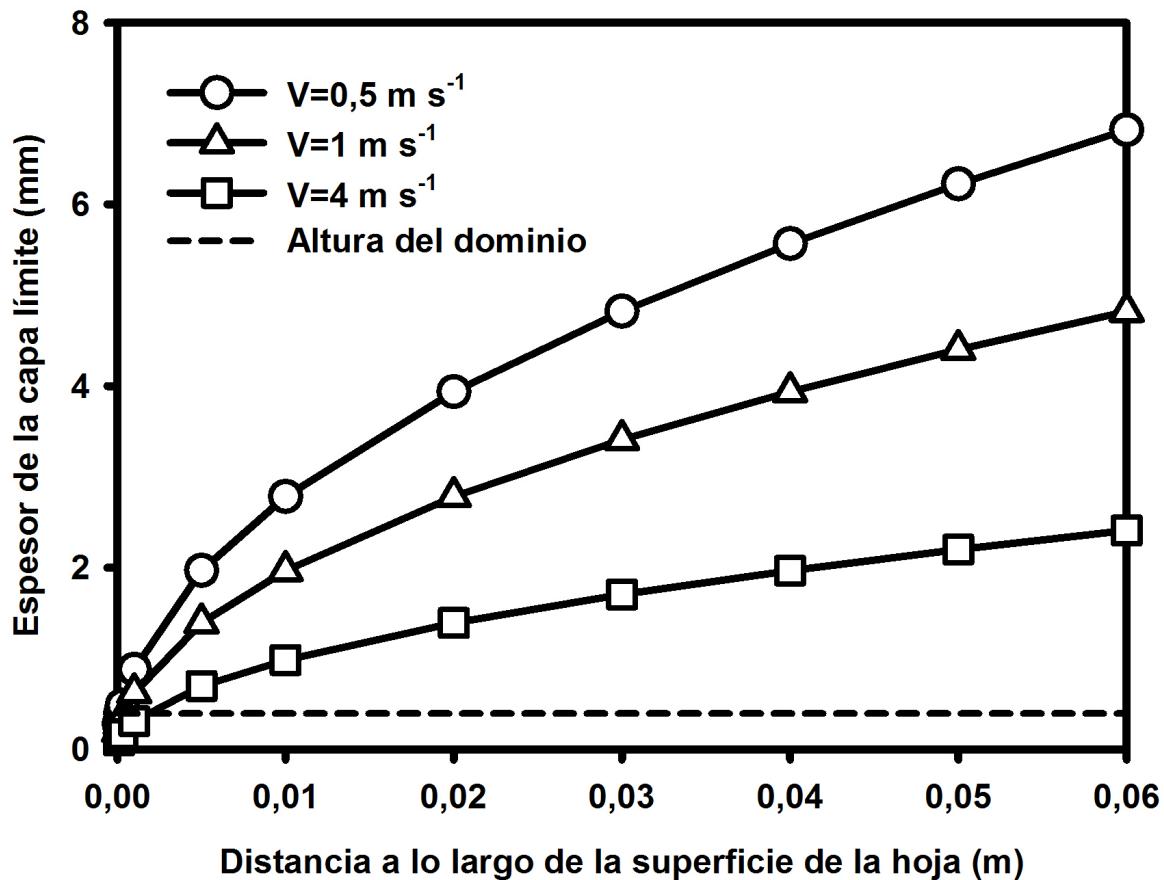


Figura 2.7: Espesor de la capa límite viscosa, bidimensional, laminar y plana, en función de la velocidad de la corriente externa

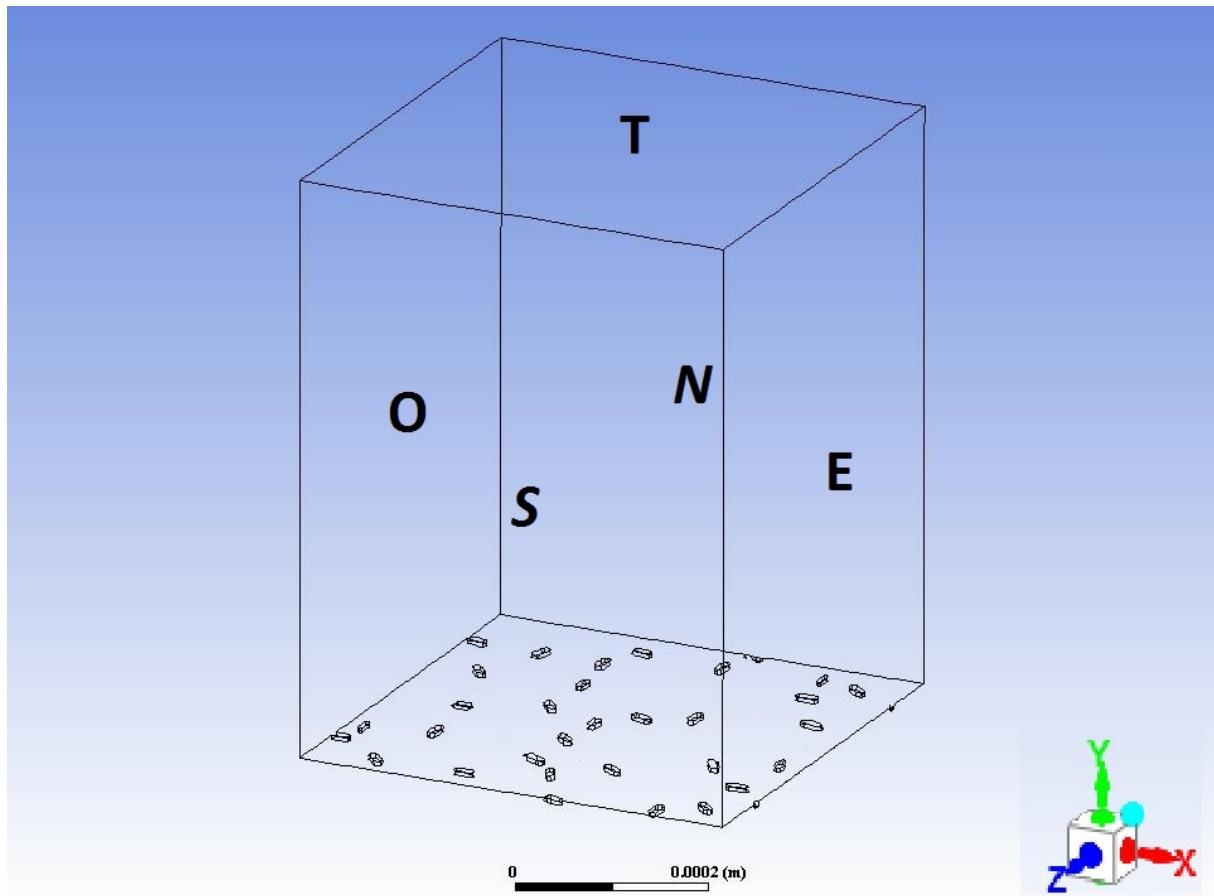


Figura 2.8: Representación de las caras que limitan el dominio.  $T$  es la cara top,  $N$  la cara norte,  $S$  la cara sur,  $E$  la cara este y  $O$  la cara oeste. La cara inferior corresponde a la superficie de la hoja, en la que se encuentran los estomas

## 2.6 Condiciones de contorno

Tanto en la configuración con tricomas como en la configuración sin tricomas el dominio está limitado por seis caras donde se implementan las condiciones de contorno necesarias para resolver el problema (Figura 2.8). En esta sección se van a especificar cómo son estas condiciones de contorno en las dos orientaciones de la hoja estudiadas.

Estas caras se denominan en esta memoria como sigue (ver Figura 2.8): top es la cara  $T$ , norte la cara  $N$ , sur la cara  $S$ , este la cara  $E$  y oeste la cara  $O$ .

Cara	Variable	Unidades	Valor
estomas:	$\phi''_{CO_2}$	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	15,71 (con tricomas) ó 15,86 (sin tricomas)
	$Y_{e,H_2O}$	$\text{kgH}_2\text{O kgaire}^{-1}$	0,02

Cuadro 2.6: Condiciones de contorno implementadas en los estomas de las configuraciones con y sin tricomas.  $\phi''_{CO_2}$  es el flujo de CO<sub>2</sub> que absorben los estomas e  $Y_{e,H_2O}$  es la fracción mísica de H<sub>2</sub>O en el estoma

### 2.6.1 Condiciones de contorno comunes a ambas situaciones

Las condiciones de contorno en las caras top, norte, sur, este y oeste dependen de cada situación (cuando el viento es perpendicular o cuando es paralelo). No obstante, existen condiciones de contorno comunes a ambas situaciones:

- La cara que corresponde a la superficie de la hoja se ha considerado como una pared sólida y por consiguiente solo se permite el intercambio gaseoso de especies químicas a través de los orificios (estomas) que hay en ella.
- Los estomas se han considerado como fuente de H<sub>2</sub>O y sumidero de CO<sub>2</sub> (Cuadro 2.6). Las condiciones de contorno de los estomas se implementan en la parte inferior de los orificios de la cara que corresponde a la superficie de la hoja. En los estomas:
  - Se ha fijado la concentración de H<sub>2</sub>O próxima a la saturación (99,3 % de humedad relativa) para simular las condiciones reales de la hoja (Nobel, 2005) y se ha dejado como incógnita el flujo de vapor de agua que pierde la hoja a través de sus estomas durante el intercambio gaseoso. Este flujo es uno de los resultados del modelo.
  - Se ha fijado un flujo de CO<sub>2</sub> entrante a la hoja a través del estoma (debido a la fotosíntesis) igual a la medida experimental de este (proporcionada por la Unidad de Recursos Forestales del CITA).
- Se ha considerado una presión de 1 atmósfera y una temperatura de 25°C en todo el dominio.

### 2.6.2 Casos con viento perpendicular

En esta situación se han estudiado dos casos (cada uno de ellos ha sido estudiado en las dos configuraciones), en los que se ha fijado un 60 % de humedad relativa en el aire ambiente. La

Cara	Variable	Unidades	Valor
top:	$Y_{t,H_2O}$	$\text{kgH}_2\text{O kgaire}^{-1}$	0,0116 (= 60 % HR)
	$Y_{t,CO_2}$	$\text{kgCO}_2 \text{kgaire}^{-1}$	0,00061 (= 400 ppm)
	$u_t$	$\text{m s}^{-1}$	1 ó 0,1 (dependiendo del caso)

Cuadro 2.7: Condiciones de contorno implementadas en la entrada de las configuraciones con y sin tricomas para los casos con viento perpendicular a la superficie de la hoja

diferencia entre uno y otro reside en la velocidad del viento:  $1 \text{ m s}^{-1}$  o  $0,1 \text{ m s}^{-1}$ .

Se han considerado como condiciones de contorno:

- La cara `top` como entrada del dominio. En ella se ha fijado la velocidad en dirección perpendicular a la superficie de la hoja, y la humedad relativa (o concentración de  $\text{H}_2\text{O}$ ) y la concentración de  $\text{CO}_2$  (400 ppm).

En esta situación es difícil saber si realmente las condiciones ambientales se presentan tan próximas a la superficie de la hoja. No obstante, esta incertidumbre no es relevante a la hora de comparar ambas configuraciones, pues se han impuesto las mismas condiciones en ambas.

- Las caras `norte`, `sur`, `este` y `oeste` se especifican como salidas de flujo, en las que se fija la presión.

En el Cuadro 2.7 aparecen reflejados los valores implementados como condiciones de contorno en la entrada para los casos con viento perpendicular a la superficie de la hoja.  $Y_{t,i}$  es la fracción másica de la especie  $i$  en `top` y  $u_t$  es la velocidad del fluido (aire con  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$ ) en `top`. Como se han fijado las mismas condiciones ambientales y la única diferencia entre los casos está en la velocidad del aire ambiente, los valores que aparecen en este cuadro son iguales para ambos.

### 2.6.3 Casos con viento paralelo

En esta situación se han estudiado cinco casos, cada uno de ellos con y sin tricomas. Los casos se diferencian en la velocidad del viento y/o en la humedad relativa del ambiente estudiadas, debido a que las condiciones ambientales varían a lo largo del día y del año (Tabla B.1).

### 2.6.3.1 Caras laterales y de salida

Cuando el viento es paralelo a la hoja, en la dirección oeste a este, la cara este se fija como salida. Las caras norte y sur son caras de simetría, y por lo tanto no requieren condiciones de contorno.

### 2.6.3.2 Cara de entrada, oeste

Las condiciones de contorno en la cara de entrada, oeste, presentan cierta complejidad.

Por una parte, puesto que en este trabajo se estudia una pequeña porción de la superficie en el centro de la hoja (Figura A.1), la presencia de las capas límite viscosa y másica impide imponer las condiciones de la corriente libre como condiciones de contorno en la entrada a nuestro dominio.

Por otro lado, la presencia de estomas aguas arriba a la entrada al dominio computacional modifican los perfiles de  $H_2O$  y  $CO_2$  en la cara de entrada, y es imposible conocerlos exactamente.

La estrategia adoptada para resolver este problema ha sido, resumidamente, la siguiente: suponer un perfil de especies a la entrada del dominio que daría como flujos hacia o desde la hoja los valores de flujo medidos y reportados por la Unidad de Recursos Forestales del CITA.

Matemáticamente, esto se implementa calculando una concentración de especie equivalente en la superficie de la hoja que daría, con la teoría de capa límite, el mismo flujo que se ha medido. Hay que recalcar que esta técnica se utiliza sólo para estimar el perfil de entrada en la cara oeste del dominio, y usarlo como condición de contorno. En el resto del dominio se resuelven las ecuaciones de transporte tridimensionales completas.

A partir de la solución numérica de la ecuación de Blasius y su extensión para especies químicas se puede obtener el perfil de  $f$  y el de  $g$ , y con ellos los de velocidades con la Ecuación 2.11 y los de fracciones másicas con la Ecuación 2.16. No obstante, para conocer el perfil de fracciones másicas ( $Y_i$ ) a partir del perfil de  $g$  (Ecuación 2.16) es necesario conocer la concentración en la superficie de la hoja ( $Y_{h,i}$ ).

Dado que no es posible medir la concentración justo en la superficie de la hoja, se ha optado por deducir su valor a partir de la concentración en el aire ambiente y del flujo de especie que intercambia la hoja a través de los estomas (que ha sido medido por la Unidad de Recursos Forestales del CITA). De esta forma, el flujo de especie química a través de la capa límite másica es debido a este gradiente de concentraciones entre la superficie de la hoja y el aire ambiente.

Para ello se tiene en cuenta que, usando la definición de  $g$ , Ecuación 2.16, la relación entre la

derivada de  $g$  y el flujo es:

$$\left. \frac{\partial g}{\partial y} \right|_{\eta=0} = \frac{1}{Y_{a,i} - Y_{h,i}} \left. \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{1}{Y_{a,i} - Y_{h,i}} \frac{\phi''_i}{\rho D_i} , \quad (2.20)$$

donde  $\phi''_i$  es el flujo másico (por unidad de superficie) de la especie  $i$ .

Por otro lado, con la teoría de capa límite másica se puede establecer el siguiente resultado (Bird y col., 2007):

$$\frac{1}{g'(\eta=0)} = I , \quad (2.21)$$

donde  $I$  es una constante adimensional dada por la doble integral:

$$I = \int_0^\infty e^{-Sc} \int_0^{\eta_1} f(\eta_2) d\eta_2 d\eta_1 . \quad (2.22)$$

Para calcular la derivada de  $g$ ,  $g'(\eta=0)$ , utilizamos la regla de la cadena:

$$g'(\eta)|_{\eta=0} = \left. \frac{\partial g}{\partial y} \right|_{\eta=0} \left. \frac{\partial y}{\partial \eta} \right|_{\eta=0} + \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{\eta=0} \left. \frac{\partial x}{\partial \eta} \right|_{\eta=0} \quad (2.23)$$

La primera derivada en el lado derecho,  $\partial g / \partial y$ , ya ha sido calculada (y relacionada con el flujo de especie) en la Ecuación 2.20. El resto de derivadas parciales de la Ecuación 2.23 se calculan de la siguiente manera:

$$\left. \frac{\partial y}{\partial \eta} \right|_{\eta=0} = \sqrt{\frac{vx}{u_a}} \Big|_{y=0} = \sqrt{\frac{vx}{u_a}} , \quad (2.24)$$

donde se ha utilizado la definición de  $\eta$  (Ecuación 2.10).

$$\left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{\eta=0} \sim 0 , \quad (2.25)$$

donde se ha considerado que los gradientes de concentración longitudinales son despreciables frente a los transversales.

Sustituyendo estos términos (Ecuaciones 2.20, 2.24 y 2.25) en la Ecuación 2.23, y ésta a su vez en la Ecuación 2.21, al despejar se obtiene como resultado la ecuación que relaciona los valores de concentración en la superficie de la hoja y en la corriente libre con el flujo resultante:

$$\frac{1}{Y_{a,i} - Y_{h,i}} \frac{\phi_i''}{\rho D_i} \sqrt{\frac{vx}{u_a}} = \frac{1}{I} . \quad (2.26)$$

Despejando  $Y_{h,i}$  se obtiene la fracción mísica de la especie  $i$  en la superficie de la hoja (Ecación 2.27) como función del flujo de especie, que es el resultado que buscábamos:

$$Y_{h,i} = Y_{a,i} - I \frac{\phi_i''}{\rho D_i} \sqrt{\frac{vx}{u_a}} . \quad (2.27)$$

El valor del flujo de CO<sub>2</sub> en la Ecación 2.27,  $\phi_{CO_2}''$ , es positivo y el valor del flujo de H<sub>2</sub>O en esta ecuación,  $\phi_{H_2O}''$ , es negativo. Por tanto, la concentración de CO<sub>2</sub> en la superficie de la hoja,  $Y_{h,CO_2}$ , es inferior a la del aire ambiente  $Y_{a,CO_2}$ . Por el contrario, la concentración de H<sub>2</sub>O en la superficie de la hoja,  $Y_{h,H_2O}$ , es mayor que la del aire ambiente  $Y_{a,H_2O}$ .

En la cara oeste, por tanto, los perfiles de fracción mísica van desde el valor correspondiente en la superficie de la hoja hasta el valor fijado en la cara top.

### 2.6.3.3 Cara superior, top

En la cara top se fija la velocidad en paralelo a la superficie de la hoja y las concentraciones de H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> en forma de fracción mísica. Puesto que el espesor de la capa límite es mayor que la altura del dominio computacional para las velocidades estudiadas (Figura 2.7), en la cara top no se pueden fijar las condiciones ambientales sino que hay que fijar los valores intermedios de velocidad y especies correspondientes a esa altura según la teoría de capa límite.

Según la teoría de capa límite los valores de velocidad y fracciones mísicas también varían en dirección longitudinal. Además, los flujos de H<sub>2</sub>O transpirado y CO<sub>2</sub> absorbido por los estomas podrían modificar más estos valores conforme avanza el flujo de aire en el dominio. Estos hechos generan un problema sobre qué valores deben fijarse en la cara top. Sin embargo, se ha observado que tanto la variación de la velocidad como la de las fracciones mísicas a lo largo de la longitud del dominio es muy pequeña en comparación con los gradientes de concentración transversales a la hoja. Por tanto, esta ligera incertidumbre presente en la cara top puede despreciarse en el estudio.

### 2.6.3.4 Desplazamiento de los perfiles transversales con tricomas, y perfiles implementados

Durante la realización del estudio se ha comprobado que, incluso cuando se especifica una velocidad alta a la entrada del dominio, la velocidad en la capa de tricomas se atenúa muy rápidamente hasta hacerse casi nula a una distancia despreciable (del orden de  $\mu\text{m}$ ) frente a la longitud de la hoja (Figura A.2).

A la vista de este hecho, en las configuraciones con tricomas se supone que la capa límite empieza a desarrollarse a partir de la capa de tricomas.

Esto genera un nuevo problema a la hora de implementar las condiciones de contorno en la cara oeste de la configuración con tricomas para cada caso: la velocidad es nula en la capa de tricomas, pero se desconoce el perfil de concentraciones en esta capa. Con el fin de minimizar el efecto de esta pequeña incertidumbre sobre el intercambio de gases se considera que las concentraciones de las especies  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{CO}_2$  en la entrada oeste al dominio en esa pequeña franja ( $70 \mu\text{m}$ ) sean constantes e iguales a las concentraciones en la superficie de la hoja que se han estimado utilizando los flujos de especies (Figura 2.9).

En el Cuadro 2.8 aparecen reflejados los valores implementados como condiciones de contorno en las entradas al dominio para cada caso (y cada configuración) con viento paralelo a la hoja.  $u$ ,  $Y_{\text{H}_2\text{O}}$  e  $Y_{\text{CO}_2}$  hacen referencia a los perfiles de velocidades y fracciones másicas, respectivamente. Para facilitar su introducción en el código, los perfiles se ajustan a una ecuación algebraica en función de la altura sobre la superficie de la hoja en la configuración sin tricomas, y en función de la altura sobre la superficie que forma la capa de tricomas en la configuración con tricomas.

Estas ecuaciones se han obtenido a partir de las Ecuaciones 2.11 y 2.16 aproximando las soluciones numéricas de Blasius y su extensión para especies químicas a una exponencial, y teniendo en cuenta las condiciones ambientales y las calculadas en la superficie de la hoja (o en la superficie formada por la capa de tricomas) con la Ecuación 2.27. Estas últimas condiciones se pueden consultar en el Cuadro B.5.

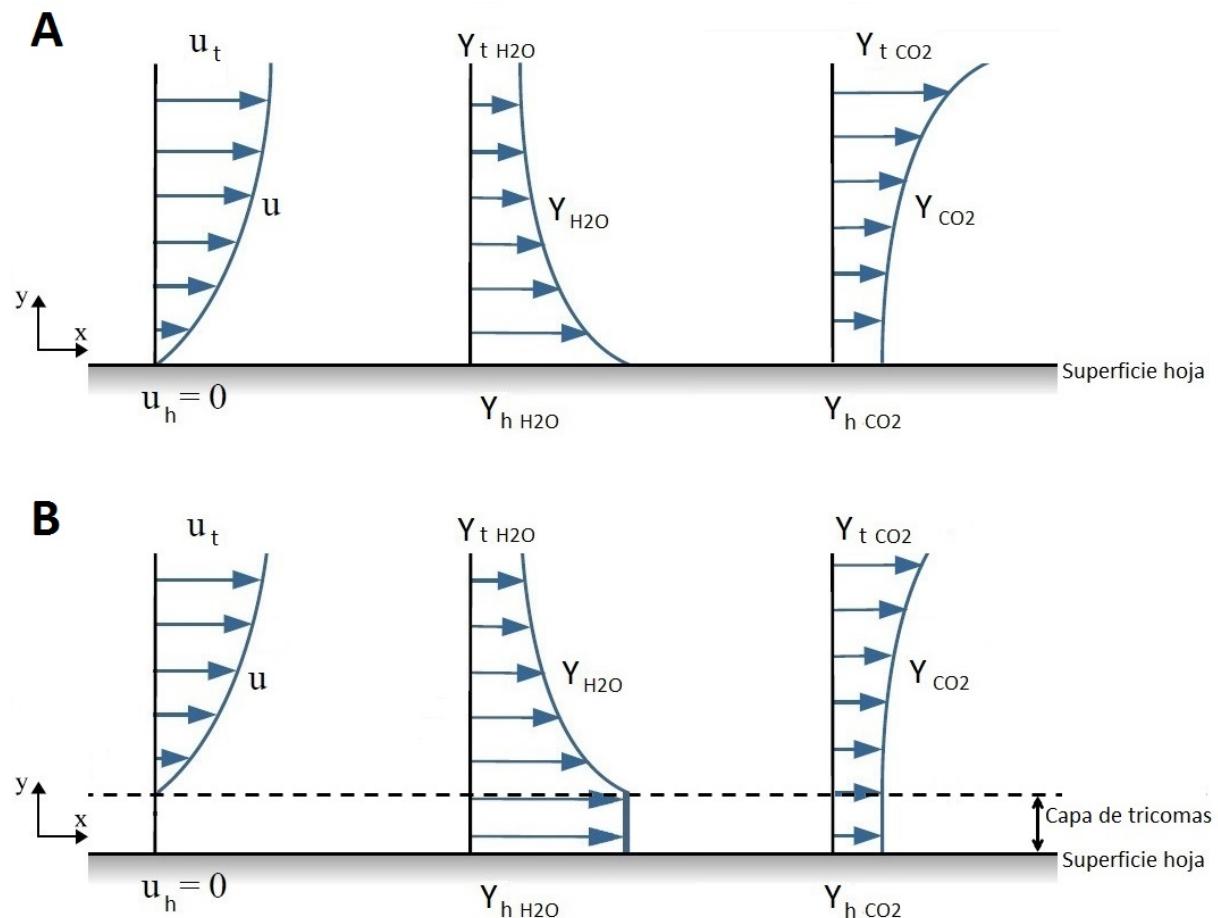


Figura 2.9: Representación esquemática de los perfiles de velocidades y fracciones másicas introducidos como condición de contorno en la Cara oeste de la configuración sin tricomas (A) y de la configuración con tricomas (B) para los casos estudiados con viento paralelo a la hoja

Caso	Cara	Variable	Unidades	Valor	
				Conf. con tricomas	Conf. sin tricomas
0,5 m s <sup>-1</sup> 60 % HR	top:	$Y_{t,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,01836	0,01821
		$Y_{t,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0005158	0,0005183
		$u_t$	m s <sup>-1</sup>	0,0556	0,0676
	oeste:	$Y_{H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	$Y_{a,H_2O} - (Y_{a,H_2O} - Y_{h,H_2O}) \cdot e^{(-8592000 \cdot y^3 - 43980 \cdot y^2 - 288,6 \cdot y)}$	
		$Y_{CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	$Y_{a,CO_2} - (Y_{a,CO_2} - Y_{h,CO_2}) \cdot e^{(-15000000 \cdot y^3 - 55390 \cdot y^2 - 336,7 \cdot y)}$	
		$u$	m s <sup>-1</sup>	$u_a \cdot (1 - e^{(-16230000 \cdot y^3 - 57270 \cdot y^2 - 344,5 \cdot y)})$	
1 m s <sup>-1</sup> 40 % HR	top:	$Y_{t,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,01218	0,01203
		$Y_{t,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0005468	0,0005493
		$u_t$	m s <sup>-1</sup>	0,1571	0,191
	oeste:	$Y_{H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	$Y_{a,H_2O} - (Y_{a,H_2O} - Y_{h,H_2O}) \cdot e^{(-24300000 \cdot y^3 - 87950 \cdot y^2 - 408,2 \cdot y)}$	
		$Y_{CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	$Y_{a,CO_2} - (Y_{a,CO_2} - Y_{h,CO_2}) \cdot e^{(-42420000 \cdot y^3 - 110800 \cdot y^2 - 476,2 \cdot y)}$	
		$u$	m s <sup>-1</sup>	$u_a \cdot (1 - e^{(-45910000 \cdot y^3 - 114500 \cdot y^2 - 487,2 \cdot y)})$	
1 m s <sup>-1</sup> 60 % HR	top:	$Y_{t,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,01618	0,01603
		$Y_{t,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0005468	0,0005493
		$u_t$	m s <sup>-1</sup>	0,1571	0,191
	oeste:	$Y_{H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	$Y_{a,H_2O} - (Y_{a,H_2O} - Y_{h,H_2O}) \cdot e^{(-24300000 \cdot y^3 - 87950 \cdot y^2 - 408,2 \cdot y)}$	
		$Y_{CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	$Y_{a,CO_2} - (Y_{a,CO_2} - Y_{h,CO_2}) \cdot e^{(-42420000 \cdot y^3 - 110800 \cdot y^2 - 476,2 \cdot y)}$	
		$u$	m s <sup>-1</sup>	$u_a \cdot (1 - e^{(-45910000 \cdot y^3 - 114500 \cdot y^2 - 487,2 \cdot y)})$	
1 m s <sup>-1</sup> 75 % HR	top:	$Y_{t,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,01928	0,01913
		$Y_{t,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0005468	0,0005493
		$u_t$	m s <sup>-1</sup>	0,1571	0,191
	oeste:	$Y_{H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	$Y_{a,H_2O} - (Y_{a,H_2O} - Y_{h,H_2O}) \cdot e^{(-24300000 \cdot y^3 - 87950 \cdot y^2 - 408,2 \cdot y)}$	
		$Y_{CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	$Y_{a,CO_2} - (Y_{a,CO_2} - Y_{h,CO_2}) \cdot e^{(-42420000 \cdot y^3 - 110800 \cdot y^2 - 476,2 \cdot y)}$	
		$u$	m s <sup>-1</sup>	$u_a \cdot (1 - e^{(-45910000 \cdot y^3 - 114500 \cdot y^2 - 487,2 \cdot y)})$	
4 m s <sup>-1</sup> 60 % HR	top:	$Y_{t,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,01354	0,01339
		$Y_{t,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0005841	0,0005865
		$u_t$	m s <sup>-1</sup>	1,2506	1,5149
	oeste:	$Y_{H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	$Y_{a,H_2O} - (Y_{a,H_2O} - Y_{h,H_2O}) \cdot e^{(-194400000 \cdot y^3 - 351800 \cdot y^2 - 816,4 \cdot y)}$	
		$Y_{CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	$Y_{a,CO_2} - (Y_{a,CO_2} - Y_{h,CO_2}) \cdot e^{(-339400000 \cdot y^3 - 443100 \cdot y^2 - 952,4 \cdot y)}$	
		$u$	m s <sup>-1</sup>	$u_a \cdot (1 - e^{(-367400000 \cdot y^3 - 458000 \cdot y^2 - 974,4 \cdot y)})$	

Cuadro 2.8: Condiciones de contorno implementadas en las entradas de las configuraciones con y sin tricomas para los casos con viento paralelo a la superficie de la hoja

---

## CAPÍTULO 3

---

# Resultados

---

En el proceso de la fotosíntesis la planta absorbe CO<sub>2</sub> del ambiente a través de los estomas de las hojas. Debido a que la concentración de H<sub>2</sub>O de la atmósfera circundante a las hojas es menor que en el interior de las mismas, a la par que se absorbe CO<sub>2</sub> la planta pierde (transpira) H<sub>2</sub>O a través de los estomas de las hojas.

En este capítulo se va a analizar el efecto de la capa de tricomas sobre el flujo de H<sub>2</sub>O transpirado en diferentes condiciones, comparando las configuraciones con y sin tricomas. El estudio se ha realizado con diferentes orientaciones de la hoja respecto de la velocidad del viento: perpendicular y paralela. En condiciones de viento perpendicular a la hoja se ha estudiado la influencia de la velocidad del viento. En condiciones de viento paralelo se ha estudiado la influencia de la velocidad del viento y de la humedad relativa del aire circundante.

Además del flujo de agua transpirado ( $\phi''_{H_2O}$ ) se va a calcular un parámetro de gran importancia para caracterizar las plantas en ambientes como los de climas mediterráneos: la **eficiencia en el uso del agua** (WUE). Este parámetro mide la relación entre el flujo de CO<sub>2</sub> entrante en la hoja, necesario para el metabolismo de la planta, y el inevitable flujo saliente de H<sub>2</sub>O. Se define habitualmente como::

$$WUE \text{ [g CO}_2 / \text{kg H}_2\text{O}] = \frac{\phi''_{CO_2} \text{ [g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}]}{\phi''_{H_2O} \text{ [kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}]} , \quad (3.1)$$

donde  $\phi''_{CO_2}$  es el flujo de CO<sub>2</sub> absorbido y  $\phi''_{H_2O}$  es el flujo de H<sub>2</sub>O transpirado.

Una forma de medir la **eficacia de la capa de tricomas** ( $E$ ) en cuanto a la eficiencia del uso del agua es comparar la WUE de la configuración con tricomas con la de la configuración sin tricomas:

$$E[\%] = \frac{WUE_c - WUE_s}{WUE_s} 100 \quad , \quad (3.2)$$

donde  $WUE_c$  es la eficiencia en el uso del agua de la configuración con tricomas y  $WUE_s$  la eficiencia en el uso del agua de la configuración sin tricomas.

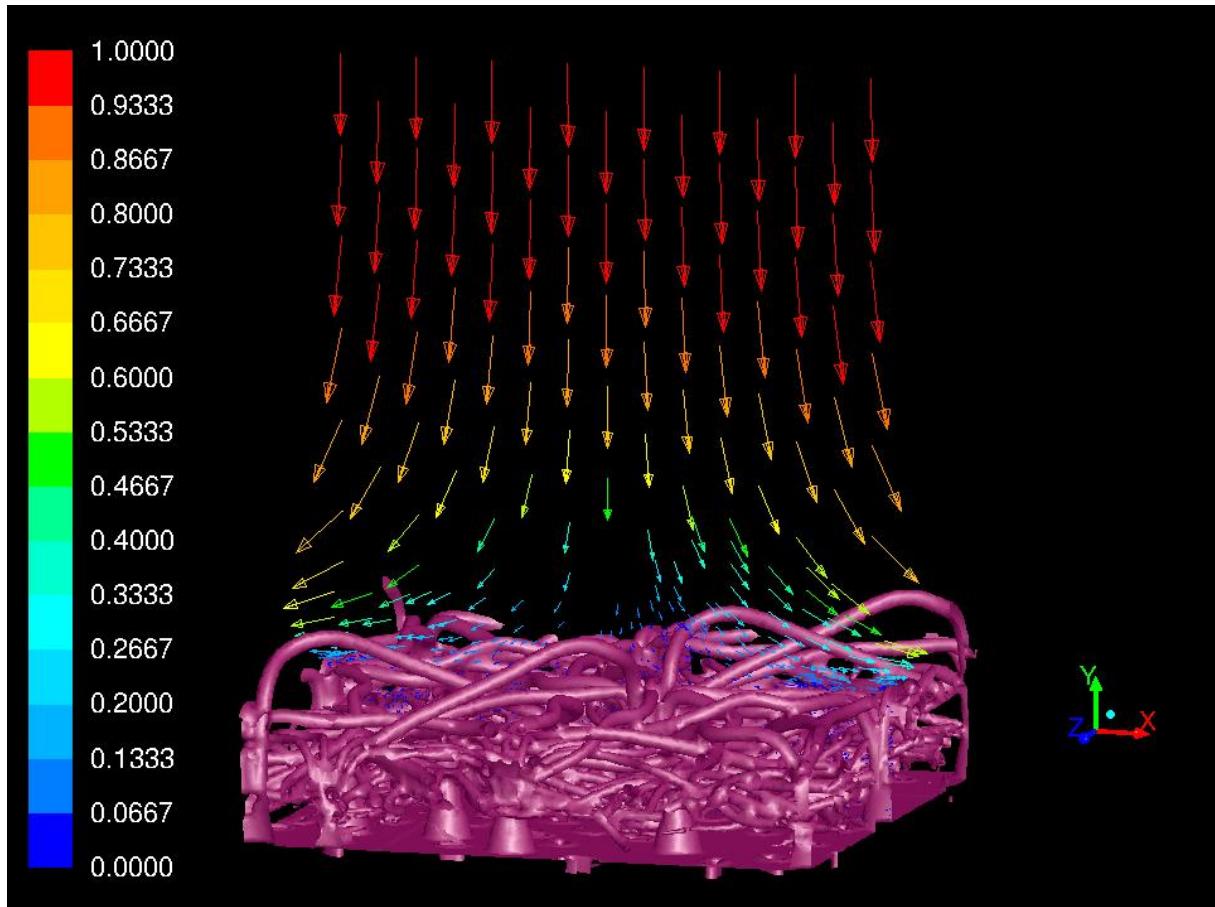


Figura 3.1: Vectores del módulo de la velocidad del aire (en  $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en el caso con  $1 \text{ m s}^{-1}$  de velocidad con viento perpendicular

### 3.1 Viento perpendicular a la hoja

Considerando un 60 % de humedad relativa ambiente, se ha estudiado dos velocidades de aire en esta situación:  $1 \text{ m s}^{-1}$  y  $0,1 \text{ m s}^{-1}$ .

Cuando el viento es perpendicular a la hoja el flujo de aire va en sentido opuesto al flujo difusivo

de  $\text{H}_2\text{O}$  transpirado. El flujo convectivo va desde la cara top hacia la superficie de la hoja mientras que el flujo difusivo de  $\text{H}_2\text{O}$  sale de los estomas hacia la cara top.

Tomando como referencia el caso con  $1 \text{ m s}^{-1}$  de velocidad de aire, en la Figura 3.1 se aprecia como el flujo de aire cambia de dirección al chocar con la capa de tricomas.

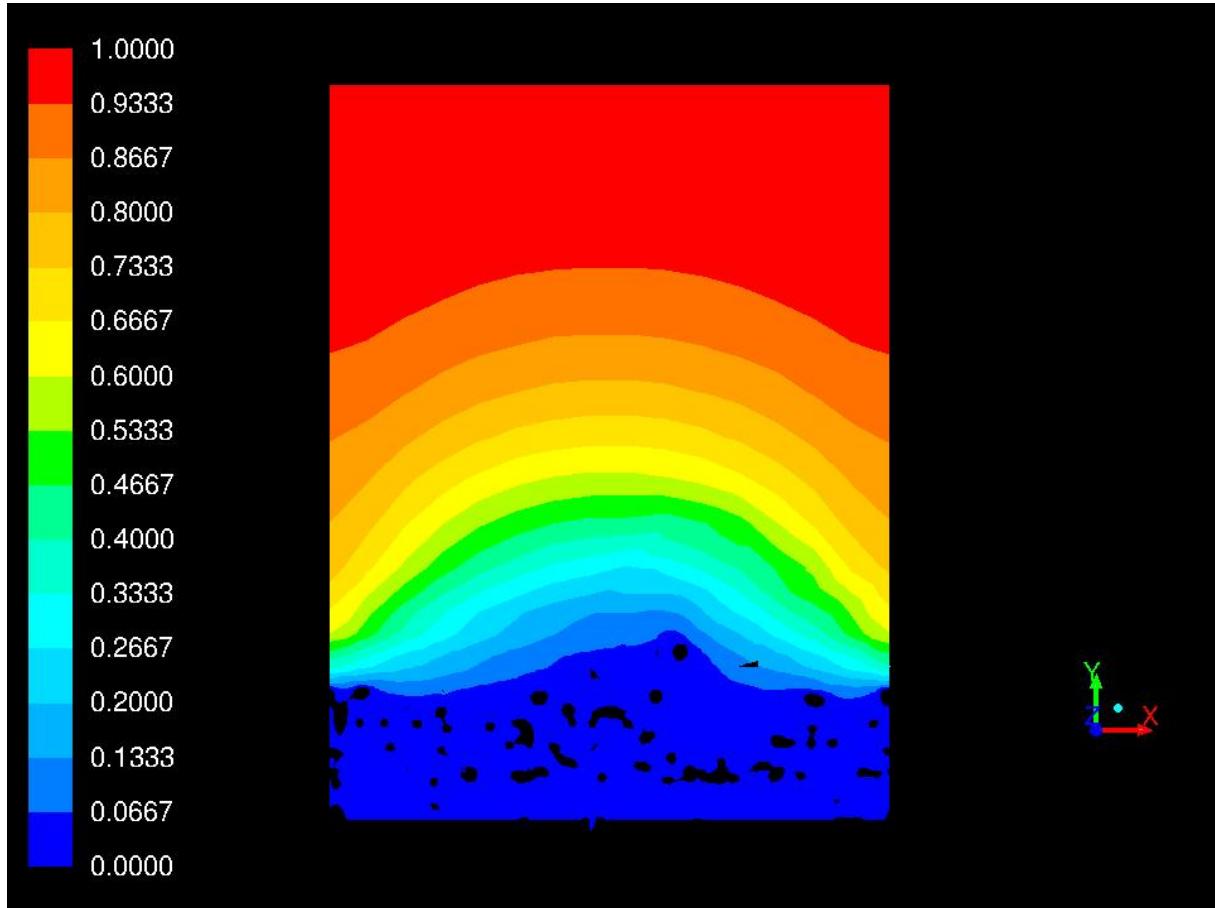


Figura 3.2: Contornos del módulo de la velocidad del aire (en  $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en el caso con  $1 \text{ m s}^{-1}$  de velocidad con viento perpendicular

En la Figura 3.2 se muestra que el fluido en la capa de tricomas está prácticamente en reposo. Por tanto, cuando se presentan tricomas en la superficie de la hoja el flujo convectivo de  $\text{H}_2\text{O}$  sólo llega hasta la superficie de la capa formada por estos.

En la Figura 3.3 aparecen representados los contornos de humedad relativa en un plano medio perpendicular a la hoja cuando la velocidad del aire es de  $1 \text{ m s}^{-1}$  y la humedad relativa en el ambiente es del 60 %. En el centro de la cara inferior de ambas configuraciones se aprecia el corte transversal de un estoma contenido en el plano. En esta figura se observa que, al obsta-

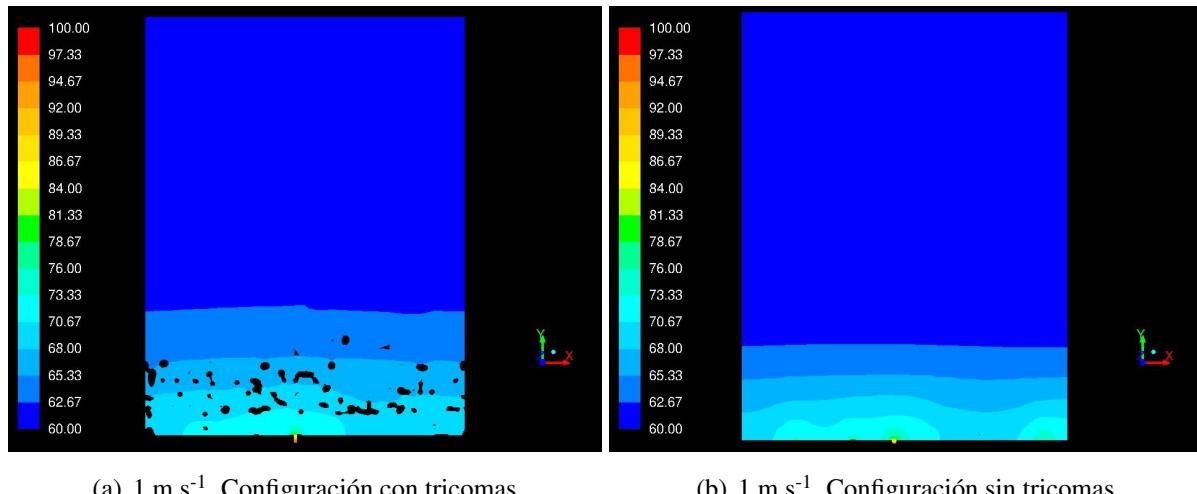


Figura 3.3: Contornos de la humedad relativa (en %) en un plano medio perpendicular a la hoja en el caso con  $1 \text{ m s}^{-1}$  de velocidad con viento perpendicular

culizar el paso del aire, la capa de tricomas evita que la concentración de  $\text{H}_2\text{O}$  ambiental se aproxime a los estomas, haciendo que el gradiente de concentraciones con tricomas sea menor que el gradiente de  $\text{H}_2\text{O}$  sin estos para una altura dada sobre la superficie de la hoja.

Así, la concentración ambiental de  $\text{H}_2\text{O}$  en la configuración con tricomas queda más alejada de la superficie de la hoja respecto de la configuración sin tricomas. Esta diferencia genera una mayor pérdida de  $\text{H}_2\text{O}$  a través de los estomas en ausencia de tricomas.

Cuando el viento es perpendicular a la hoja se ha observado que a bajas velocidades ( $0,1 \text{ m s}^{-1}$ ) la capa de tricomas tiene un pequeño efecto sobre el flujo de  $\text{H}_2\text{O}$  transpirado (el flujo de  $\text{H}_2\text{O}$  en la configuración con tricomas disminuye un 13,5 % respecto del flujo en la configuración sin tricomas), pero al aumentar la velocidad hasta  $1 \text{ m s}^{-1}$  se ha observado que la capa de tricomas hace que el flujo de  $\text{H}_2\text{O}$  disminuya un 51,2 % respecto del flujo en la configuración sin tricomas (Cuadro 3.1).

Esta disminución del flujo de  $\text{H}_2\text{O}$  por la presencia de tricomas conlleva que la WUE aumente comparado con la configuración sin tricomas un 14 % cuando la velocidad es de  $0,1 \text{ m s}^{-1}$  y un 93 % cuando la velocidad es de  $1 \text{ m s}^{-1}$  (Cuadro 3.1).

El flujo de  $\text{H}_2\text{O}$  en la configuración con tricomas se ve poco alterado al aumentar la velocidad del aire debido a que la capa de tricomas obstaculiza el paso del aire hacia los estomas (Figuras 3.4 y 3.5). Sin embargo, esto no ocurre cuando no existen tricomas (Figuras 3.4 y 3.5), lo que conlleva que al aumentar la velocidad aumente la convección cerca de los estomas y, como consecuencia, también aumente el flujo de  $\text{H}_2\text{O}$  transpirado.

Caso		$\phi''_{H_2O}$ [mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]		WUE [g CO <sub>2</sub> / kg H <sub>2</sub> O]	
$u_a$ [m s <sup>-1</sup> ]	$HR_a$ [%]	Con tricomas	Sin tricomas	Con tricomas	Sin tricomas
0,1	60	21,90	25,32	1,75	1,53
1	60	21,82	42,66	1,76	0,91

Cuadro 3.1: Flujo de H<sub>2</sub>O transpirado y WUE de cada uno de los casos con viento perpendicular estudiados, donde  $u_a$  es la velocidad del aire y  $HR_a$  la humedad relativa del aire ambiente

Estos resultados sugieren que a bajas velocidades de aire (0,1 m s<sup>-1</sup>) domina la difusión frente a la convección.

No obstante, en ausencia de tricomas los fenómenos convectivos son tan relevantes como los difusivos al aumentar la velocidad a 1 m s<sup>-1</sup>, pues a esta velocidad las condiciones ambientales se ven arrastradas a las proximidades de la superficie de la hoja (Figura 3.3), lo que conlleva un aumento de los gradientes de concentración y, por tanto, un aumento del flujo de H<sub>2</sub>O perdido.

Sin embargo, el flujo de H<sub>2</sub>O transpirado en presencia de una capa de tricomas apenas varía al aumentar la velocidad desde 0,1 m s<sup>-1</sup> hasta 1 m s<sup>-1</sup> (Cuadro 3.1). Este hecho sugiere que a la velocidad de 1 m s<sup>-1</sup>, a pesar de que las condiciones ambientales se presentan más cercanas a la superficie de la hoja respecto al caso con velocidad de 0,1 m s<sup>-1</sup>, los fenómenos convectivos resultan irrelevantes comparados con los difusivos en presencia de una capa de tricomas.

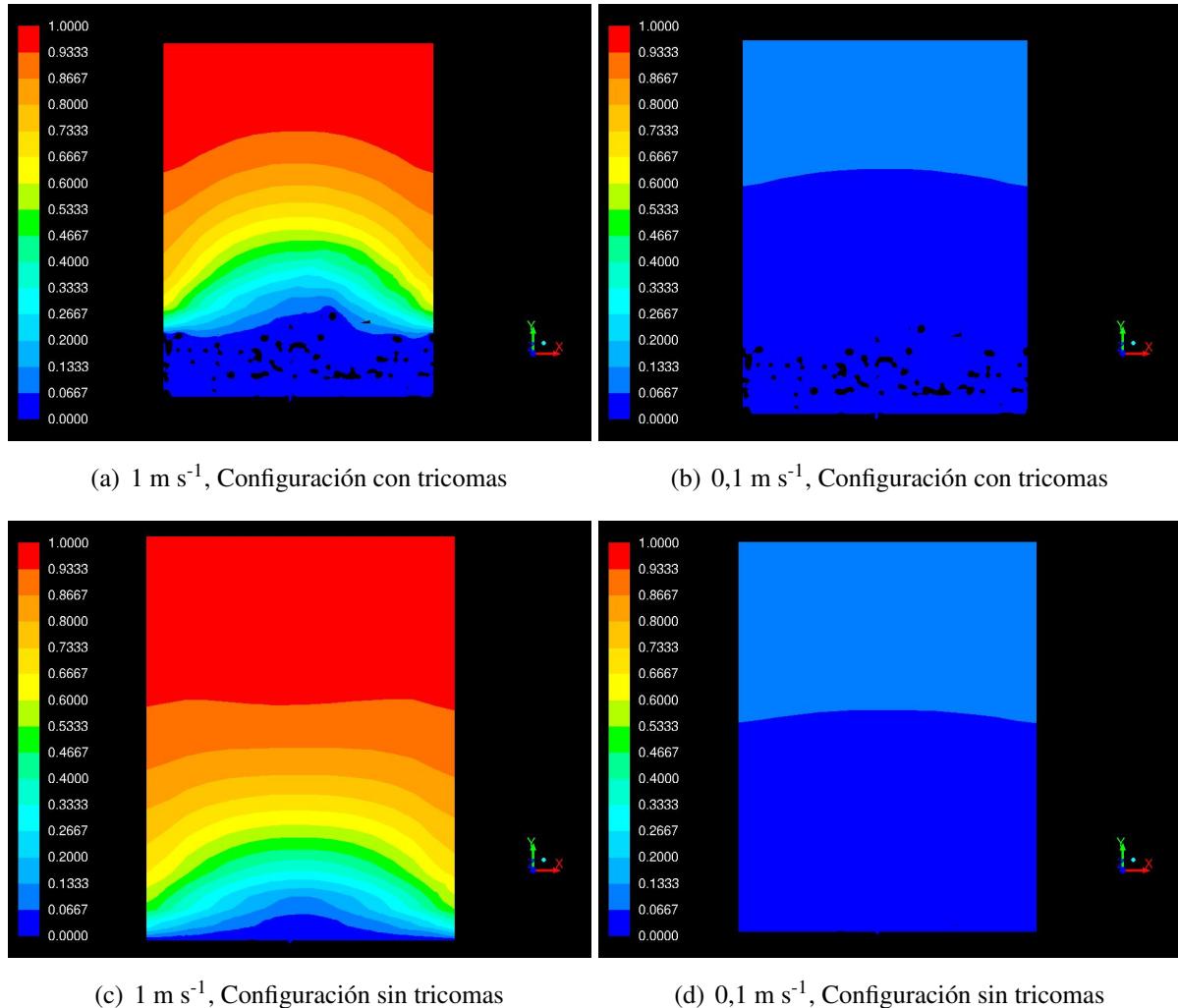


Figura 3.4: Contornos del módulo de la velocidad del aire (en  $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en cada uno de los casos con viento perpendicular estudiados

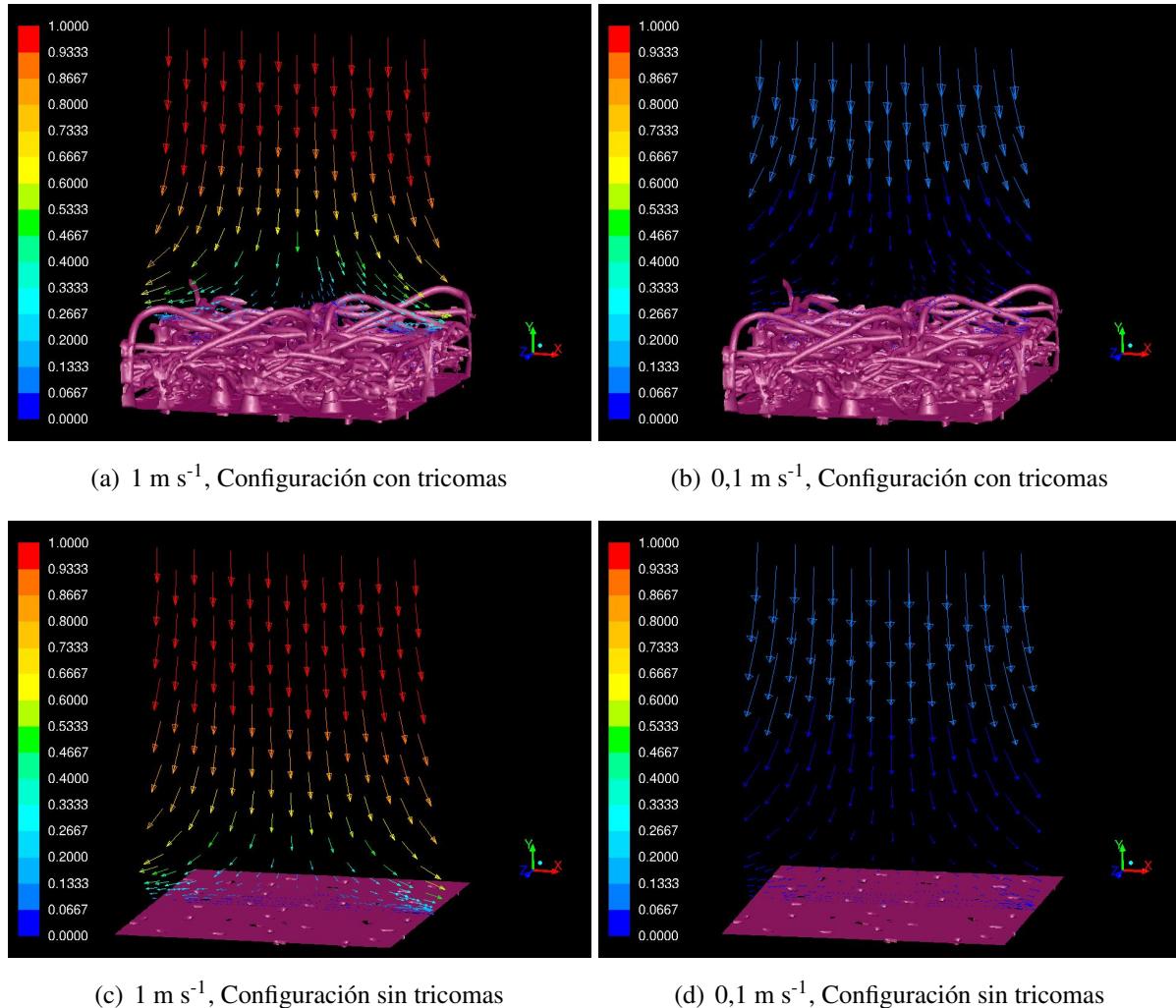


Figura 3.5: Vectores del módulo de la velocidad del aire (en  $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en cada uno de los casos con viento perpendicular estudiados

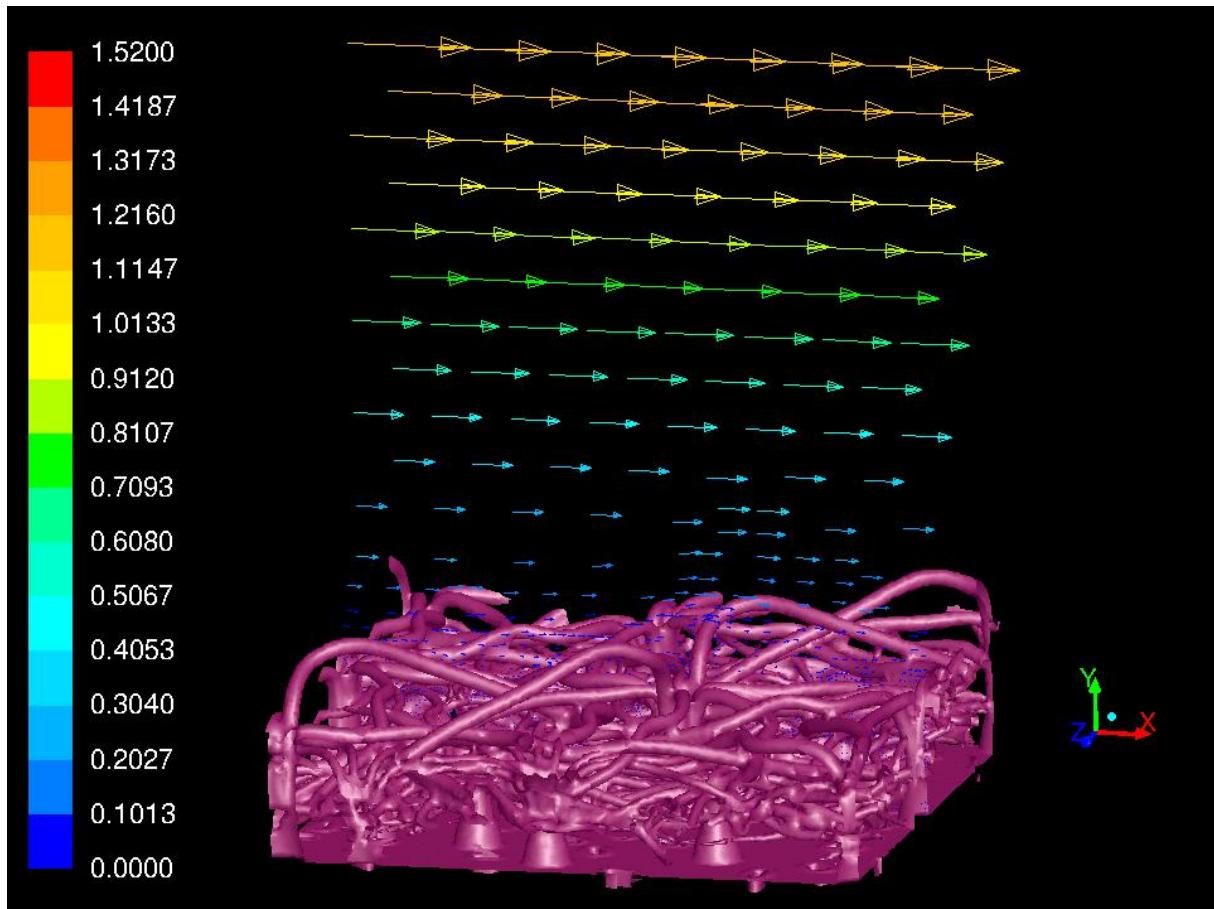


Figura 3.6: Vectores del módulo de la velocidad del aire (en  $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en el caso con viento paralelo de  $4 \text{ m s}^{-1}$

## 3.2 Viento paralelo a la hoja

Cuando se estudia el intercambio gaseoso en la situación de viento paralelo a la hoja es importante conocer el efecto que tiene la variación de la humedad relativa del ambiente así como el efecto que tiene la variación en la velocidad del viento. Por ello, se ha analizado por separado cada uno de ellos.

El efecto de la humedad relativa se ha estudiado en la Sección 3.2.1 comparando tres casos con la misma velocidad de viento ( $1 \text{ m s}^{-1}$ ) y diferentes humedades relativas del aire ambiente: 40%, 60% y 75%. En la Sección 3.2.2 se ha estudiado el efecto de la velocidad del viento comparando tres casos con la misma humedad relativa del aire ambiente (60%) y diferentes velocidades:  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ ,  $1 \text{ m s}^{-1}$  y  $4 \text{ m s}^{-1}$

Independientemente del valor de la velocidad del viento y de la humedad relativa, cuando el viento es paralelo a la hoja el flujo convectivo de  $H_2O$  va en dirección perpendicular al flujo difusivo de  $H_2O$  transpirado. El flujo convectivo va desde la cara oeste hacia la cara este (Figura 3.6) mientras que el flujo difusivo de  $H_2O$  sale de los estomas hacia la cara top.

Tomando como referencia el caso con  $4 \text{ m s}^{-1}$  de velocidad de viento, en la Figura 3.7 se muestra que la velocidad por debajo de la capa de tricomas es casi nula. Por tanto, cuando la superficie de la hoja presenta una capa de tricomas el flujo convectivo de  $H_2O$  sólo existe por encima de ésta. Este flujo convectivo se extiende hasta la superficie de la hoja en ausencia de tricomas.

Esta diferencia que los tricomas generan en el flujo convectivo de  $H_2O$  es una de las principales causas por las que la pérdida de  $H_2O$  en la configuración con tricomas difiere de la de sin tricomas.

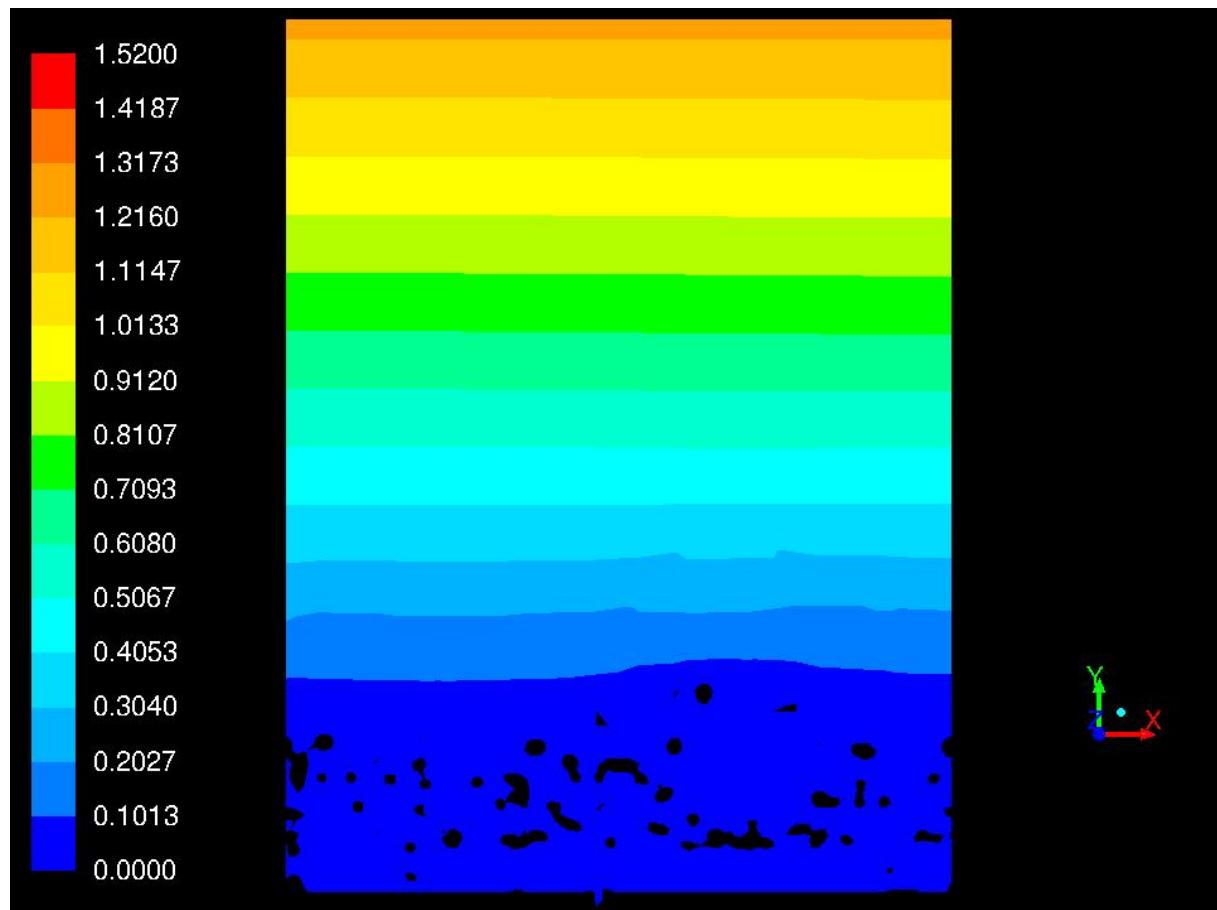


Figura 3.7: Contornos del módulo de la velocidad del aire (en  $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en el caso con viento de  $4 \text{ m s}^{-1}$  y 60 % de humedad relativa en el ambiente

$u_a$ [m s <sup>-1</sup> ]	$HR_a$ [%]	Caso		$\phi''_{H_2O}$ [mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]		WUE [g CO <sub>2</sub> / kg H <sub>2</sub> O]	
		Con tricomas	Sin tricomas	Con tricomas	Sin tricomas	Con tricomas	Sin tricomas
1	40	21,82	33,85	1,76	1,14		
1	60	10,08	15,58	3,81	2,49		
1	75	0,92	1,46	41,56	26,58		

Cuadro 3.2: Flujo de H<sub>2</sub>O transpirado y WUE de los casos con velocidad de viento paralelo de 1 m s<sup>-1</sup> ( $u_a$ ) con diferentes valores de la humedad relativa del ambiente ( $HR_a$ )

### 3.2.1 Efecto de la humedad relativa

El flujo de H<sub>2</sub>O aumenta al disminuir la humedad relativa del ambiente tanto en la configuración con tricomas como en la configuración sin tricomas (Cuadro 3.2).

Cuando la velocidad del viento paralelo es de 1 m s<sup>-1</sup> se ha observado que para las diferentes humedades relativas estudiadas el flujo de H<sub>2</sub>O transpirado se reduce entre un 35 % y un 37% con la presencia de la capa de tricomas (Cuadro 3.2), siendo la reducción similar con las distintas humedades relativas del ambiente. Así, cuando se representa la humedad relativa en la proximidad de la superficie de la hoja, se observa que el menor flujo de H<sub>2</sub>O en la configuración con tricomas da lugar a menores valores de humedad relativa comparada con la configuración sin tricomas (Figura 3.8). A medida que disminuye la humedad relativa en el ambiente este efecto es más apreciable.

Tanto en la configuración con tricomas como en la configuración sin tricomas, la eficiencia en el uso del agua aumenta al aumentar la humedad relativa ambiental debido a que disminuye el flujo de H<sub>2</sub>O (Cuadro 3.2). La presencia de tricomas aumenta la WUE en un 53-56 %, no siendo apenas afectada por la humedad relativa del ambiente (Cuadro 3.2, Cuadro 3.4).

Los resultados sugieren que la humedad relativa del aire ambiente no tiene ningún efecto sobre la eficacia de la capa de tricomas en la reducción de la pérdida de H<sub>2</sub>O desde las hojas (Cuadro 3.4).

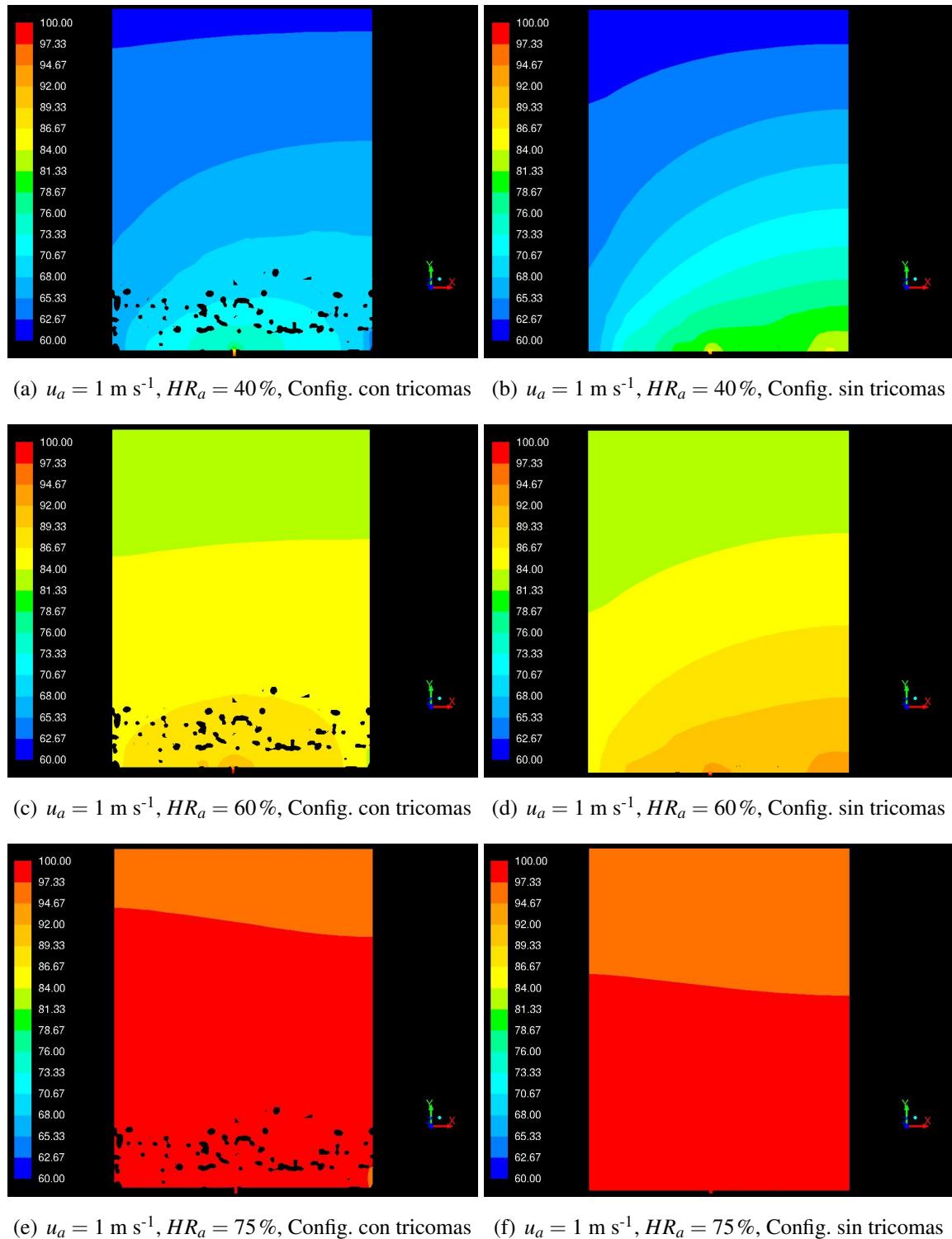


Figura 3.8: Contornos de la humedad relativa (en %) en un plano medio perpendicular a la hoja en los casos con velocidad de viento paralelo de  $1 \text{ m s}^{-1}$  ( $u_a$ )

Caso		$\phi''_{H_2O}$ [mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]		WUE [g CO <sub>2</sub> / kg H <sub>2</sub> O]	
$u_a$ [m s <sup>-1</sup> ]	HR <sub>a</sub> [%]	Con tricomas	Sin tricomas	Con tricomas	Sin tricomas
0,5	60	3,63	5,59	10,57	6,93
1	60	10,08	15,58	3,81	2,49
4	60	17,87	29,99	2,15	1,29

Cuadro 3.3: Flujo de H<sub>2</sub>O transpirado y WUE de los casos con 60 % de humedad relativa en el ambiente con viento paralelo con diferentes valores de velocidad de viento ( $u_a$ )

### 3.2.2 Efecto de la velocidad del viento

Al aumentar la velocidad del viento aumenta el flujo de H<sub>2</sub>O desde las hojas tanto en la configuración con tricomas como en la configuración sin tricomas (Cuadro 3.3).

Se ha observado que para las diferentes velocidades de viento estudiadas el flujo de H<sub>2</sub>O transpirado se reduce entre un 35 % y un 41 % con la presencia de la capa de tricomas (Cuadro 3.3). Si bien la capa de tricomas reduce el flujo de H<sub>2</sub>O de forma similar (35 %) con valores de viento de 0,5 y 1 m s<sup>-1</sup>, la reducción es mayor (41 %) cuando la velocidad del viento es de 4 m s<sup>-1</sup>. Esta reducción de la pérdida de H<sub>2</sub>O se ve reflejada en la Figura 3.9, donde el gradiente de concentraciones de la configuración con tricomas por encima de la capa de tricomas es menor al gradiente existente a partir de esa misma altura sobre la superficie de la hoja en la configuración sin tricomas, para cada caso de velocidad de viento estudiado.

Tanto en la configuración con tricomas como en la configuración sin tricomas, la eficiencia en el uso del agua disminuye al aumentar la velocidad del viento debido a que aumenta el flujo de H<sub>2</sub>O (Cuadro 3.3). La presencia de tricomas aumenta la WUE en un 53 % cuando la velocidad del viento es de 0,5 a 1 m s<sup>-1</sup>, pero aumenta un 66 % cuando la velocidad del viento es de 4 m s<sup>-1</sup> (Cuadro 3.3, Cuadro 3.4).

Este aumento en la eficacia de la capa de tricomas es posiblemente debido a que a la velocidad de 4 m s<sup>-1</sup> el flujo convectivo de H<sub>2</sub>O aumenta hasta un valor comparable al del flujo difusivo transpirado. En la Figura 3.10 se observa que los valores de los perfiles de velocidades (y por consiguiente los flujos convectivos de especies) de los casos con velocidad de viento de 0,5 y 1 m s<sup>-1</sup> (Figuras 3.10a, 3.10b, 3.10c, 3.10d) son muy bajos en comparación con los valores de los perfiles de velocidades del caso con velocidad de viento de 4 m s<sup>-1</sup> (Figuras 3.10e, 3.10f). Asimismo, se puede apreciar que a la velocidad de viento de 4 m s<sup>-1</sup> la presencia de tricomas reduce de forma importante la velocidad del viento en la proximidad de la capa de tricomas, lo

cual puede reducir el flujo convectivo de H<sub>2</sub>O.

Los resultados sugieren que a bajas velocidades de viento (0,5 y 1 m s<sup>-1</sup>) la eficacia de la capa de tricomas no depende de la velocidad (52,5% y 53,22% respectivamente), pero a mayores velocidades (4 m s<sup>-1</sup>) la eficacia de la capa de tricomas se ve aumentada (66,24%) ([Cuadro 3.4](#)).

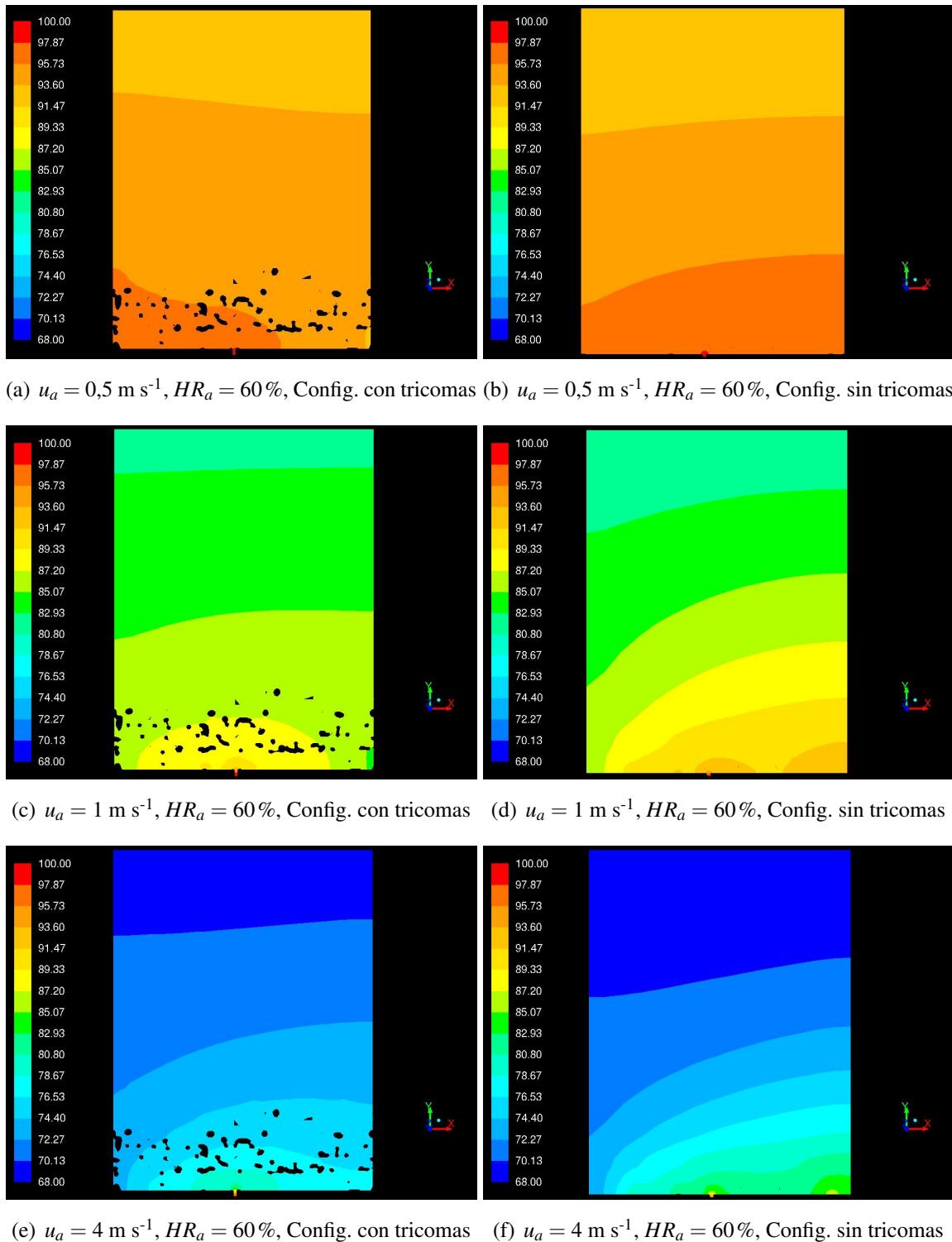


Figura 3.9: Contornos de la humedad relativa (en %) en un plano medio perpendicular a la hoja en los casos con 60% de humedad relativa en el ambiente con viento paralelo

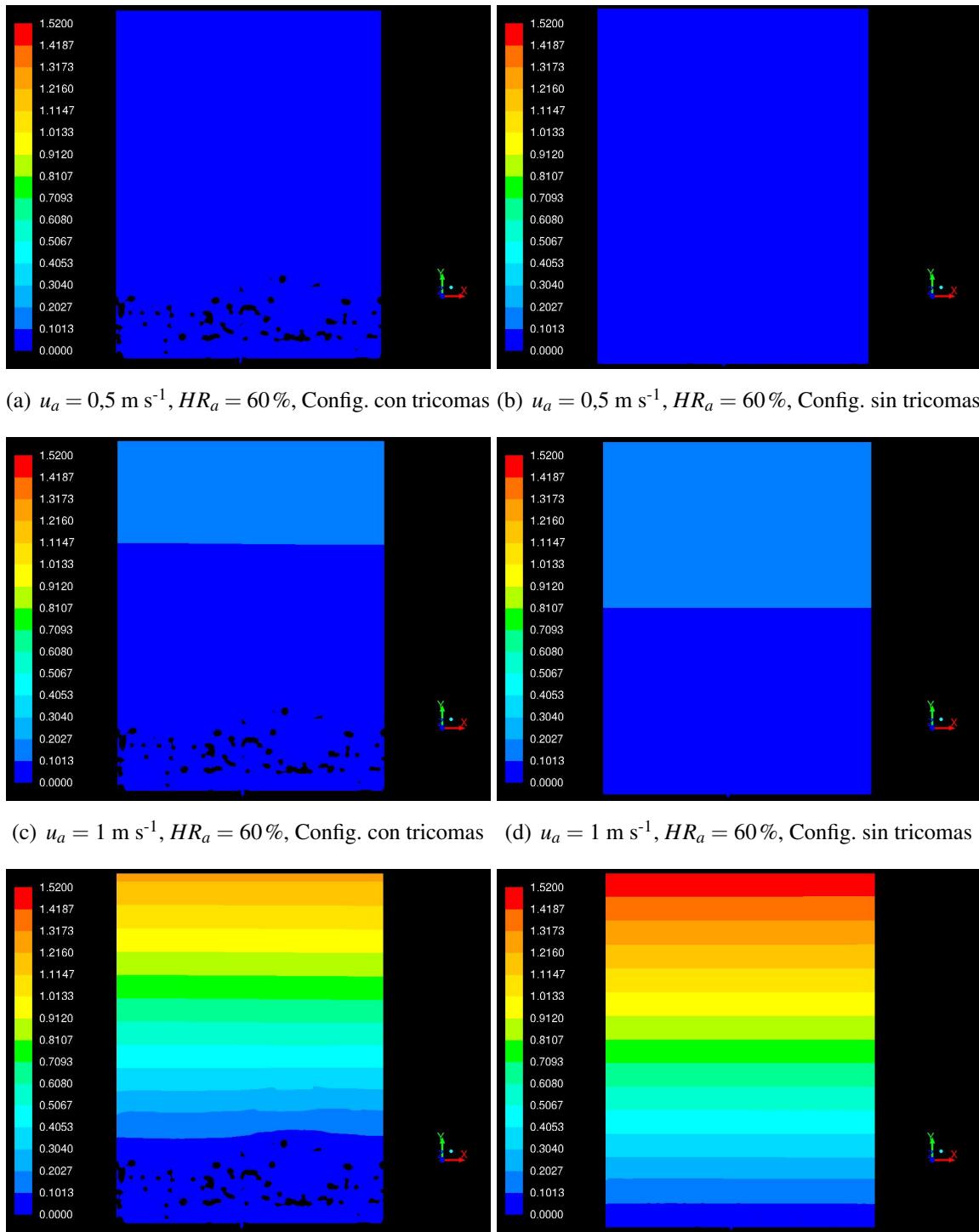


Figura 3.10: Contornos del módulo de la velocidad del aire (en  $\text{m s}^{-1}$ ) en un plano medio perpendicular a la hoja en los casos con 60% de humedad relativa en el ambiente con viento paralelo

### **3.3 Efecto de los tricomas de *Quercus ilex* en la eficiencia del uso del agua, y comparación con datos experimentales**

---

En el Cuadro 3.4 aparecen recogidos los valores de la eficiencia en el uso del agua y la eficacia de la capa de tricomas en cada uno de los casos estudiados. En él se observa que bajo cualquiera de las condiciones ambientales estudiadas la presencia de la capa de tricomas aumenta en mayor o menor medida la eficiencia en el uso del agua durante el intercambio gaseoso.

En el Cuadro 3.4 se observa que la mayor eficacia de los tricomas en la reducción de la pérdida de H<sub>2</sub>O se consigue a velocidades de viento de 1 m s<sup>-1</sup> en dirección perpendicular (93,72 %) y 4 m s<sup>-1</sup> en paralelo a la hoja (66,24 %), es decir, a velocidades altas el efecto de los tricomas es mayor que a bajas velocidades.

En el Cuadro B.3 se presentan los datos experimentales del flujo de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O intercambiados a través de los estomos en las hojas de *Quercus ilex*. Estos datos han sido tomados en ausencia de viento, a 1 atmósfera, 25°C y 60 % de humedad relativa ambiente, por la Unidad de Recursos Forestales del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria del Gobierno de Aragón (CITA).

Las condiciones ambientales del caso estudiado con 0,5 m s<sup>-1</sup> de velocidad de viento paralelo y 60 % de humedad relativa ambiente son similares a las condiciones en las que se han medido los valores experimentales. Comparando los valores del Cuadro 3.3 con los del Cuadro B.3 se observa que, en condiciones de velocidad de viento y humedad relativa similares, los valores de flujo de H<sub>2</sub>O y WUE obtenidos mediante simulación se ajustan a los valores observados experimentalmente en hojas de encina, lo cual demuestra la validez de estos resultados.

Situación	Caso		WUE [g CO <sub>2</sub> / kg H <sub>2</sub> O]		E [%]
	$u_a$ [m s <sup>-1</sup> ]	HR <sub>a</sub> [%]	Con tricomas	Sin tricomas	
Viento perpendicular	0,1	60	1,75	1,53	14,52
Viento perpendicular	1	60	1,76	0,91	93,72
Viento paralelo	0,5	60	10,57	6,93	52,50
Viento paralelo	1	40	1,76	1,14	53,70
Viento paralelo	1	60	3,81	2,49	53,22
Viento paralelo	1	75	41,56	26,58	56,37
Viento paralelo	4	60	2,15	1,29	66,24

Cuadro 3.4: Eficacia de la capa de tricomas en cada uno de los casos estudiados, donde HR<sub>a</sub> la humedad relativa en el aire ambiente

---

## CAPÍTULO 4

# Conclusiones

---

En este trabajo se han utilizado dos configuraciones computacionales basadas en la anatomía de las hojas de encina (*Quercus ilex*). Una de ellas presenta tricomas mientras que la otra carece de estos. Se ha calculado el efecto de la capa de tricomas sobre el flujo de H<sub>2</sub>O transpirado y la WUE en diferentes condiciones ambientales.

En todos los casos estudiados la presencia de una capa de tricomas en el envés de las hojas de *Quercus ilex* disminuye la pérdida de H<sub>2</sub>O desde la hoja y aumenta la WUE. El aumento de la WUE debido a la presencia de tricomas varió entre un 14 % y un 93 %.

Cuando el viento es perpendicular a la superficie de la hoja la presencia de tricomas reduce la velocidad del viento en la capa de tricomas, lo que disminuye el flujo convectivo de H<sub>2</sub>O cerca de los estomas, y aumenta la WUE, siendo este efecto muy importante para velocidades de 1 m s<sup>-1</sup>.

Cuando la velocidad del viento es paralela a la superficie de la hoja la presencia de una capa de tricomas supone que las capas límite viscosa y másica empiecen a desarrollarse por encima de la capa de tricomas.

Cuando el viento es paralelo a la superficie de la hoja la presencia de tricomas reduce el flujo de H<sub>2</sub>O y aumenta la WUE. La humedad relativa ambiental no influye en esta reducción, pero sí la velocidad del viento, de forma que el efecto de los tricomas es mayor a mayor velocidad del viento.

En condiciones de velocidad de viento y humedad relativa similares, los valores de flujo de H<sub>2</sub>O y WUE obtenidos mediante simulación con Fluidodinámica Computacional fueron similares a los valores observados experimentalmente en hojas de *Quercus ilex*.

Las conclusiones de este estudio son consistentes con trabajos experimentales que sugieren que la presencia de tricomas en las hojas supone una adaptación a ambientes con escasez de agua

para las plantas.

La utilización en futuros trabajos de un dominio de mayor altura y/o profundidad podría proporcionar resultados más precisos, pero a cambio de un mayor coste computacional. Al aumentar la altura del dominio por encima del espesor de capa límite se consigue eliminar la incertidumbre de las condiciones de contorno en la cara `top`. Al extender el dominio por debajo de los estomas se consigue estudiar el efecto de la cavidad subestomática (que es diferente en cada especie) en el intercambio de  $H_2O$  y  $CO_2$ . Asimismo, si en lugar de fijar un flujo de  $CO_2$  se reproducen las reacciones químicas que ocurren en la hoja durante el intercambio, se podría simular la fisiología de la planta con mayor precisión.

La importancia de los resultados obtenidos mediante simulación deberá servir de estímulo para estudiar la relevancia de la presencia o no de tricomas en la eficiencia en el uso del agua en otras especies vegetales.

## Bibliografía

---

- Aalto T., Juurola E. 2002. A three-dimensional model of CO<sub>2</sub> transport in airspaces and mesophyll cells of a silver birch leaf. *Plant, Cell and Environment*, 25: 1399-1409.
- Agrawal A.A., Fishbein M., Jetter R., Salminem J.P., Goldstein J.B., Freitag, A.E., Sparks J.P. 2009. Phylogenetic ecology of leaf surfaces traits in the milkweeds (*Asclepias* spp.): chemistry, ecophysiology, and insect behaviour. *New Phytologist*, 183: 848-867.
- Asseng S., Hsiao T.C. 2000. Canopy CO<sub>2</sub> assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. *Field Crops Research*, 67: 191-206.
- Bacelar E.A., Correia C.M., Moutinho-Pereira J.M., Gonçalves B.C., Lopes J.I., Torres-Pereira J.M. 2004. Sclerophylly and leaf anatomical traits of field-grown olive cultivars under drought conditions. *Tree Physiology*, 24: 233-239.
- Baldini E., Facini O., Nerozzi F., Rossi F., Rotondi A. 1997. Leaf characteristics and optical properties of different woody species. *Trees*, 12: 73-81.
- Bickford C.P. 2016. Ecophysiology of leaf trichomes. *Functional Plant Biology*, 43: 807-814.
- Bird R.B., Stewart W.E., Lighfoot E.N. 2007. Transport phenomena. John Wiley & Sons. 905 pp.
- Brewer C.A., Smith, W.K. 1994. Influence of simulated dewfall on photosynthesis and yield in soybean isolines (*Glycine max* (L.) Merr. cv Williams) with different trichome densities. *Int. J. Plant Sci.*, 155: 460-466.
- Canvin D.T., Berry J.A., Badger M.R., Fock H., Osmond C.B. 1980. Oxygen exchange in leaves in the light. *Plant Physiology*, 66: 302-307.

- Choinski J.S., Wise R.R. 1999. Leaf growth and development in relation to gas exchange in *Quercus marilandica* Muenchh. *Journal of Plant Physiology*, 154: 302-309.
- Defraeye T., Verboven P., Ho Q.T., Nicolai B. 2013. Convective heat and mass exchange predictions at leaf surfaces: applications, methods and perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96: 180-201.
- Defraeye T., Derome D., Verboven P., Carmeliet J., Nicolai B. 2014. Cross-scale modelling of transpiration from stomata via the leaf boundary layer. *Annals of Botany*, 114: 711-723.
- Deng M., Jiang X.L., Song Y.G., Coombes A., Yang X.R., Xiong Y.S., LI Q.S. 2017. Leaf epidermal features of *Quercus* Group ilex (Fagaceae) and their application to species identification. *Review of Paleobotany and Palynology*, 237: 10-36.
- Driscoll S.P., Prins A., Olmos E., Kunert K.J., Foyer C.H. 2006. Specification of adaxial and abaxial stomata, epidermal structure and photosynthesis to CO<sub>2</sub> enrichment in maize leaves. *J. of Experimental Botany*, 57: 381-390.
- Ennajeh M., Vadel A.M., Cochard H., Khemira H. 2010. Comparative impacts of water stress on the leaf anatomy of a drought-resistant and a drought-sensitive olive cultivar. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 85: 289-294.
- Fu Q.S., Yang R.C., Wang H.S., Zhao B., Zhou C.L., Ren S.X., Guo Y.D. 2013. Leaf morphological and ultrastructural performance of eggplant (*Solanum melongena* L.) in response to water stress. *Photosynthetica*, 51: 109-114.
- Hanba Y.T., Moriya A., Kimura K. 2004. Effect of leaf surface wetness and wettability on photosynthesis in bean and pea. *Plant Cell Environ.*, 27: 413–421.
- Ichie T., Inoue Y., Takahashi K., Kamiya K., Kenzo T. 2016. Ecological distribution of leaf stomata and trichomes among tree species in a Malaysian lowland tropical rain forest. *Journal of Plant Research*, 129: 625-635.
- Johnson HB. 1975. Plant pubescence: an ecological perspective. *Botanical Reviews*, 41: 233-258.
- Karabourniotis G., Bornman J.F. 1999. Penetration of UV-A, UV-B and blue light through the leaf trichome layers of two xeromorphic plants, olive and oak, measured by optical fibre micro-probes. *Physiologia Plantarum*, 105: 655-661.

- Karabourniotis G., Fasseas C. 1996. The dense indumentum with its polyphenol content may replace the protective role of the epidermis in some young xeromorphic leaves. Canadian J. of Botany, 74: 347-351.
- Kenzo T., Yoneda R., Azani M.A., Majid N.M. 2008. Changes in leaf water use after removal of leaf lower surface hairs on *Mallotus macrostachyus* (Euphorbiaceae) in a tropical forest in Malaysia. Journal of Forest Research, 13: 137-142.
- Jarvis P.G., McNaughton K.G. 1986. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. Advances in Ecological Research, 15: 1-49.
- Jennings, S.G. 1988. The mean free path in air. Journal of Aerosol Science, 19: 159-166.
- Liakopoulos G., Nikolopoulos D., Klouvatou A., Vekkos K.A., Manetas Y., Karabourniotis G. 2006. The photoprotective role of epidermal anthocyanins and surface pubescence in young leaves of grapevine (*Vitis vinifera*). Annals of Botany, 98: 257-265.
- Liakoura V., Stefanou M., Manetas Y., Cholevas C., Karabourniotis G. 1997. Trichome density and its UV-B protective potential are affected by shading and leaf position on the canopy. Environmental and Experimental Botany, 38: 223-229.
- Llamas F., Perez-Morales C., Acedo C., Penas A. 1995. Foliar trichomes of the evergreen and semideciduous species of the genus *Quercus* (Fagaceae) in the Iberian Peninsula. Botanical Journal of the Linnean Society, 117: 47-57.
- Mancuso S., Papeschi G., Marras A.M. 2000. A polarographic, oxygen-selective, vibrating-microelectrode system for the spatial and temporal characterisation of transmembrane oxygen fluxes in plants. Planta, 211: 384-389.
- Morales F., Abadía A., Abadía J., Montserrat G., Gil-Pelegrin E. 2002. Trichomes and photosynthetic pigment composition changes: responses of *Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp. and *Quercus coccifera* L. to Mediterranean stress conditions. Trees, 16: 504-510.
- Ning P., Wang J., Zhou Y., Gao L., Wang J., Gong C. 2016. Adaptational evolution of trichome in *Caragana korshinskii* to natural drought stress on the Loess Plateau, China. Ecology and Evolution, 6: 3786-3795.
- Nobel P.S. 2005. Physicochemical and environmental plant physiology. Elsevier. 500 pp.

- Paelotti E., Seufert G., Della Rocca G., Thomsen H. 2007. Photosynthetic responses to elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in *Quercus ilex* leaves at a natural CO<sub>2</sub> spring. Environmental Pollution, 147: 516-524.
- Roth-Nebelsick A. 2007. Computer-based studies of diffusion through stomata of different architecture. Annals of Botany, 100: 23-32.
- Roth-Nebelsick A., Hassiotou F., Veneklaas E.J. 2009. Stomatal crypts have small effects on transpiration: a numerical model analysis. Plant Physiology, 151: 2018-2027.
- Roth-Nebelsick A., Fernández V., Peguero-Pina J.J., Sancho-Knapik D., Gil-Pelegrin E. 2013. Stomatal encryption by epicuticular waxes as a plastic trait modifying gas exchange in a Mediterranean evergreen species (*Quercus coccifera* L.). Plant, Cell and Environment, 36: 579-89.
- Sandquist D.R., Ehleringer J.R. 2003. Population- and family-level variation of brittlebush (*Encelia farinosa*, Asteraceae) pubescence: its relation to drought and implications for selection in variable environments. American Journal of Botany, 90: 1481-1486.
- Schreuder M.D.J., Brewer C.A., Heine C. 2001. Modelled influences of non-exchanging trichomes on leaf boundary layers and gas exchange. Journal of Theoretical Biology, 210: 23-32.
- Schuepp, P.H. 1993. Tansley Review No. 59 Leaf boundary layers. New Phytologist, 125: 477-507.
- Skelton R.P., Midgley J.J., Nyaga J.M., Johnson S.D., Cramer M.D. 2012. Is leaf pubescence of Cape Proteaceae a xeromorphic or radiation-protective trait?. Australian J. of Botany, 60: 104-113.
- Soegaard H., Jensen N.O., Boegh E., Hasager C.B., Schelde K., Thomsen A. 2003. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modelling. Agricultural and Forest Meteorology, 114: 153-173.
- Steduto P., Çetinkökü Ö., Albrizio R., Kanber, R. 2002. Automated closed-system canopy-chamber for continuous field-crop monitoring of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes. Agric. For. Meteorol., 111: 171-186.
- Taiz L., Zeiger E. 1991. Plant Physiology. The Benjamin/Cummings Publishing Company. Redwood City (CA). 565 pp.
- Urrego-Pereira Y., Martínez-Cob A., Fernández V., Cavero J. 2013. Daytime sprinkler irrigation effects on net photosynthesis of maize and alfalfa. Agron. J., 105: 1515-1528.

- Vesala T., Ahonen T., Hari P., Krissinel E., Shokhirev N. 1996. Analysis of stomatal CO<sub>2</sub> uptake by a three-dimensional cylindrically symmetric model. *New Phytologist*, 132: 235-245.
- Wagner G.J. 1991. Secreting glandular trichomes: more than just hairs. *Plant Physiology*, 96: 675-679.
- Zhu R., Macfie S.M., Ding Z. 2008. Effects of cadmium on photosynthetic oxygen evolution from single stomata in *Brassica juncea* (L.) Czern. *Langmuir*, 24: 14261-14268.

---

## **APÉNDICE A**

---

# **Figuras**

---

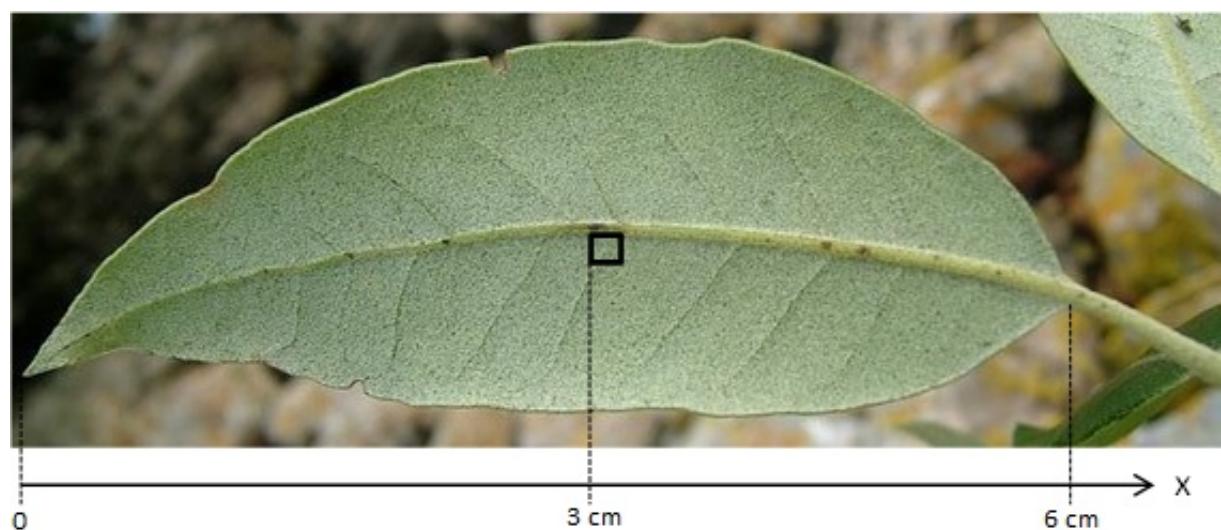


Figura A.1: Fotografía de una hoja de encina y representación esquemática de la ubicación de la malla que se ha escogido en el estudio

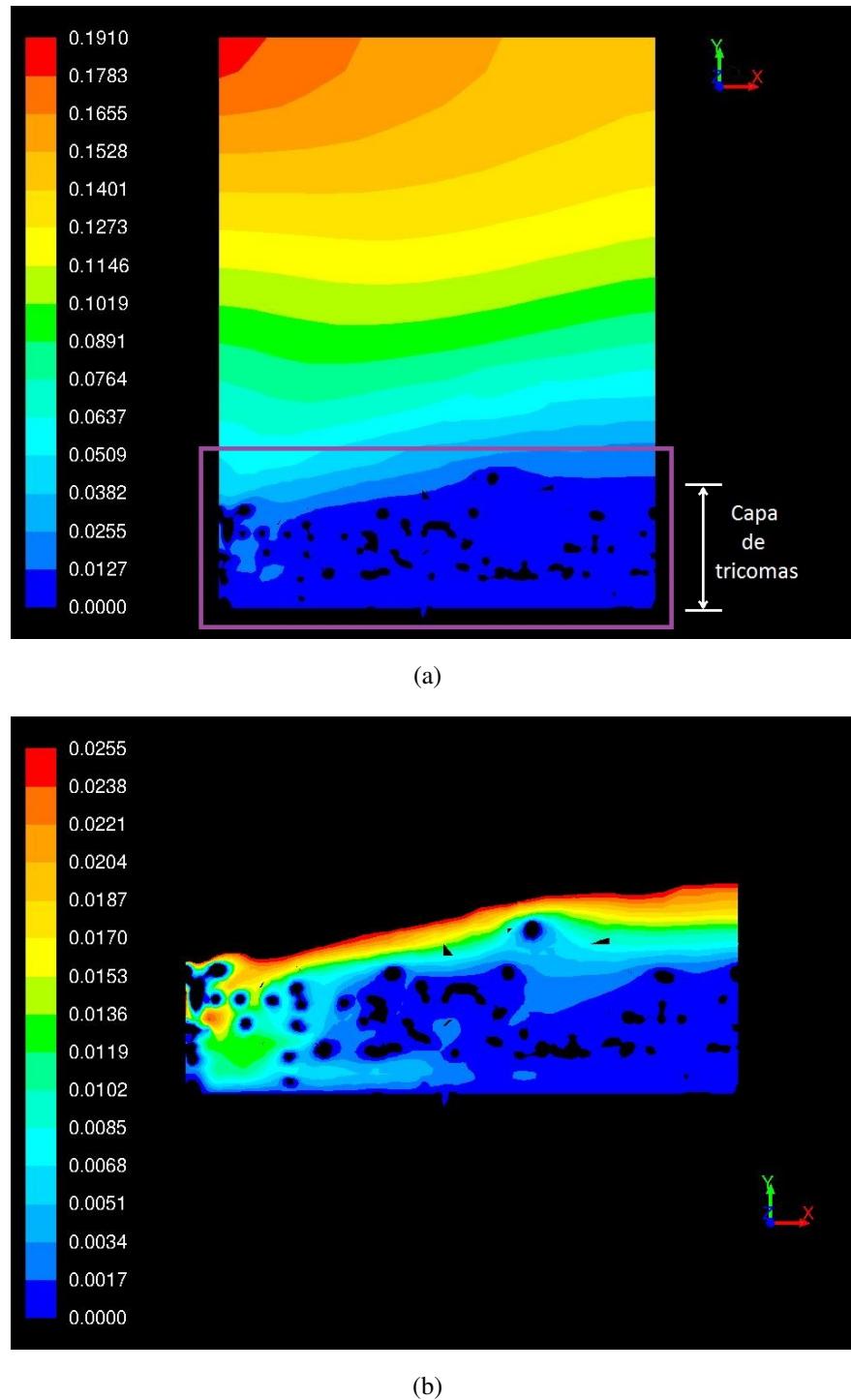


Figura A.2: Contornos de velocidad del aire en un plano medio perpendicular a la hoja en la configuración con tricomas cuando se introduce un perfil de velocidades con origen en la superficie de la hoja (perfil semejante al que se introduce en la configuración sin tricomas). La figura **b** representa en detalle donde se hace nula la velocidad por debajo de la capa de tricomas

---

## **APÉNDICE B**

---

# **Tablas**

---

Hora	Enero			Marzo			Mayo			Julio			Septiembre			Noviembre		
	HR [%]	V [m s <sup>-1</sup> ]	HR [%]	V [m s <sup>-1</sup> ]	HR [%]	V [m s <sup>-1</sup> ]	HR [%]	V [m s <sup>-1</sup> ]	HR [%]	V [m s <sup>-1</sup> ]	HR [%]	V [m s <sup>-1</sup> ]	HR [%]	V [m s <sup>-1</sup> ]	HR [%]	V [m s <sup>-1</sup> ]		
4	89,0	1,92	84,3	1,94	84,6	1,62	80,0	1,66	85,3	1,35	88,5	1,87						
8	89,7	1,95	84,4	1,84	74,8	2,26	70,0	2,23	82,3	1,60	89,1	1,88						
12	76,5	3,00	57,9	2,05	53,0	3,09	48,6	2,76	56,2	2,67	71,2	3,19						
16	67,7	3,24	47,2	3,76	44,1	3,46	35,9	3,12	43,7	2,87	63,9	3,08						
20	82,2	2,22	64,1	2,34	57,5	2,56	46,1	2,78	61,9	1,92	81,0	2,08						
24	87,0	2,09	77,8	2,17	75,2	2,00	68,4	2,15	77,4	1,71	86,3	1,95						

Cuadro B.1: Valores medios horarios de la humedad relativa (HR) y la velocidad del viento (V) en Montañaña (Zaragoza) a lo largo del año (Periodo 1995-2015). Estos datos han sido medidos a 2 m sobre el suelo (200 m sobre el nivel del mar)

Símbolo	Descripción	Magnitud
$\lambda$	Recorrido libre medio del aire (1 atm, 20°C, 50 % HR)	$6,544 \cdot 10^{-8}$ m
$D_{CO_2}$	Coeficiente de difusión mísica del CO <sub>2</sub> en aire (1 atm, 25°C)	$0,000016575$ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$D_{H_2O}$	Coeficiente de difusión mísica del H <sub>2</sub> O en aire (1 atm, 25°C)	$0,0000252$ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
$\nu$	Viscosidad cinemática del aire seco (1 atm, 25°C)	$0,0000155$ m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Sc <sub>CO<sub>2</sub></sub>	Número de Schmidt del CO <sub>2</sub> (25°C)	0,94
Sc <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Número de Schmidt del H <sub>2</sub> O (25°C)	0,62
$\rho$	Densidad del aire seco (1 atm, 25 °C)	$1,1844$ kg m <sup>-3</sup>
PM <sub>CO<sub>2</sub></sub>	Masa molar del CO <sub>2</sub>	$44,01$ g mol <sup>-1</sup>
PM <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Masa molar del H <sub>2</sub> O	$18,02$ g mol <sup>-1</sup>

Cuadro B.2: Valores numéricos de constantes, coeficientes y propiedades de las especies químicas H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>

Medida experimental			Condiciones ambientales	
Flujo de CO <sub>2</sub> [μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Flujo de H <sub>2</sub> O [mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	WUE [g CO <sub>2</sub> / kg H <sub>2</sub> O]	Temperatura [°C]	HR [%]
15,87	3,59	10,8	25	60

Cuadro B.3: Datos experimentales del flujo de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (por unidad de superficie de hoja) intercambiados a través de los estomas en las hojas de *Quercus ilex*. Proporcionados por la Unidad de Recursos Forestales del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria del Gobierno de Aragón (CITA)

Velocidad [m s <sup>-1</sup> ]	Re	¿Existe capa límite?	¿Laminar o turbulenta?
0,1	$4 \cdot 10^2$	No	-
0,5	$2 \cdot 10^3$	Si	Laminar
1	$4 \cdot 10^3$	Si	Laminar
4	$2 \cdot 10^4$	Si	Laminar

Cuadro B.4: Tipo de capa límite (en caso de existir) en función de la velocidad del viento, considerando una longitud de hoja de 6 cm y la viscosidad del aire seco a 25°C

Caso	Variable	Unidades	Valor
0,5 m s <sup>-1</sup> 60 % HR	$Y_{a,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0116
	$Y_{a,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,00061
	$u_a$	m s <sup>-1</sup>	0,5
	$Y_{h,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,01906
	$Y_{h,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0005044
1 m s <sup>-1</sup> 40 % HR	$Y_{a,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0076
	$Y_{a,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,00061
	$u_a$	m s <sup>-1</sup>	1
	$Y_{h,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,01287
	$Y_{h,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0005353
1 m s <sup>-1</sup> 60 % HR	$Y_{a,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0116
	$Y_{a,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,00061
	$u_a$	m s <sup>-1</sup>	1
	$Y_{h,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,01687
	$Y_{h,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0005353
1 m s <sup>-1</sup> 75 % HR	$Y_{a,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0147
	$Y_{a,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,00061
	$u_a$	m s <sup>-1</sup>	1
	$Y_{h,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,01997
	$Y_{h,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0005353
4 m s <sup>-1</sup> 60 % HR	$Y_{a,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0116
	$Y_{a,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,00061
	$u_a$	m s <sup>-1</sup>	4
	$Y_{h,H_2O}$	kg <sub>H<sub>2</sub>O</sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,01424
	$Y_{h,CO_2}$	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> kg <sub>aire</sub> <sup>-1</sup>	0,0005726

Cuadro B.5: Datos usados para calcular los perfiles de velocidades y fracciones másicas de las configuraciones con y sin tricomas para los casos con viento paralelo a la superficie de la hoja