



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Azcapotzalco**

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

**“Estructura del Flujo y Dinámica de los Vórtices
en el Borde de Ataque de Semillas Autorrotantes
(*Swietenia macrophylla*)”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN TERMOFLUIDOS

PRESENTA:

ING. ERICK SALCEDO ÁLVAREZ

DIRECTOR:

DR. LORENZO ALBERTO MARTÍNEZ SUÁSTEGUI

MÉXICO D. F. MAYO DEL 2011





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D.F siendo las 13 horas del día 11 del mes de Mayo del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME- Unidad

Azcapotzalco para examinar la tesis titulada:

Estructura del Flujo y Dinámica de los Vórtices en el Borde de Ataque de Semillas Autorrotantes (Swietenia Macrophylla)

Presentada por el alumno:

Salcedo

Apellido paterno

Álvarez

Apellido materno

Erick

Nombre(s)

Con registro:

A	0	9	0	3	1	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante :

al Grado de Maestro en Ciencias en Termofluidos

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui

Primer vocal

Dr. Oscar Eladio Bautista Godínez

Secretario

Dr. Eric Gustavo Bautista Godínez

Segundo vocal

Dr. Abraham Medina Ovando

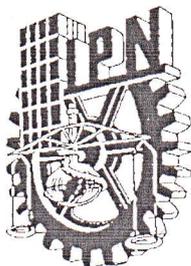
Presidente

Dr. René Osvaldo Vargas Aguilar

Tercer vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Jaime Pacheco Martínez



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 14 del mes Abril del año 2011, el que suscribe **Erick Salcedo Álvarez**, alumno del programa de la **Maestría en Ciencias en Termofluidos**, con número de registro **A090311** y adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME Unidad Azcapotzalco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del **Dr. Lorenzo Alberto Martínez Suástegui** y cede los derechos del trabajo titulado: **“Estructura del Flujo y Dinámica de los Vórtices en el Borde de Ataque de Semillas Autorrotantes (*Swietenia macrophylla*)”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas, o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo al siguiente correo: esalcedoalvarez@gmail.com o martinezlorenzo@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Erick Salcedo Álvarez

Índice general

Nomenclatura	VIII
Abstract	X
Resumen	XI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Motivación	4
1.3. Objetivos	5
2. Materiales y métodos	7
2.1. Recolección y almacenamiento de las muestras	7
2.2. Diseño Experimental	7
2.2.1. Adquisición de imágenes	10
2.2.2. Procesamiento de datos	12
2.3. Geometría y cinemática de las semillas	12
3. Resultados	15
3.1. Estructura del flujo (vectores en 3D)	15
3.1.1. Perspectivas empleadas	15
3.1.2. Campos instantáneos de velocidad	16
3.1.3. Campos instantáneos de vorticidad	27
3.1.4. Líneas de corriente seccionales	29
3.1.5. Convoluciones integrales de línea	30
3.2. Estelas aguas abajo (vectores en 2D)	31
3.3. Coeficientes de fuerza vertical	32
3.3.1. Coeficientes de fuerza vertical basados en el área en planta de las muestras	32
3.3.2. Coeficientes de fuerza vertical basados en el área de disco de las muestras	36

4. Conclusiones	39
Referencias	39
A. Cálculo del número de Reynolds	47
B. Criterios de identificación de vórtices	49
B.1. Criterio de vorticidad Z	49
B.2. Criterio Lambda 2	50
B.3. Método de intensidad del remolino	51
B.4. Criterio de la segunda invariante Q	51

Índice de figuras

2.1. Diagrama esquemático del diseño experimental. 1) Generador de humo. 2) Ventilador turboaxial. 3) Reóstato. 4) Láser. 5,6) Cámara 1 y 2, respectivamente.	9
2.2. Vista superior de la sección de prueba del túnel de viento y sistema de ejes coordenados.	10
2.3. Posiciones en las cuales se realizaron mediciones a lo largo de la envergadura: a) vista inferior de la semilla, b) vista superior de la semilla	11
2.4. Geometría y cinemática de las semillas de caoba	13
3.1. Perspectivas frontales y traseras de visualización del flujo . . .	16
3.2. Vectores del flujo en la base para la perspectiva frontal y contornos de la componente instantánea de velocidad longitudinal	17
3.3. Vectores del flujo en la base para la perspectiva trasera y contornos de la componente instantánea de velocidad longitudinal	18
3.4. Vectores del flujo en $0.5R$ para la perspectiva frontal y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente	20
3.5. Vectores del flujo en $0.5R$ para la perspectiva trasera y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente	20
3.6. Vectores del flujo en $0.75R$ para la perspectiva frontal y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente	23
3.7. Vectores del flujo en $0.75R$ para la perspectiva trasera y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente	23

3.8. Vectores del flujo en $0.875R$ para la perspectiva frontal y contornos de la componente instantánea de velocidad longitudinal	24
3.9. Vectores del flujo en $0.875R$ para la perspectiva trasera y contornos de la componente instantánea de velocidad transversal	25
3.10. Vectores del flujo en R para la perspectiva frontal y trasera junto con los contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente	26
3.11. Vectores de flujo y contornos de los campos de vorticidad en la base de la semilla, en $0.25R$ y en $0.5R$	28
3.12. Vectores de flujo y contornos de los campos de vorticidad para $0.75R$, $0.875R$ y para la punta de la semilla	28
3.13. Líneas de corriente seccionales para diferentes regiones de la envergadura	29
3.14. Convoluciones integrales de línea para diferentes regiones de la envergadura	30
3.15. Estelas aguas abajo y contornos de velocidad y vorticidad	31
3.16. Componentes de velocidad que actúan sobre el aspa	32
3.17. Coeficientes de fuerza vertical en función del número de Reynolds	35
3.18. Coeficientes de fuerza vertical en función de la carga alar	35
3.19. Velocidad de corriente libre en función de la carga alar	36
3.20. Coeficientes de fuerza vertical en función del número de Reynolds	37
3.21. Coeficientes de fuerza vertical en función de la carga alar	37
3.22. Velocidad de la corriente libre en función de la carga alar	38

Índice de cuadros

2.1. Dimensiones y características aerodinámicas de las semillas de caoba (<i>Swietenia macrophylla</i>)	14
A.1. Densidad del aire a diferentes alturas	48

Nomenclatura

AR	relación de aspecto (ℓ/c)
c	cuerda media (m)
C_D	coeficiente de arrastre
C_T	coeficiente de fuerza vertical
C_{TP}	coeficiente de fuerza vertical para área en planta
C_{TD}	coeficiente de fuerza vertical para área de disco
D	fuerza de arrastre (N)
g	magnitud de la aceleración gravitacional (m/s^2)
ℓ	longitud total de la semilla (m)
L	fuerza de sustentación (N)
LE	borde de ataque
LEV	vórtice en el borde de ataque
m	masa (kg_m)
PIV	velocimetría por imágenes de partículas
Q	segunda invariante de $\nabla\bar{v}$
R	longitud de la base de la semilla a su punta (m) (ver Fig. 2.3)
R_D	distancia del centro de gravedad de la semilla a su punta (m) (ver Fig. 2.4)
Re	número de Reynolds basado en la cuerda media, $Re = U_\infty c/\nu$
rps	revoluciones por segundo
S	área proyectada de la semilla (m^2)
S_D	área proyectada de la semilla en rotación (m^2)
t	tiempo (s)
T	fuerza vertical (N)
TE	borde de salida
TEV	vórtice en el borde de salida
U	componente de velocidad longitudinal (m/s) (ver Fig. 2.2)
U_T	velocidad relativa o velocidad total (m/s) (ver Eq. 3.1)
U_∞	velocidad de la corriente libre o velocidad terminal de la semilla (m/s)
\bar{v}	vector velocidad
V	componente de velocidad transversal (m/s) (ver Fig. 2.2)
w	peso de la semilla (kg_f)
W	componente de velocidad normal al plano x, y (m/s) (ver Fig. 2.2)
W_L	carga alar (N/m^2)
W_{LD}	carga de disco (N/m^2)
x, y, z	coordenadas rectangulares Cartesianas (ver Fig. 2.2)

Letras Griegas

α	ángulo en el borde de ataque en la punta (ver Fig. 2.4)
β	ángulo de conicidad (ver Fig. 2.4)
γ	ángulo en el borde de ataque en la base (ver Fig. 2.4)
μ	viscosidad dinámica
ν	viscosidad cinemática
∇	operador gradiente
ρ	densidad del aire
σ	solidez (S/S_D)
ϕ	ángulo de la velocidad total con respecto a la horizontal (ver Fig. 3.16)
ω	vector vorticidad ($\nabla \times \bar{v}$)
Ω	velocidad angular en revoluciones por segundo

Subíndices

i, j, k	coordenadas espaciales
-----------	------------------------

Abstract

An experimental investigation of near and far field aerodynamics of wind dispersed seeds has been performed using digital stereoscopic particle image velocimetry (DSPIV). As they fall, the spinning seeds generate a prominent leading-edge vortex (LEV) which is responsible for augmenting lift forces. In this work, the three-dimensional (3D) flow structures around free falling autorotating Mahogany seeds in a vertical wind tunnel are revealed for the first time. The results show that the LEV system is comprised of two vortical elements: one primary vortex at the leading edge and one minor vortex at the trailing edge. Thrust coefficients of the seeds were obtained using the measured lift and drag coefficients, and terminal velocities were calculated as a function of the Reynolds number and wing loading. Our experimental findings indicate that the size of the LEV is larger than predicted in previous two-dimensional (2D) studies. It is pointed out that studying pronounced 3D flow using 2D approximations is prone to errors.

Resumen

En este trabajo se realizó un estudio experimental de la aerodinámica de semillas dispersadas por el viento empleando velocimetría estereoscópica digital por imágenes de partículas (DSPIV, por sus siglas en inglés). Al caer, las semillas autorrotantes generan un prominente vórtice en el borde de ataque (LEV, por sus siglas en inglés), el cual es responsable de que éstas generen altos coeficientes de sustentación. En este trabajo se reporta por primera vez la estructura del flujo alrededor de semillas autorrotantes de caoba en caída libre, empleando un túnel de viento vertical. Los resultados muestran que el sistema del LEV está conformado por dos vórtices: uno primario en el borde de ataque y otro secundario en el borde de salida. Se calcularon coeficientes de sustentación y velocidades terminales de las semillas en función del número de Reynolds y de la carga alar. Las mediciones experimentales indican que el tamaño del LEV es mayor que el predicho en estudios previos en dos dimensiones (2D) y se concluye que estudiar flujos tridimensionales empleando aproximaciones en 2D puede ocasionar que se subestimen las dimensiones del LEV.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Es interesante observar cómo algunas semillas giran rápidamente cuando caen. Este tipo de semillas se denominan autorrotantes. Autorrotación es la rotación continua sin emplear potencia externa de un cuerpo expuesto a una corriente libre. Al emplear este mecanismo de rotación estable las semillas reducen la velocidad de caída y logran incrementar la distancia que pueden ser transportadas por el aire, evitando competir con sus propios padres por nutrientes, luz y agua. Si se toma en cuenta que las semillas autorrotantes son muy pequeñas y viajan a velocidades relativamente bajas, éstas sorpresivamente generan una sustentación muy elevada [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Este mecanismo es un patrón evolutivo que se ha observado en múltiples plantas. En este sentido, las semillas autorrotantes son similares a las alas de los insectos, ya que éstos también generan coeficientes de sustentación muy elevados si se toma en cuenta que el área de sus alas también es relativamente pequeña. Los insectos logran alta sustentación generando un vórtice en el borde de ataque (LEV, por sus siglas en inglés). Los LEV's son fenómenos comunes en la naturaleza del cual se valen algunos organismos para generar sustentación. Esta estructura es muy conocida tanto por biólogos como por ingenieros aeronáuticos y ha sido estudiada ampliamente tanto experimental como numéricamente [7, 8].

La distancia de dispersión de las semillas es un aspecto fundamental de la evolución y conservación de las plantas [9, 10]. Con el fin de aumentar su distancia de dispersión, las samaras (o semillas con alas) comienzan a girar

y a descender muy lentamente al desprenderse de los frutos. Las semillas de caoba empiezan a autorrotar alrededor de su centro de gravedad casi inmediatamente después de ser liberadas de su árbol padre mediante la creación de un LEV que es similar a las estructuras de flujo que son responsables de la gran sustentación generada por las alas de los insectos como las moscas [11], libélulas [12], mariposas [13, 14], algunas aves [15, 16] y murciélagos [17, 18]. Desde que Ellington et al. [19] descubrieron la presencia de un LEV en las alas de un modelo a escala de una palomilla (*Manduca sexta*), el LEV ha sido identificado como el responsable de la generación de una fuerza de sustentación muy grande en comparación con los perfiles aerodinámicos convencionales y ha sido objeto de múltiples investigaciones [20, 21]. El retraso de la entrada en pérdida es el mecanismo transitorio que ha sido reconocido como el responsable de que el LEV permanezca fijo sobre las alas. L. Carr y W. McCroskey [22, 23] realizaron los primeros estudios acerca del fenómeno de entrada en pérdida dinámica, encontrando que se trataba de un comportamiento transitorio no estudiado hasta ese momento. Actualmente, se sabe que este régimen es dominado por un mecanismo transitorio. Ellington [24] encontró que la sustentación en el vuelo de insectos es significativamente más alta que la predicha por la teoría aerodinámica cuasi-estacionaria y sugirió la importancia que tiene el fenómeno de flujo transitorio en el proceso de generación de la fuerza de sustentación. Los estudios realizados en dos dimensiones (2D) han mostrado que el crecimiento del LEV comienza con el inicio de la traslación, continúa hasta que el vórtice se vuelve inestable en un extremo del ala y finalmente se desprende del borde de ataque perdiéndose en la estela [25]. Van den Berg y Ellington [26] reportaron la presencia de un pequeño pero claro LEV en un modelo mecánico de una palomilla (*Manduca sexta*), el cual crecía en diámetro a razón de 10 a 50% de la cuerda media del ala a lo largo de la envergadura y ubicado entre el 25 y 75% de ésta. Sus observaciones sugirieron la presencia de flujo en espiral. Se sabe que el mecanismo que permite la permanencia prolongada del LEV sobre las samaras es muy parecido al mecanismo con el que operan las alas delta con relación de aspecto pequeña [27, 28], donde la presencia de un flujo en espiral a lo largo de la envergadura y sobre el borde de ataque drena energía desde el núcleo del LEV hasta que éste se desprende en la punta del ala [29]. Birch y Dickinson [30] encontraron que la estructura de este flujo a lo largo de la envergadura toma diferentes formas dependiendo del valor del número de Reynolds. Para números de Reynolds relativamente altos, el flujo a lo largo de la envergadura es mayor en el núcleo del LEV y crea una estructura de flujo en espiral.

Sin embargo, para alas que operan a números de Reynolds relativamente bajos, el LEV permanece pegado a la parte superior de la envergadura del ala debido a un balance entre la vorticidad generada por el borde de ataque y el transporte de vorticidad hacia la estela por la vorticidad generada en el borde de salida.

Se han realizado varios estudios con el fin de caracterizar el fenómeno transitorio del vuelo de insectos. Dickinson [31] investigó los parámetros rotacionales midiendo las fuerzas en un modelo que asemeja las alas de las moscas (*Drosophila Melanogaster*). Sus resultados muestran que el eje de rotación, la velocidad de rotación y el ángulo de ataque durante la traslación son de gran importancia en el desarrollo de la fuerza de sustentación. Lan y Sun [32] investigaron numéricamente las propiedades aerodinámicas de un ala con una relación de aspecto relativamente pequeña durante movimientos transitorios típicos a bajos números de Reynolds. Sus resultados muestran que para números de Reynolds relativamente pequeños existen perfiles aerodinámicos que pueden producir una fuerza aerodinámica tan efectiva como la que se genera en flujos con grandes números de Reynolds. Bomphrey et al. [33] realizaron experimentos usando humo como trazador para describir la topología del flujo de abejorros en vuelo libre y sugirieron que la rotación de sus alas juega un papel importante en la formación del LEV. Lentink y Gerritsma [34] variaron la geometría de un perfil aerodinámico cuya amplitud y frecuencia eran similares a las de las moscas empleando un movimiento exclusivamente de traslación. Los autores concluyeron que ésto no podría arrojar resultados realistas, razón por la cual concluyeron que la rotación es esencial en la formación de LEVs.

La técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV, por sus siglas en inglés) es muy atractiva en el campo de la aerodinámica moderna, sobre todo para entender fenómenos transitorios como la separación que sucede en modelos con grandes ángulos de ataque [35]. Esta técnica ha sido ampliamente usada para estudiar los flujos de aire inducidos por las alas batientes tanto de modelos mecánicos como animales en vuelo libre o atados. Lu y Shen [36] estudiaron experimentalmente las estructuras en tres dimensiones (3D) del flujo y la evolución del LEV en una ala batiente para la condición de vuelo estacionario. Sus resultados mostraron que el LEV es una colección de cuatro vórtices: uno primario y tres secundarios. Lu et al. [37] realizaron mediciones con PIV en 2D en alas batientes empleando inyección de tinta para trazar el flujo. Sus resultados revelaron las características de la región del LEV, a la vez que confirmaron la existencia de un LEV dual. Salman et al. [38] estu-

diaron experimentalmente el flujo alrededor de un ala rotante con velocidad angular constante y describieron las características del LEV para dos valores del número de Reynolds ($Re = 500$ y $Re = 15000$). Lentink y Dickinson [39] hicieron visualización y mediciones en el flujo de un ala batiente e indicaron que la aceleración angular es el mecanismo responsable de estabilizar el LEV, sugiriendo que el empleo de LEVs representa una solución aerodinámica convergente en la evolución del desempeño de vuelo tanto en aves como en plantas. Las características aerodinámicas de las semillas autorrotantes han sido analizadas teóricamente y experimentalmente [40]. Recientemente, Lentink et al. [41] identificaron al LEV como el responsable de la generación de altos coeficientes de sustentación en semillas autorrotantes. Los autores reportaron que el LEV envuelve el borde de ataque produciendo una recirculación que induce un vórtice. Sin embargo, el objetivo de ese trabajo fue la identificación del LEV y no el estudio de su estructura.

1.2. Motivación

El vuelo ágil dentro de edificios, cuevas y túneles tiene un gran valor militar y civil debido a que la tecnología actual de vigilancia (como satélites o vehículos aéreos no tripulados) no cuenta con la posibilidad de recopilar información dentro de recintos cerrados, en donde un control de vuelo preciso y la autonomía de vuelo se requieren para llevar a cabo de manera exitosa misiones de reconocimiento. Por otro lado, los insectos vuelan a velocidades bajas, cuentan con una maniobrabilidad extraordinaria, son virtualmente silenciosos y la mayoría de ellos son capaces de mantener el vuelo en suspensión. Esto nos conduce a una nueva forma de abordar la teoría aerodinámica, ya que el vuelo empleando alas móviles como el de los insectos ofrece una eficiencia de potencia significativa, particularmente a velocidades bajas en comparación con aeronaves de alas fijas o que emplean rotores [42, 43]. El vuelo de los insectos basado en alas móviles ha estado presente en la naturaleza por más de 350 millones de años y existe evidencia fósil que sugiere que ha cambiado muy poco a lo largo del tiempo [44]. Estudios previos han concluido que el vuelo semejante al de los insectos (empleando alas móviles) es el modo óptimo para cumplir esta tarea, debido a que las aeronaves que emplean alas fijas no tienen la agilidad requerida a bajas velocidades y los helicópteros miniatura son demasiado ineficientes y ruidosos. Los microvehículos de alas móviles (MAVS, por sus siglas en inglés) son pequeñas

máquinas voladoras de no más de 15 cm que utilizan alas móviles parecidas a las de los insectos y cuyas características son que tienen un tamaño pequeño, emplean bajas velocidades de vuelo, tienen capacidad de mantener el vuelo en suspensión, son muy silenciosos y pueden soportar cargas relativamente grandes. La viabilidad de los MAVs se ha hecho realidad gracias a los avances en las micro-tecnologías (como cámaras CCD miniatura, sensores infrarrojo y detectores de sustancias peligrosas). Esto ha ocasionado un sin número de aplicaciones militares y de vigilancia, tales como la detección de armas biológicas, detección de armas químicas, monitoreo de la calidad del aire y misiones de búsqueda y rescate en edificios que han colapsado. Debido a esto, el estudio de la caída y dispersión de semillas autorrotantes es de gran interés por sus aplicaciones en el desarrollo de los MAVs. Cabe mencionar que existen algunos MAVs ya desarrollados inspirados en samaras [45], sin embargo, el mecanismo de vuelo de éstas no está del todo claro ni mucho menos el mecanismo responsable de la estabilidad del LEV. El propósito principal de este trabajo de investigación es el de describir a detalle el mecanismo tridimensional generador de sustentación en semillas de caoba.

1.3. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo son:

- Realizar mediciones empleando PIV para estudiar la estructura tridimensional del flujo alrededor de semillas autorrotantes de caoba en caída libre e identificar el mecanismo responsable de que el LEV permanezca adherido a la parte superior de la envergadura.
- Obtener contornos de velocidad longitudinal, transversal, y normal al plano de medición para diferentes secciones de la envergadura.
- Obtener contornos de vorticidad, líneas seccionales de corriente, y las convoluciones integrales de línea para diferentes secciones de la envergadura.
- Describir la estela aguas abajo con respecto a la velocidad de la corriente libre de semillas de caoba.
- Reportar coeficientes de fuerza vertical de semillas de caoba basados en el área en planta y en el área de disco de las muestras.

Capítulo 2

Materiales y métodos

2.1. Recolección y almacenamiento de las muestras

Las semillas de caoba (*Swietenia macrophylla*) se obtuvieron del bosque tropical perennifolio de la zona central del estado de Veracruz, México. La recolección consistió en buscar frutos maduros para obtener las semillas en un estado intacto. Posteriormente, las semillas fueron almacenadas en envases de cristal dentro de un humidificador para evitar la formación de hongos y evitar que éstas pierdan humedad. Cabe mencionar que no existen dos semillas que sean geoméricamente iguales. Debido a la configuración que éstas adquieren al almacenarse dentro del fruto, éstas no rotan en el mismo sentido. Algunas rotan en sentido horario mientras otras lo hacen en sentido contrario, razón por la cual antes de realizar los experimentos se hizo una selección exhaustiva mediante observación y comparación en la que se escogieron 20 ejemplares maduros con características de tamaño y sentido de rotación similares.

2.2. Diseño Experimental

Para estudiar la estructura del flujo alrededor de semillas en caída libre se fabricó un túnel de viento vertical con una sección de prueba cuadrada de acrílico con dimensiones de 0.58 x 0.58 m de base y 0.50 m de altura. El túnel cuenta con una longitud para el desarrollo y alineación del fluido de 1.2 m desde la salida del ventilador hasta donde se encuentran los correctores de

flujo que se ubican justo antes de la sección de prueba [46]. A la entrada del túnel de viento se colocó un ventilador turboaxial con un diámetro de 0.56 m y un motor de 0.5 HP. Para los alineadores de flujo se tomó un patrón mejor conocido como panal de abeja que consiste en colocar varios tubos de 6 mm de diámetro y 30 cm de largo juntos para que éstos abarquen toda el área de la sección transversal del túnel justo antes de que el fluido entre en la sección de prueba. De esta manera se logró un flujo completamente vertical. Antes de realizar los experimentos se probó la eficacia de los correctores de flujo y la intensidad de turbulencia medida dentro de la sección de prueba, la cual fue de aproximadamente 1%. El diagrama esquemático del diseño experimental se muestra en la Fig. 2.1. Como las semillas inician un movimiento de autorrotación inmediatamente después de ser expuestas a una corriente libre, se pudo ubicar a las semillas en una posición específica de la sección de prueba ajustando la velocidad de la corriente libre. Ésta se manipuló empleando un reóstato acoplado al ventilador turboaxial. Al variar la potencia del ventilador se pudo igualar la velocidad de la corriente libre con la velocidad terminal de cada muestra. De esta manera, se logró que las semillas permanezcan suspendidas rotando a la misma altura. El intervalo de velocidades terminales para veinte muestras fue de 1.2-1.6 m/s, lo que corresponde a un intervalo de números de Reynolds de $1474 \leq Re \leq 1866$. El número de Reynolds se define como $Re = U_\infty c / \nu$, donde c es la cuerda media de cada ejemplar, U_∞ es la velocidad terminal de la semilla y ν es la viscosidad cinemática (ver Apéndice A). Como las semillas de caoba tienen un ligero desplazamiento lateral al caer, para lograr realizar mediciones a lo largo de posiciones específicas de la evergadura fue necesario fijarla empleando un hilo de pescar de 0.3 mm de espesor (Araty Superflex Fishing line, Brazil) que atravieza a la semilla a lo largo de su centro de rotación. Para reducir errores en las mediciones, el láser y las cámaras se mantuvieron fijos y el túnel de viento se montó en un sistema de traslación. Al mover el túnel de viento en dirección perpendicular al plano láser se logró realizar mediciones del flujo a lo largo de múltiples secciones de la evergadura de la semilla sin necesidad de desplazar el sistema de PIV, evitando así tener que calibrar para cada medición. Se utilizó un sistema de PIV marca Dantec Dynamics para medir componentes de velocidad en tres dimensiones. El sistema PIV consiste en un láser de 200 mJ de doble pulso Nd:YAG (New Wave Gemini) con una longitud de onda de 532 nm y equipado con una lente cilíndrica que produce un haz de luz divergente (plano de iluminación) con un espesor de 6 mm. El plano iluminado por el láser se colocó paralelo a la dirección de la co-

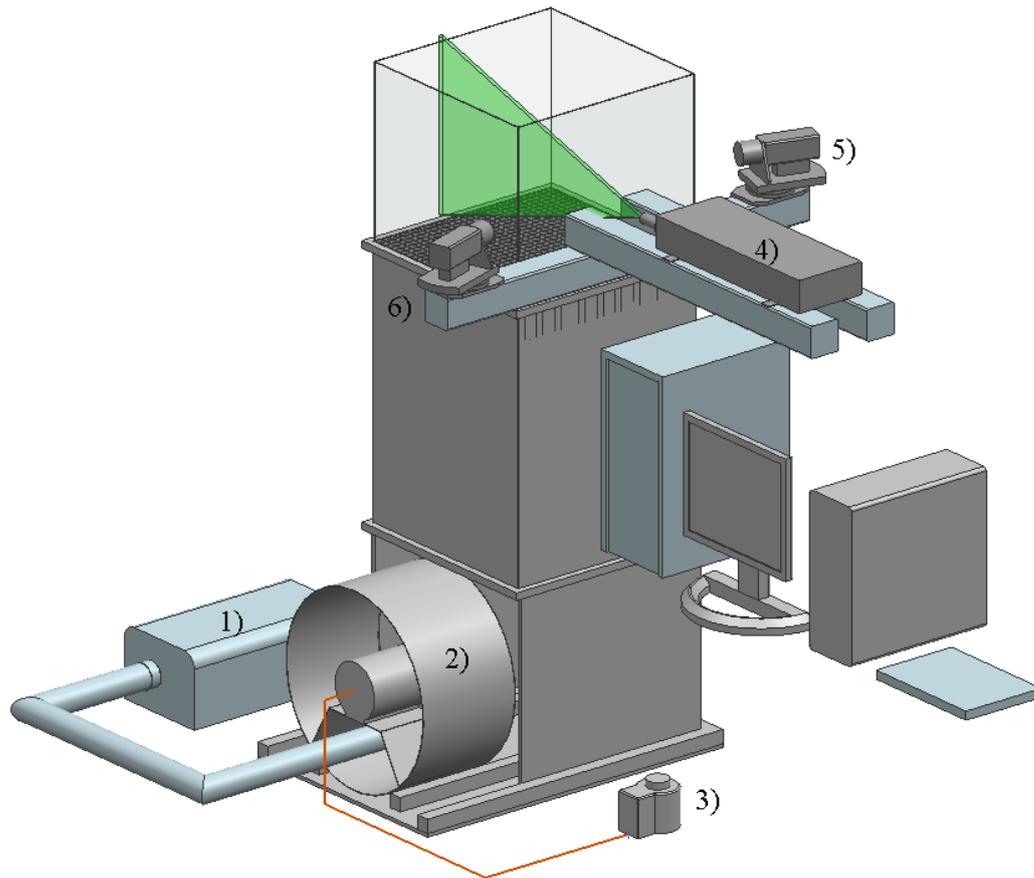


Fig. 2.1: Diagrama esquemático del diseño experimental. 1) Generador de humo. 2) Ventilador turboaxial. 3) Reóstato. 4) Láser. 5,6) Cámara 1 y 2, respectivamente.

riente libre. Para la estructura del flujo, todas las mediciones fueron hechas empleando un intervalo de separación entre pulsos de $50 \mu\text{s}$. Para el estudio de las estelas aguas abajo con respecto a la velocidad de la corriente libre (o velocidad terminal de la semilla), el intervalo de separación entre pulsos empleado fue de $500 \mu\text{s}$. Para controlar al láser y las cámaras para la adquisición de datos se empleó software de Dantec Dynamics (DynamicStudio, versión 3.0.69). La sincronización entre el láser y la cámara se logró empleando un trigger automatizado de 5 volts equipado con un sensor de posición infrarrojo que incluye un generador de pulsos digital (Sharp GP2Y0A21). De esta manera se logró que todos los pares de imágenes adquiridos sean gra-

bados cada vez que la semilla complete una revolución. La Fig. 2.2 muestra el sistema de ejes coordenados y la posición de la semilla cuando el trigger genera un pulso accionando de manera sincronizada tanto el láser como las cámaras. Cabe mencionar que debido a que las mediciones fueron realizadas en tres dimensiones, la posición de la semilla cuando el trigger genera un pulso es arbitraria, ya que la estructura tridimensional del flujo se obtiene a partir de las imágenes adquiridas con ambas cámaras. Obsérvese que la semilla gira en sentido horario con respecto de su centro de rotación.

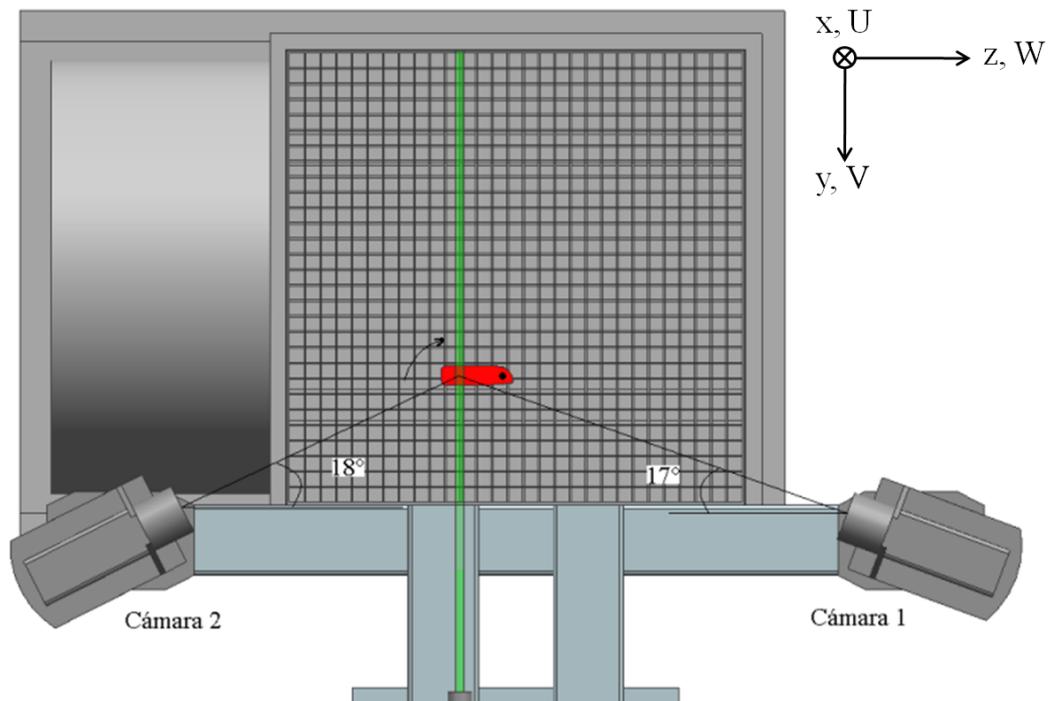


Fig. 2.2: Vista superior de la sección de prueba del túnel de viento y sistema de ejes coordenados.

2.2.1. Adquisición de imágenes

Para la adquisición de los pares de imágenes se emplearon dos cámaras CCD digitales de 12 bits de objetivo doble (HiSense MKII) con una resolución de 1344 x 1024 píxeles y lentes de 60 mm. Para reducir al máximo el reflejo del láser, tanto las semillas como el hilo de pescar se pintaron color negro

mate y los lentes se equiparon con filtros monocromáticos apropiados para la longitud de onda empleada. Como el tamaño de las semillas es variable, para obtener la estructura a lo largo de toda la semilla se realizaron mediciones en distancias que corresponden a $0.25R$, $0.3R$, $0.5R$, $0.75R$ y $0.875R$, donde R es la envergadura de la semilla. Adicionalmente, se realizaron mediciones en la base y en la punta de la semilla. La Fig. 2.3 muestra las posiciones de la envergadura en las que se realizaron las mediciones. La Fig. 2.3a) muestra la vista inferior de la semilla, por lo que el borde de ataque está del lado izquierdo. En la Fig. 2.3b), el borde de ataque se encuentra del lado derecho de la semilla.



Fig. 2.3: Posiciones en las cuales se realizaron mediciones a lo largo de la envergadura: a) vista inferior de la semilla, b) vista superior de la semilla

El peso de las semillas debido a la tinta añadida incrementó para todas las muestras en aproximadamente 1%. Como trazador se emplearon partículas de aceite con una técnica de inyección directa usada para túneles de viento de baja velocidad [47]. Esta técnica consiste en introducir las partículas de

aceite (cuyo diámetro es de aproximadamente $1 \mu\text{m}$) a la entrada del túnel de viento empleando un generador de humo (Antari Z1500II Fog Machine). La cantidad de sembrado se reguló dependiendo de la señal obtenida por el sistema PIV, debido a que para este tipo de estudios es indispensable que el trazador esté distribuido de manera homogénea en el flujo y que cumpla con al menos diez partículas por área de interrogación [35].

2.2.2. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos se utilizaron áreas de interrogación de 32×32 pixeles con 50 % de traslape vertical y 25 % de traslape horizontal. Se adquirieron 10 series de 100 pares de imágenes por cada sección de la envergadura de la semilla. La repetibilidad de las mediciones se encuentra dentro del 4 % y la incertidumbre en los resultados obtenidos tiene un nivel de confiabilidad de 95 % [48]. Las componentes de velocidad en tres dimensiones y los campos de vorticidad en los diferentes cortes de la envergadura se obtuvieron con evaluaciones estadísticas hechas por el procesador del PIV. Para cada par de imágenes adquirido, se empleó un algoritmo de correlación adaptiva empleando cinco pasos de refinamiento que proporcionaban un arreglo de vectores de 55×63 . Los vectores obtenidos fueron validados empleando una evaluación de picos obtenida con la altura del pico menor relativa al pico 2 de 1.15. Los valores que no cumplían con el criterio de validación fueron reemplazados empleando un método de interpolación con siete pasos de refinamiento empleando una matriz de 3×3 con los vectores circundantes. Como resultado, el porcentaje de vectores que no cumplieron con el criterio de validación fue de 2 %. Por último, los campos de velocidad y vorticidad fueron exportados a archivos de datos para posteriormente procesarlos empleando Tecplot 360.

2.3. Geometría y cinemática de las semillas

En la Fig. 2.4 se muestra un esquema de la semilla que ilustra su geometría y cinemática al autorrotar. La geometría de la semilla está descrita por el ángulo de ataque en la punta α , que es positivo con respecto a la horizontal y el ángulo de ataque en la base γ , que es negativo con respecto a la horizontal. La variación en el valor de estos ángulos es producto de un torcimiento geométrico así como un torcimiento aerodinámico debido a la

variación en la proporción de la sección transversal de la semilla. También se observa un ángulo de conicidad β , que está dado por el ángulo de inclinación de la semilla con respecto a la horizontal. Este valor se obtuvo al adquirir imágenes de la semilla en caída libre con ambas cámaras orientadas paralelas con el plano $y-z$ (ver Fig. 2.2). La semilla gira con velocidad angular constante Ω , a 7 revoluciones por segundo. Para la obtención de este valor se empleó una cámara de alta velocidad (Redlake, HG-100K/HG-LE) con la que se tomaron fotos de la semilla en caída libre a 250 cuadros por segundo. Como se verá más adelante, ésta componente desempeña un papel muy importante en la generación de un flujo en espiral a lo largo de la envergadura. La distancia R es medida a partir de la región donde termina la sección que alberga a la semilla y al comienzo del ala. Las semillas tienen una superficie irregular con un espesor considerable muy cerca del borde de ataque que va disminuyendo conforme se acerca al borde de salida. Una descripción detallada de la cinemática y geometría de semillas autorrotantes se encuentra en [1, 3, 40, 49].

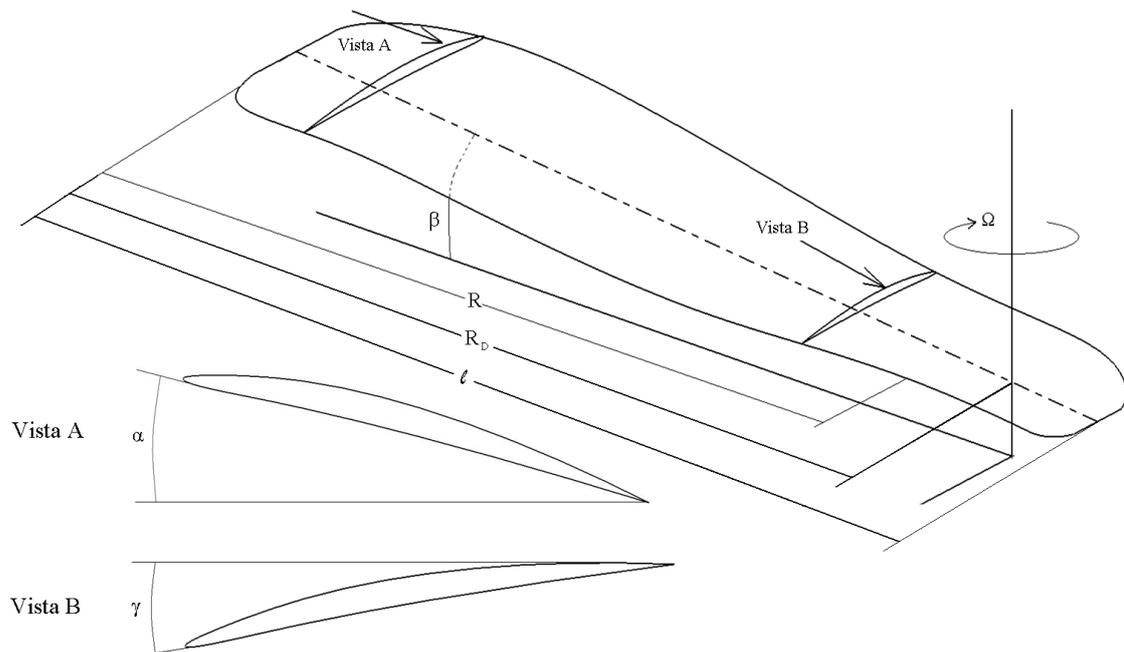


Fig. 2.4: Geometría y cinemática de las semillas de caoba

Las dimensiones y características aerodinámicas de las semillas de caoba (*Swietenia marchophylla*) se muestran en la Tabla 2.1 y son los valores promedio del total de las muestras.

valores promedio (N=20 muestras)	
masa, m (kg)	6.32E-4
área en planta, S (m ²)	1.76E-3
longitud, ℓ (m)	9.27E-2
radio de rotación, R_D (m)	7.63E-2
área de disco, S_D (m ²)	1.62E-2
solidez, $\sigma = S/S_D$	1.09E-1
relación de aspecto, AR	4.06
cuerda media, c (m)	2.29E-2
carga alar, W_L (N/m ²)	3.56
carga de disco, W_{LD} (N/m ²)	3.85E-1
ángulo de conicidad, β (grados)	20
velocidad angular, Ω (rps)	7

Tabla 2.1: Dimensiones y características aerodinámicas de las semillas de caoba (*Swietenia macrophylla*)

Capítulo 3

Resultados

3.1. Estructura del flujo (vectores en 3D)

3.1.1. Perspectivas empleadas

Como se observará más adelante, cuando se muestran flujos tridimensionales en el plano, la estructura del flujo depende de la ubicación del observador. Por esta razón, antes de presentar los campos de velocidad en 3D para diferentes secciones de la evergadura se presentarán las perspectivas empleadas. Para todos los casos, el origen de la coordenada z se encuentra ubicado en la parte central del plano iluminado por el láser. Esta coordenada es positiva en dirección hacia la base de la semilla y negativa en dirección hacia la punta de ésta. En la Fig. 3.1 se muestran ocho diferentes perspectivas, donde las vistas frontales 1f), 2f), 3f) y 4f) corresponden al flujo que se encuentra desde el origen de la coordenada z a la punta de la semilla. Por otro lado, las vistas traseras 1t), 2t), 3t), y 4t) corresponden al flujo que se encuentra desde el origen de la coordenada z hacia la base de la semilla. Esta distinción es importante, ya que en $z = 0$ se encuentran ubicados los contornos con los valores de las componentes de velocidad y vorticidad. Es importante mencionar que los campos de flujo seccionales presentados son una proyección en 2D de los vectores en 3D empleando las componentes de velocidad en el plano de interrogación.

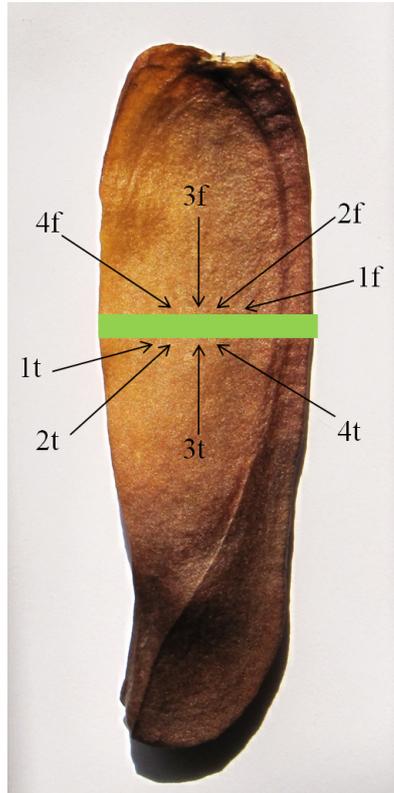


Fig. 3.1: Perspectivas frontales y traseras de visualización del flujo

3.1.2. Campos instantáneos de velocidad

Flujo en la base de la semilla

Las Figs. 3.2 y 3.3 muestran los vectores del flujo junto con los contornos de la componente de velocidad longitudinal para la perspectiva frontal y trasera, respectivamente. Como se mencionó con anterioridad, el plano con los contornos de velocidad longitudinal se encuentran ubicados en $z = 0$. En las imágenes mostradas, los contornos de velocidad longitudinal tienen un 30% de transparencia para poder distinguir entre las componentes de velocidad W negativas (vectores negros) y las componentes de velocidad W positivas (vectores claros). En todas las imágenes subsecuentes, a la región donde se encuentra la semilla se le añadió una máscara con textura de madera para facilitar la interpretación de la estructura del flujo. La imágenes ilustran cómo en la parte superior de la envergadura el flujo tiene una componente de

velocidad W negativa (hacia la punta), mientras que en las demás secciones del flujo existe una componente de velocidad W positiva (hacia la base). Este comportamiento se presenta a lo largo de todas las secciones de la envergadura, donde a partir de este patrón de alimentación de flujo se desarrollará un LEV y un TEV. Obsérvese cómo la componente de velocidad longitudinal es prácticamente nula en la parte superior de la semilla y en la estela que se forma aguas abajo con respecto a la velocidad de la corriente libre del borde de salida. La imagen 3f) muestra la ubicación del borde de ataque (LE) y del borde de salida (TE) de la semilla, en donde las fronteras de la semilla están indicadas por el contorno blanco ubicado en la parte inferior y la velocidad de la corriente libre es vertical en dirección hacia arriba.

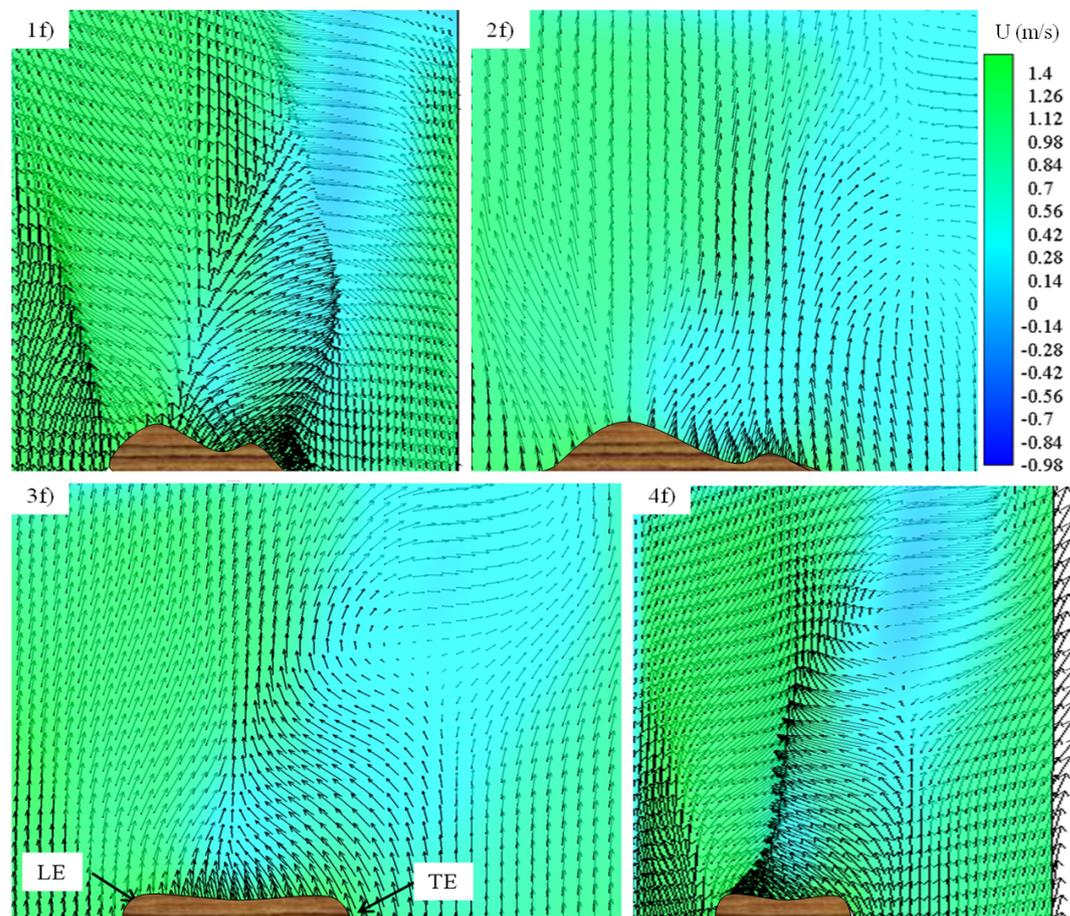


Fig. 3.2: Vectores del flujo en la base para la perspectiva frontal y contornos de la componente instantánea de velocidad longitudinal

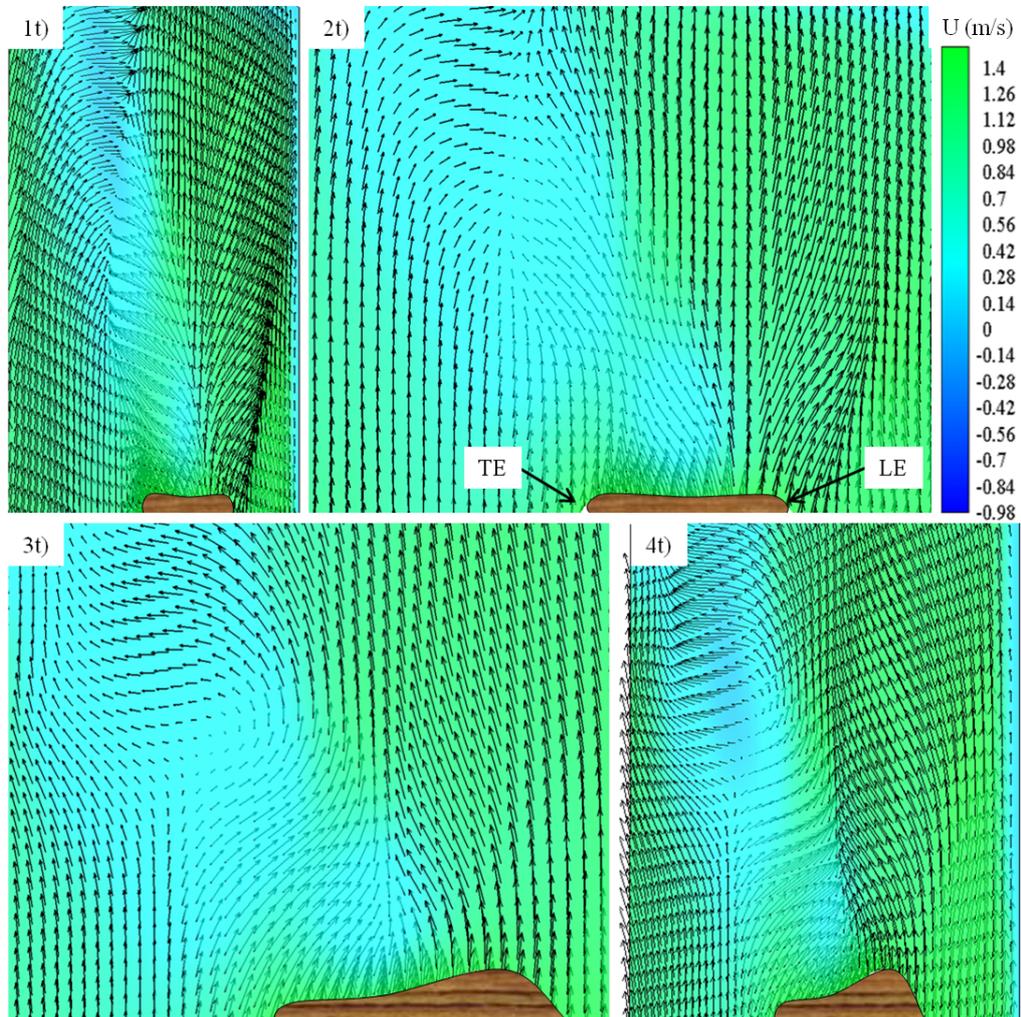


Fig. 3.3: Vectores del flujo en la base para la perspectiva trasera y contornos de la componente instantánea de velocidad longitudinal

Flujo en 0.5R

Las Figs. 3.4 y 3.5 muestran los vectores de flujo y los contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W para la perspectiva frontal y trasera, respectivamente. Los campos de flujo seccionales tienen un 30% de transparencia para que se puedan distinguir las componentes positivas y negativas de la componente de velocidad W . Las imágenes 1f)

y 1t) de las Figs. 3.4 y 3.5 ilustran los límites de influencia del LEV y del TEV en la componente longitudinal de velocidad por medio de los puntos de inflexión en los perfiles de velocidad (reversión de flujo). Aquí, la velocidad de la corriente libre es de 1.3 m/s y se encuentra dentro del intervalo de velocidades de corriente libre reportado en la literatura [1, 40, 41, 49]. En las imágenes 3f) y 3t) se puede observar la interacción entre el LEV y el TEV. Como ambos vórtices giran en sentidos opuestos, esto contribuye a evitar que el LEV se desprenda y permanezca adherido a la parte superior del perfil. Adicionalmente, la parte media inferior del LEV y la parte media superior del TEV tienen valores de la componente W negativos, mientras que para las demás secciones del flujo la componente W es siempre positiva. Al igual que para el flujo en la base de la semilla, el patrón de alimentación de flujo hacia la parte superior de la envergadura tiene una componente de velocidad W positiva del lado del borde de ataque y una componente de velocidad W negativa del lado del borde de salida. Las imágenes 4f) y 4t) ilustran cómo la componente de velocidad W es muy alta dentro del núcleo del LEV, ya que alcanza un valor de 5.6 m/s hacia la punta de la semilla, esto es, casi cinco veces la velocidad de la corriente libre. Esto ocasiona que el flujo en espiral dentro del núcleo del LEV genere una zona de recirculación de alta velocidad y de baja presión. Como resultado, los coeficientes de fuerza vertical de la semilla son considerablemente altos. Nuevamente, se puede observar la evolución de los perfiles de velocidad aguas abajo y se pueden identificar puntos de inflexión que indentifican las regiones en donde hay reversión del flujo. También, todo el flujo fuera del núcleo del LEV tiene un valor de la componente de velocidad W en sentido opuesto al del flujo en espiral (dirección hacia la base de la semilla). Como se mencionó con anterioridad, hay que tener mucho cuidado al reportar la estructura de flujos en 3D, ya que desde las perspectivas 1 y 4 (tanto frontales como traseras) no hay nada en los vectores del flujo que indique la presencia de un LEV o de un TEV. La imagen 4t) muestra cómo dentro del núcleo del LEV los vectores de velocidad son prácticamente en dirección hacia la punta de la semilla (componente de velocidad W negativa). Adicionalmente, en la parte superior del núcleo del LEV se puede ver cómo la presencia de éste afecta al flujo aguas abajo hasta una distancia de aproximadamente dos veces el tamaño del núcleo del LEV.

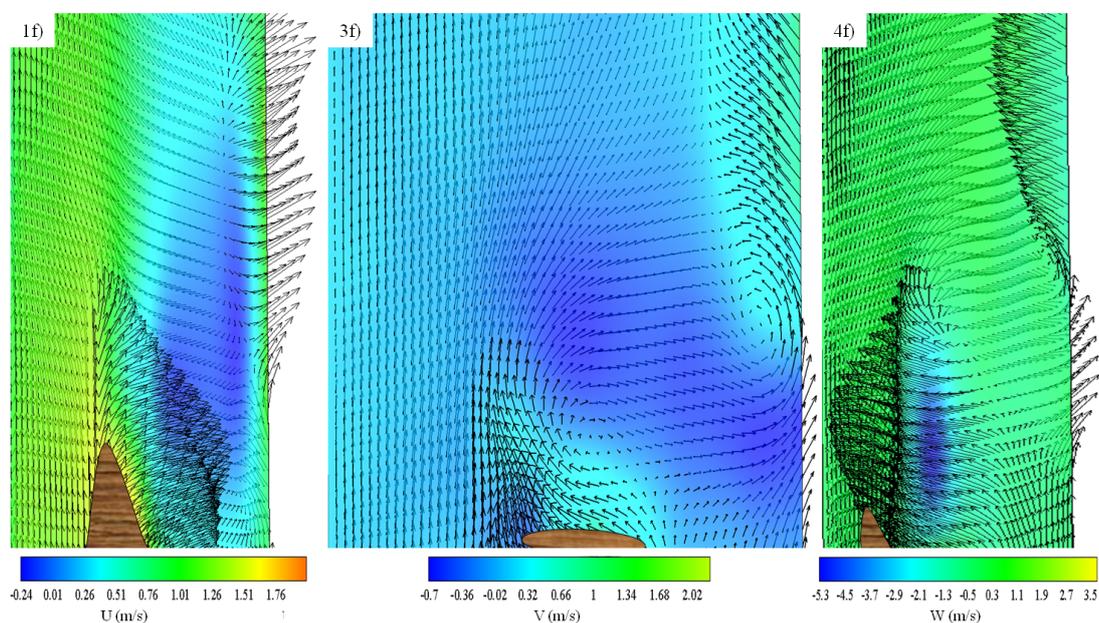


Fig. 3.4: Vectores del flujo en $0.5R$ para la perspectiva frontal y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente

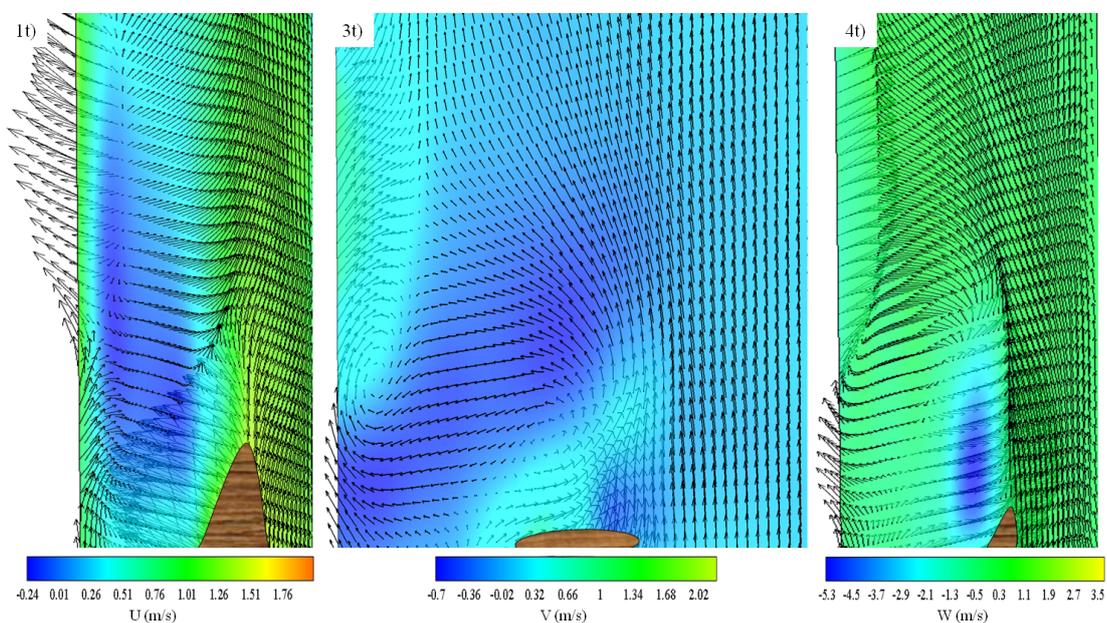


Fig. 3.5: Vectores del flujo en $0.5R$ para la perspectiva trasera y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente

Flujo en 0.75R

Las Figs. 3.6 y 3.7 muestran los vectores de flujo en 0.75R junto con los contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W para la perspectiva frontal y trasera, respectivamente. Los campos de flujo seccionales tienen un 30% de transparencia. La estela que se encuentra aguas abajo del TEV tiene una componente de velocidad transversal positiva relativamente alta, mientras que para las demás regiones del flujo la componente de velocidad transversal es negativa. Es importante mencionar que para esta sección de la envergadura las dimensiones del LEV y del TEV alcanzan un máximo y la componente de velocidad W es muy pronunciada. Como la distribución del área de la envergadura no es uniforme, esto ocasiona que la fuerza vertical resultante sea desplazada hacia la parte exterior de la semilla. Esto es perfectamente congruente con lo reportado en la literatura, ya que debido a la componente rotacional relativa sobre el ala, la mitad del valor de la fuerza vertical proviene del tercio exterior de ésta [50]. Esto es muy interesante, ya que el tamaño de la cuerda es proporcional al tamaño del núcleo del LEV y a la fuerza vertical. En ambas figuras, la mitad inferior y superior del flujo en espiral a lo largo del LEV tienen una componente de velocidad W negativa y positiva, respectivamente. Adicionalmente, en las imágenes 4f) y 4t) se puede distinguir claramente el flujo en espiral dentro del núcleo del LEV junto con la evolución de los perfiles de velocidad aguas abajo.

Flujo en 0.875R

Las Figs. 3.8 y 3.9 muestran los vectores de flujo en 0.875R para la perspectiva frontal y trasera, respectivamente. En la Fig. 3.8, el contorno de velocidad corresponde a la componente instantánea de velocidad longitudinal, mientras que en la Fig. 3.9 el contorno de velocidad corresponde a la componente instantánea de velocidad transversal. Ambas figuras tienen un 30% de transparencia para poder distinguir las componentes positivas y negativas de la componente de velocidad W . La Fig. 3.8 ilustra cómo el ángulo de ataque de la semilla es mucho mayor que el de los perfiles aerodinámicos convencionales, en donde para ángulos de ataque mayores a cinco grados empieza a haber deprendimiento de la corriente. La primera imagen de la Fig. 3.8 muestra la estructura del flujo desde la perspectiva que corresponde al plano iluminado por el láser (componente de velocidad W positiva hacia la derecha) e ilustra la influencia del LEV aguas abajo, ya que existe una com-

ponente de velocidad W hacia la punta de la semilla que desaparece después de una distancia aguas abajo de aproximadamente cinco cuerdas. La segunda imagen de izquierda a derecha (parte superior) corresponde a la vista 1f) de la Fig. 3.1. Nuevamente, para esta región de la envergadura el valor de la componente de velocidad longitudinal se encuentra dentro del intervalo de valores reportados para la corriente libre [1, 40, 41, 49]. En la tercera imagen de la Fig. 3.8 se ilustra la ubicación del borde de ataque. En la imagen 2f) se observa claramente la existencia de un TEV que gira en sentido antihorario. Es interesante cómo desde esta perspectiva no se puede distinguir la presencia de ningún LEV. En la primera imagen de izquierda a derecha (parte inferior) se indica la ubicación del borde de salida de la semilla junto con los vectores de flujo de la corriente libre. En la imagen 3f), el círculo blanco muestra la ubicación del LEV, el cual se encuentra adherido a la parte superior de la envergadura. La imagen 4f) ilustra el tamaño de la estela que se encuentra aguas abajo del borde de salida. En la Fig.3.9 se muestran imágenes para la perspectiva trasera del flujo. La primera imagen de la Fig. 3.9 muestra la estructura del flujo desde la perspectiva que corresponde al plano iluminado por el láser (componente de velocidad W positiva hacia la izquierda). En la imagen 1t), a excepción de la estela ubicada arriba del borde de salida, el flujo tiene una componente de velocidad W positiva (hacia la base de la semilla) y se puede ver la evolución de los perfiles de velocidad aguas abajo. La imagen 2t) muestra el TEV desde la perspectiva trasera, donde claramente se observa como éste se encuentra del otro lado del plano delimitado por el contorno de velocidad transversal. La primera imagen de izquierda a derecha (parte inferior) muestra la ubicación del borde de salida junto con el flujo de la corriente libre. Obsérvese que el valor de la componente de velocidad transversal en esta región es prácticamente nulo. La imagen 3t) ilustra la ubicación del LEV que se forma en el borde de ataque. Como éste se encuentra adherido a la parte superior de la envergadura y la semilla tiene un ángulo de inclinación bastante elevado, el flujo del LEV también está inclinado, razón por la cuál la parte inferior de éste tiene componente de velocidad W negativa, mientras que la parte superior del LEV tiene componenete de velocidad W positiva con respecto al plano de contorno. Esto indica la existencia de un fuerte flujo en espiral en el núcleo del LEV. Cabe mencionar que las dimensiones de la estructura vortical (LEV y TEV) para $0.875R$ son menores que para $0.75R$, en donde las dimensiones del LEV alcanzan un máximo.

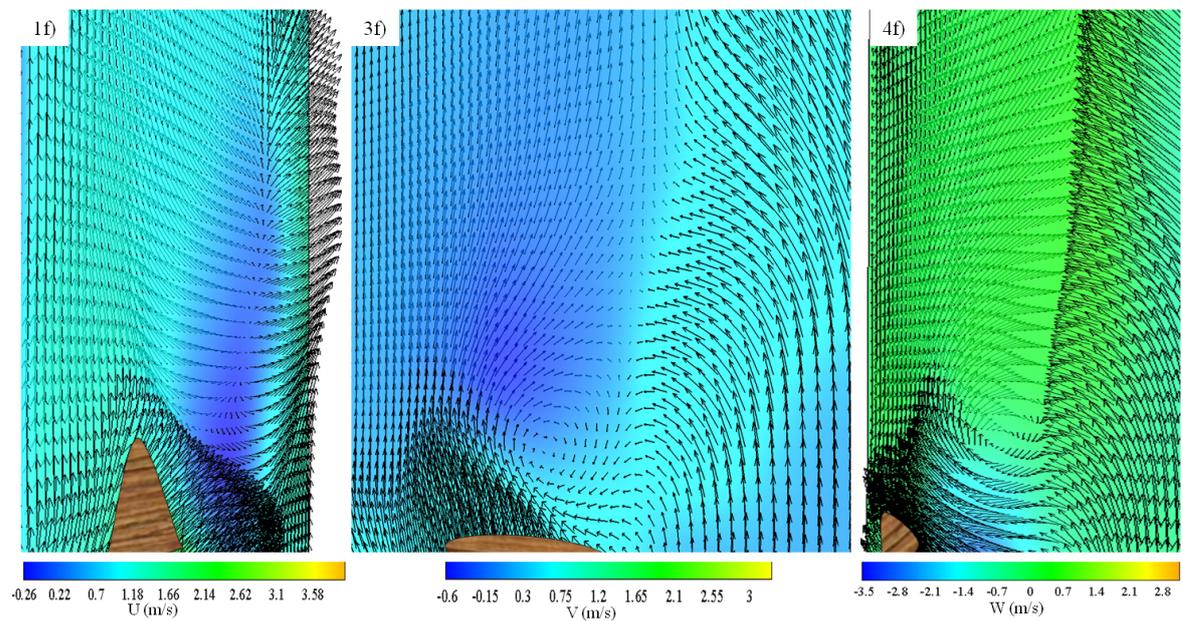


Fig. 3.6: Vectores del flujo en $0.75R$ para la perspectiva frontal y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U, V, y W, respectivamente

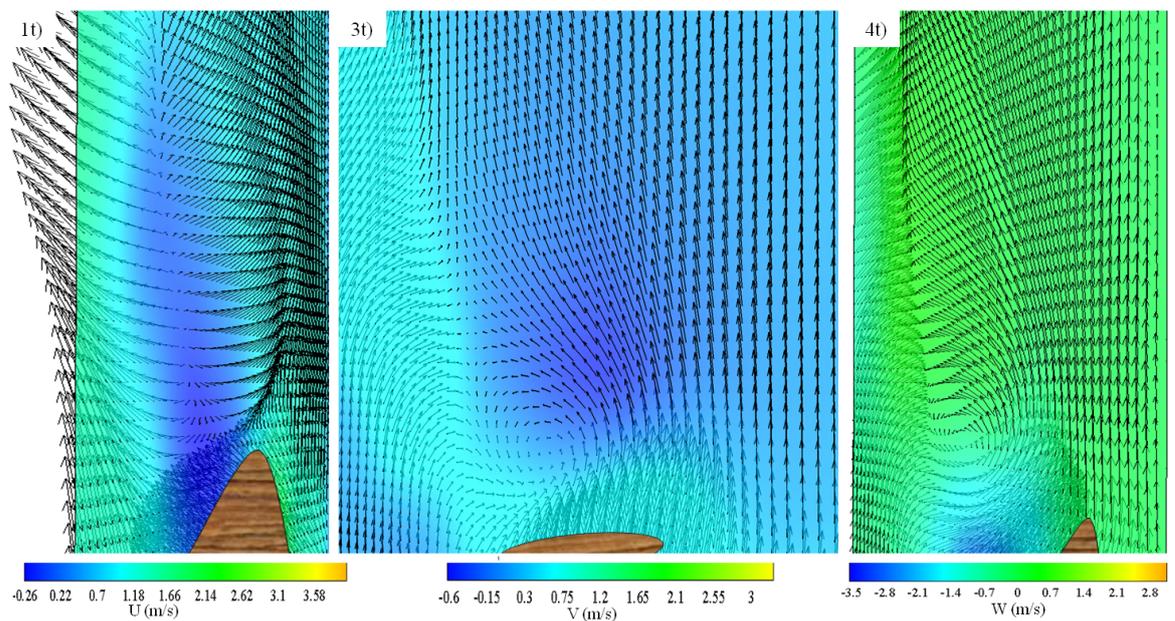


Fig. 3.7: Vectores del flujo en $0.75R$ para la perspectiva trasera y contornos de las componentes instantáneas de velocidad U, V, y W, respectivamente

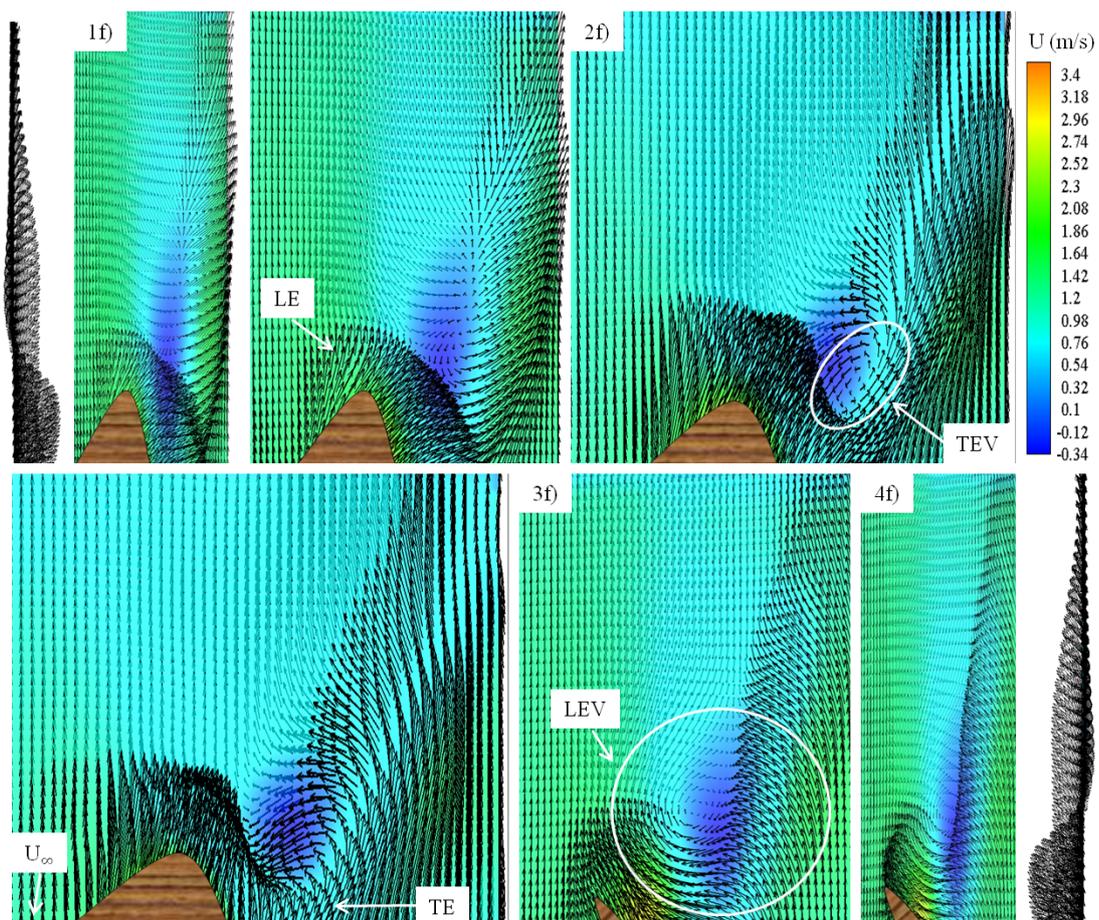


Fig. 3.8: Vectores del flujo en $0.875R$ para la perspectiva frontal y contornos de la componente instantánea de velocidad longitudinal

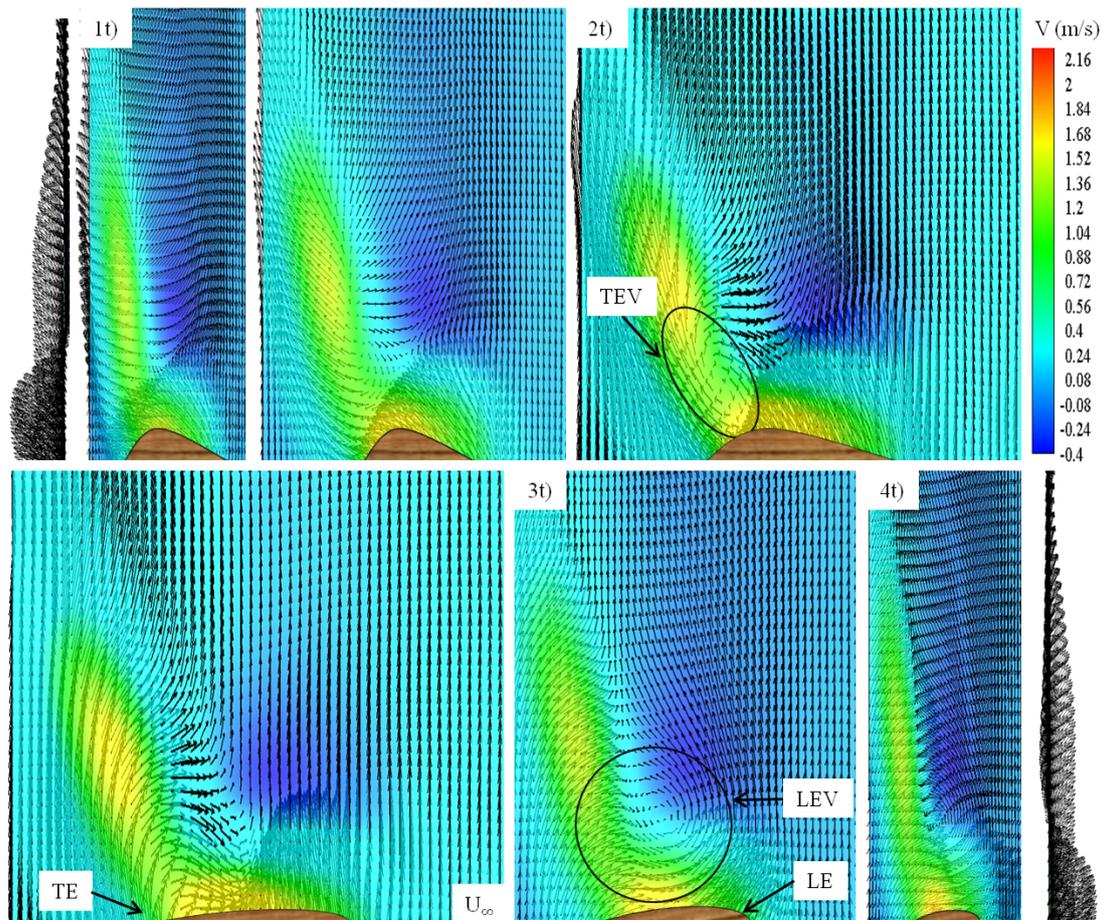


Fig. 3.9: Vectores del flujo en $0.875R$ para la perspectiva trasera y contornos de la componente instantánea de velocidad transversal

Flujo en la punta de la semilla

La Fig.3.10 muestra los vectores del flujo en R y los contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente. La parte superior e inferior corresponden a la perspectiva frontal y trasera, respectivamente y no hay transparencia alguna en los planos de los contornos de velocidad para poder distinguir claramente el valor de la componente de velocidad W . Para esta región de la envergadura, tanto el LEV como el TEV han desaparecido y sólo queda flujo hacia la estela. El valor de la componente de velocidad longitudinal es prácticamente el de la corriente libre para todo el campo, mientras que el valor de la componente de velocidad transversal es relativamente alto (2.44 m/s) debido a la velocidad angular. La componente de velocidad W es prácticamente nula para todo el campo excepto en la parte inferior del borde de ataque de la semilla, donde el flujo tiene el mismo patrón de alimentación que en la base de la semilla con una componente de velocidad W positiva en la parte inferior del borde de ataque.

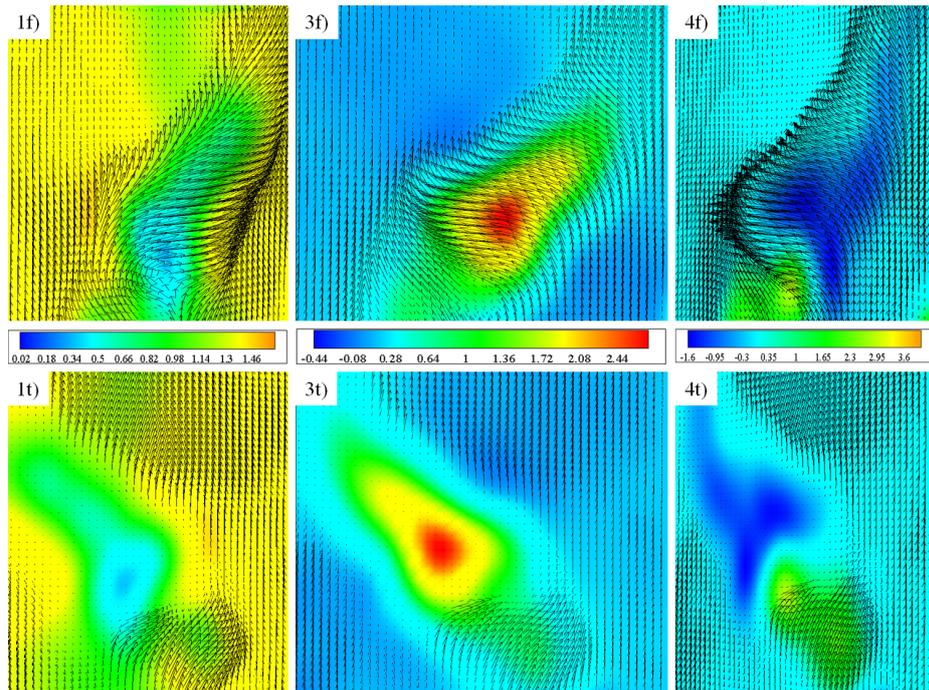


Fig. 3.10: Vectores del flujo en R para la perspectiva frontal y trasera junto con los contornos de las componentes instantáneas de velocidad U , V , y W , respectivamente

3.1.3. Campos instantáneos de vorticidad

Se evaluaron los cuatro criterios de identificación de vórtices más comunes (ver Apéndice B). Las Figs. 3.11 y 3.12 muestran los vectores de flujo y los contornos de los campos de vorticidad para múltiples posiciones a lo largo de la envergadura utilizando el criterio de vorticidad Z . Para todas las imágenes, la perspectiva mostrada es la 3f) de la Fig. 3.1. En la imagen para la base, aunque aún no se ha formado un LEV, ya existen regiones con vorticidad positiva y negativa en los bordes de ataque y de salida, respectivamente. Para $0.25R$, la presencia del LEV ocasiona que la vorticidad en el borde de ataque sea mayor que la vorticidad en el borde de salida y existen dos regiones de vorticidad girando en sentidos opuestos. Para $0.5R$, los valores de la vorticidad en ambos remolinos incrementan. Lo mismo ocurre para $0.75R$, donde la intensidad de éstos es proporcional al tamaño del LEV y del TEV. Para $0.875R$, aunque las dimensiones del LEV y el TEV son menores con respecto a $0.75R$, la vorticidad dentro del núcleo del LEV es grande, como se ilustra en la Fig. 3.12. Ésto es congruente con lo reportado por Norberg para las semillas de maple [50], donde la fuerza máxima de sustentación se encuentra ubicada en la región comprendida en el tercio exterior de la envergadura medido desde la punta hacia la base, y que en este caso corresponde a $0.75R$ en semillas de caoba. El hecho de que el LEV se encuentra adherido a la parte superior de la envergadura implica la presencia de una región de baja presión que genera una fuerza de sustentación responsable de la autorrotación junto con una fuerza vertical que es la responsable del retardo en la caída de la semilla.

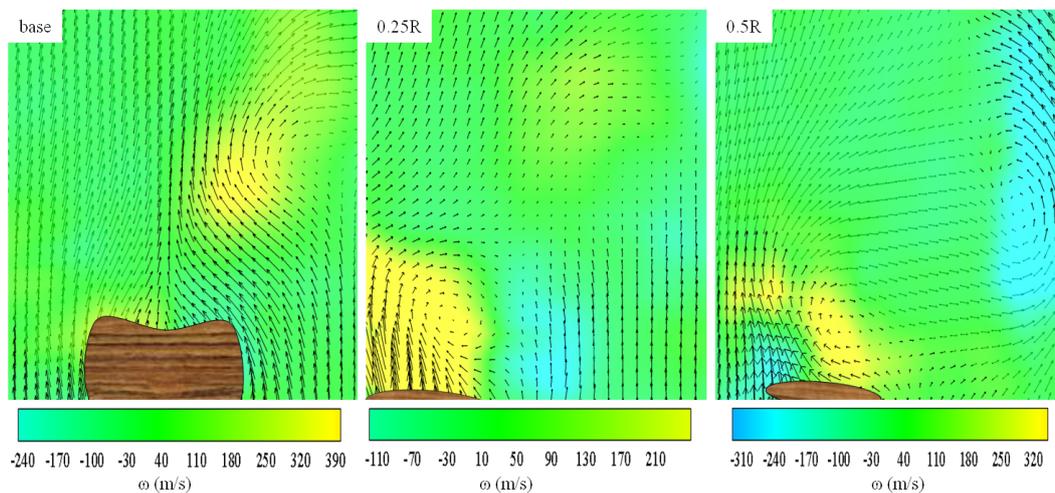


Fig. 3.11: Vectores de flujo y contornos de los campos de vorticidad en la base de la semilla, en 0.25R y en 0.5R

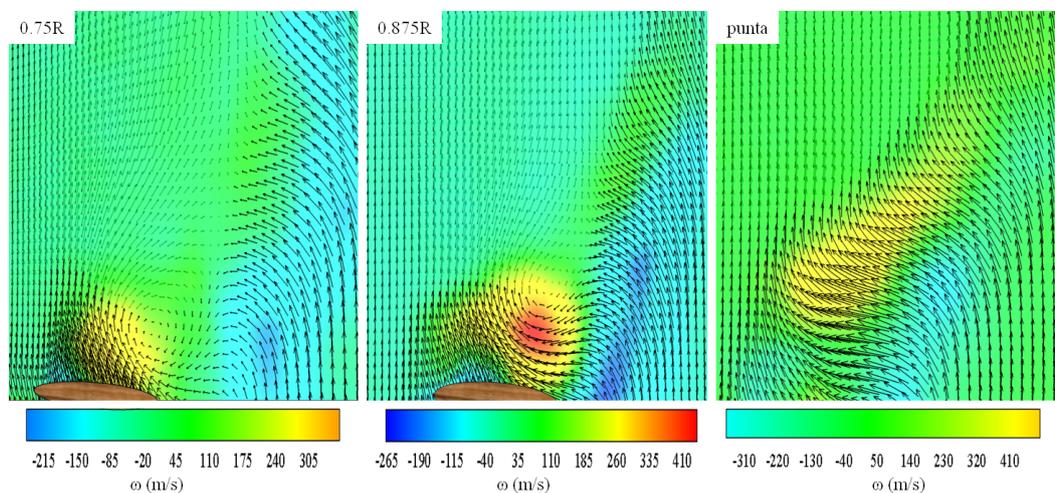


Fig. 3.12: Vectores de flujo y contornos de los campos de vorticidad para 0.75R, 0.875R y para la punta de la semilla

3.1.4. Líneas de corriente seccionales

Una línea de corriente seccional se obtiene al integrar el campo de velocidad en un plano conformado por las proyecciones de los vectores del flujo. Esta distinción es importante, ya que una línea de corriente y una línea de corriente seccional no son lo mismo. La Fig. 3.13 muestra las líneas de corriente seccionales para diferentes regiones de la envergadura. Éstas proporcionan información del flujo que es importante. En este caso ilustran la distribución de los puntos críticos. Un “punto crítico” o “punto estacionario” es aquél que se encuentra en un patrón de flujo descrito por líneas de corriente para las cuales la derivada se indetermina y por lo tanto su velocidad es cero. En la Fig. 3.13, se puede distinguir claramente la existencia del LEV gracias a la existencia de puntos críticos. Esto es consistente con lo observado en la estructura del flujo en 3D, donde se reportó la existencia de un LEV para un intervalo comprendido entre $0.25R$ hasta $0.875R$.

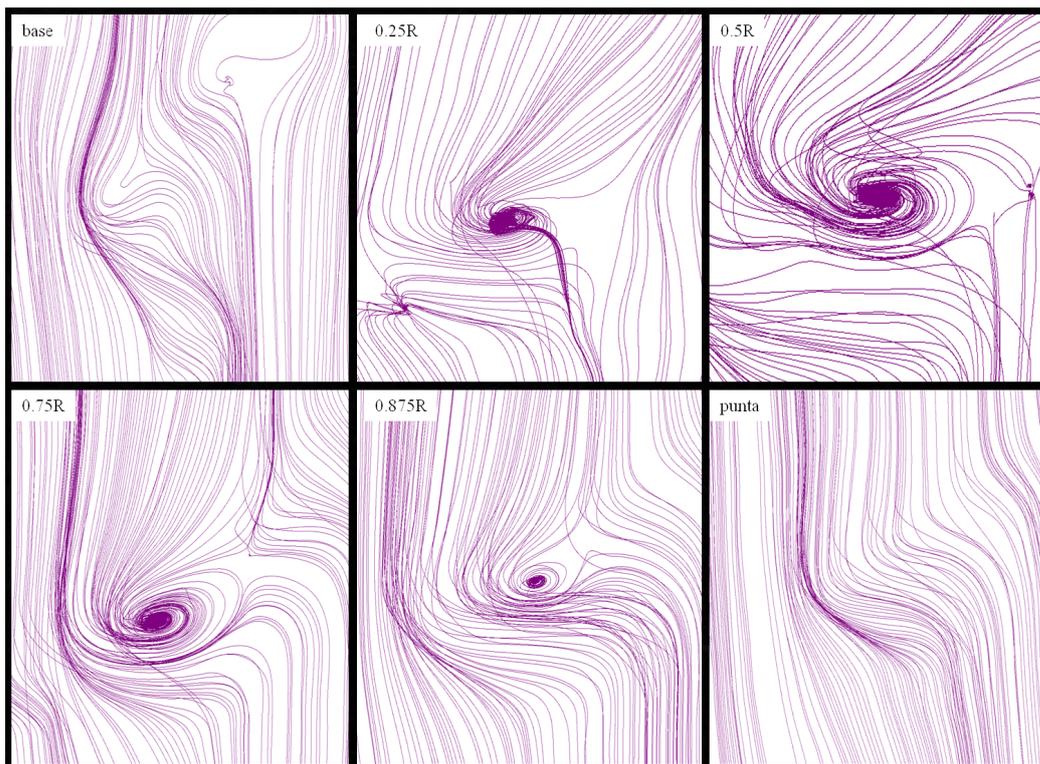


Fig. 3.13: Líneas de corriente seccionales para diferentes regiones de la envergadura

3.1.5. Convoluciones integrales de línea

La convolución integral de línea es una técnica que permite visualizar los campos de vectores por medio de texturas [51, 52]. Esta técnica facilita la identificación de vórtices, discontinuidades del flujo y puntos críticos, pero las imágenes procesadas empleando esta técnica permiten identificar la dirección del flujo, más no su velocidad. La Fig. 3.14 muestra las convoluciones integrales de línea para diferentes regiones de la envergadura. Para todas las imágenes, la perspectiva mostrada es la 3f) de la Fig. 3.1. La imagen para la punta ilustra la bifurcación del flujo cuando rodea la base de la semilla. En todas las imágenes en donde está presente el LEV, la flecha indica la ubicación de los puntos críticos. Evidentemente, para la punta de la semilla sólo se observa una pequeña deflexión en el flujo y no existen puntos críticos. Tanto con las líneas de corriente seccionales como con las convoluciones integrales de línea, se corrobora la existencia de un prominente LEV en el intervalo comprendido entre $0.25R$ y $0.875R$. Éste es el responsable de que exista una región de baja presión sobre la parte superior de la envergadura. Como resultado, se produce una succión que genera fuerzas aerodinámicas favorables para el transporte de semillas.

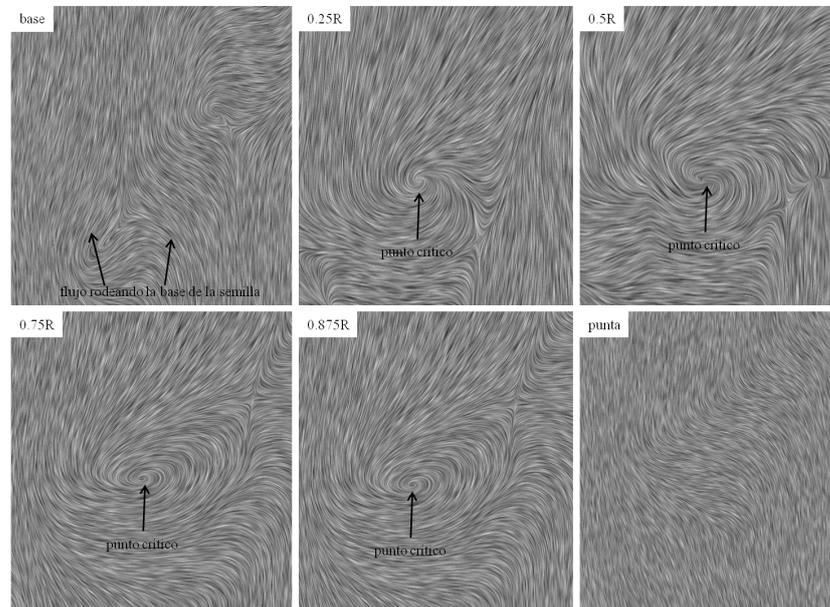


Fig. 3.14: Convoluciones integrales de línea para diferentes regiones de la envergadura

3.2. Estelas aguas abajo (vectores en 2D)

La Fig. 3.15 muestra los vectores del flujo aguas abajo en 2D junto con los contornos de velocidad y vorticidad. Como referencia, las flechas muestran la ubicación del borde de ataque y del borde de salida de la semilla. Por simplicidad, las escalas de los contornos de velocidad sólo muestran el color que corresponde a la componente de velocidad máxima y mínima. Las imágenes de la parte superior muestran, de izquierda a derecha, la componente de velocidad U (positiva hacia arriba), la componente de velocidad V (positiva hacia la derecha), y la magnitud de la velocidad (definida como la raíz cuadrada de la suma de las componentes U y V elevadas al cuadrado), respectivamente. Las imágenes de la parte inferior muestran, de izquierda a derecha, los vectores en 2D, las líneas de corriente, y un acercamiento con las líneas de corriente, respectivamente. Para estas imágenes, el contorno corresponde a la vorticidad. Aquí, el LEV y el TEV no se desprenden de la parte superior de la envergadura, sino que los patrones de flujo que se muestran corresponden a perturbaciones en el flujo aguas abajo con respecto a la corriente libre de revoluciones anteriores de la semilla.

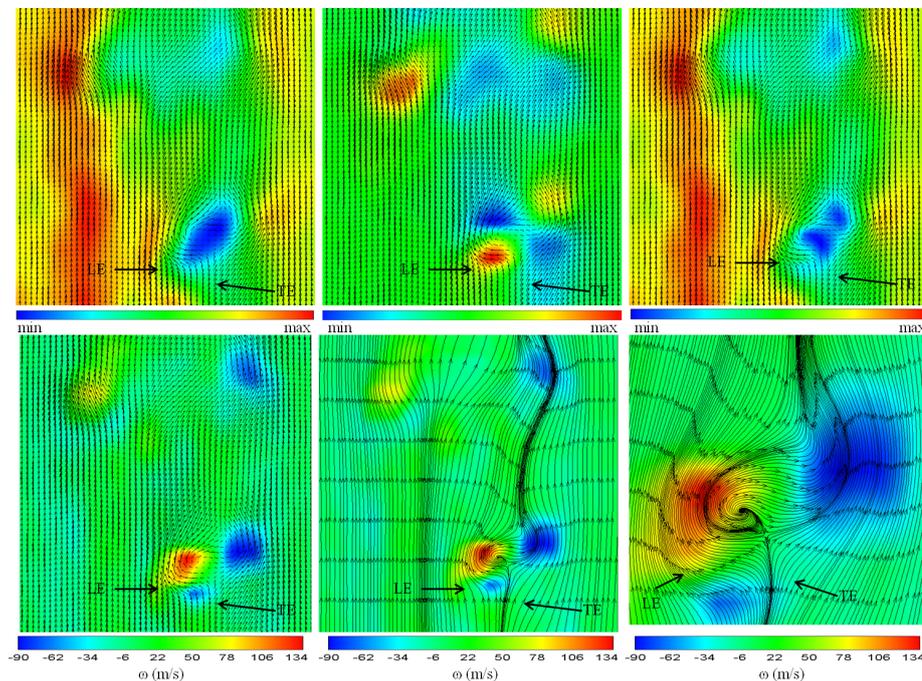


Fig. 3.15: Estelas aguas abajo y contornos de velocidad y vorticidad

3.3. Coeficientes de fuerza vertical

En esta sección se presentan los valores del coeficiente de fuerza vertical de las semillas de caoba. Como en la literatura no hay un criterio establecido para el cálculo de éste valor para semillas autorrotantes, ya que algunos autores emplean el área en planta del perfil mientras que otros emplean el área de disco (área proyectada por el perfil en rotación), a continuación se presentan resultados para los coeficientes de fuerza vertical empleando ambos criterios, esto es, el área en planta y el área de disco.

3.3.1. Coeficientes de fuerza vertical basados en el área en planta de las muestras

De acuerdo a la teoría de elementos de aspas, se puede hacer un análisis de fuerzas sobre la semilla si se considera a ésta como un perfil aerodinámico bidimensional que se mueve con una velocidad relativa calculada en la sección de ésta. La velocidad relativa se denomina velocidad total U_T , y está compuesta por la velocidad de la corriente libre y la velocidad angular de la semilla [53, 54]:

$$U_T = [U_\infty^2 + (2\pi R_D \cos \beta)^2 \Omega^2]^{1/2} \quad (3.1)$$

La Fig. 3.16 ilustra las componentes de velocidad que actúan sobre el aspa.

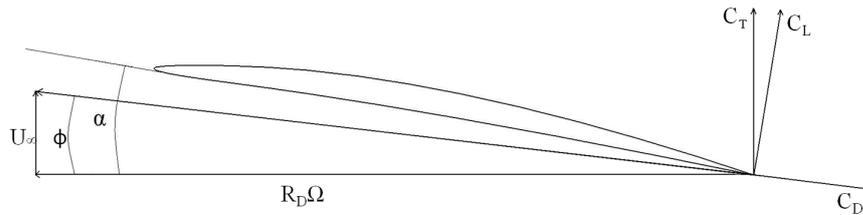


Fig. 3.16: Componentes de velocidad que actúan sobre el aspa

De la Fig. 3.16, ϕ es el ángulo que forma la velocidad total U_T con la horizontal, el coeficiente de sustentación C_L es perpendicular a la velocidad U_T , y el coeficiente de arrastre C_D tiene la misma dirección que la velocidad total pero con sentido opuesto. Los coeficientes de sustentación y arrastre son obtenidos a partir de las gráficas apropiadas al perfil del aspa. Si c es

la cuerda, entonces la sustentación y el arrastre en el elemento del aspa son, respectivamente

$$dL = \frac{1}{2}C_L\rho U_T^2 cdr \quad (3.2)$$

$$dD = \frac{1}{2}C_D\rho U_T^2 cdr \quad (3.3)$$

donde C_L y C_D son los coeficientes de sustentación y arrastre del elemento del aspa, respectivamente. El coeficiente de fuerza vertical se obtiene al proyectar ambos coeficientes en dirección vertical:

$$C_T = C_L \cos\phi - C_D \sin\phi \quad (3.4)$$

De esta manera, la fuerza vertical ejercida sobre el elemento del aspa es

$$dT = \frac{1}{2}C_T\rho U_T^2 cdr \quad (3.5)$$

Integrando a lo largo de la longitud R_D

$$T = \frac{1}{2}\rho U_T^2 S C_T \quad (3.6)$$

donde T es la fuerza vertical, ρ es la densidad del aire, U_T es la velocidad total de la semilla, S es el área en planta de la semilla y C_T es el coeficiente de fuerza vertical. La velocidad de la corriente libre es igual a la velocidad terminal de la semilla cuando ésta se encuentra suspendida girando a una altura constante. Cuando ésto ocurre, la fuerza vertical es igual al peso de la semilla

$$T = mg = w \quad (3.7)$$

donde m es la masa de la semilla, g que es la aceleración de la gravedad y w es el peso de la semilla, el cual se obtuvo empleando una balanza granataria con una resolución de diez milésimas de gramo. De las Ecs. (3.1)-(3.7)

$$C_T = \frac{2T}{\rho U_T^2 S} = \frac{2mg}{\rho U_T^2 S} = \frac{2w}{\rho U_T^2 S} \quad (3.8)$$

Para la obtención del valor de S , se tomaron fotografías de la semilla en planta con una cámara digital (Canon PowerShotXS10IS) empleando un fondo blanco. Las imágenes adquiridas se convirtieron a imágenes en blanco y negro empleando el software Image Analyzer (versión 1.32) y se exportaron

en formato TIF. Estas imágenes se procesaron empleando Matlab (versión 7.7.0.471) de forma que la información de cada pixel aparece como una matriz de datos en donde se le asigna un valor a cada pixel dependiendo de su color. Para los pixeles negros (que corresponden a la semilla) se asignó un valor de 256, mientras que para los pixeles de color blanco se asignó un valor de cero. Posteriormente, la matriz de datos se exportó a una hoja de cálculo en donde se sumó el total de pixeles negros multiplicados por el área que ocupa un pixel. De esta manera, se logró obtener el valor del área en planta de cada semilla.

En la Fig. 3.17 se presentan los valores de los coeficientes de fuerza vertical en función del número de Reynolds empleando el área en planta proyectada de la semilla, S . Éstos abarcan un intervalo de $0.42 \leq C_F \leq 0.65$, el cual se debe a las diferencias que existen en los valores de masa y de tamaño de cada muestra. Como se mencionó con anterioridad, el intervalo del valor del número de Reynolds es de $1474 \leq Re \leq 1866$, y de la Fig. 3.17 se puede ver que este intervalo se encuentra dentro del rango de números de Reynolds empleado por una gran cantidad de insectos que emplean alas móviles. En la Fig. 3.18 se muestra el valor de los coeficientes de fuerza vertical en función de la carga alar, la cual se define como la relación que existe entre el peso de la semilla con respecto a su área en planta. De la gráfica se puede ver que las semillas de caoba cuentan con coeficientes de fuerza vertical que son mucho más grandes que los de los perfiles aerodinámicos con relaciones de aspecto similares. Esta propiedad es una característica aerodinámica común de las samaras o semillas autorrotantes. La Fig. 3.19 ilustra el valor de la velocidad de corriente libre en función de la carga alar. Aquí también, las variaciones tienen que ver con las diferencias geométricas de cada muestra.

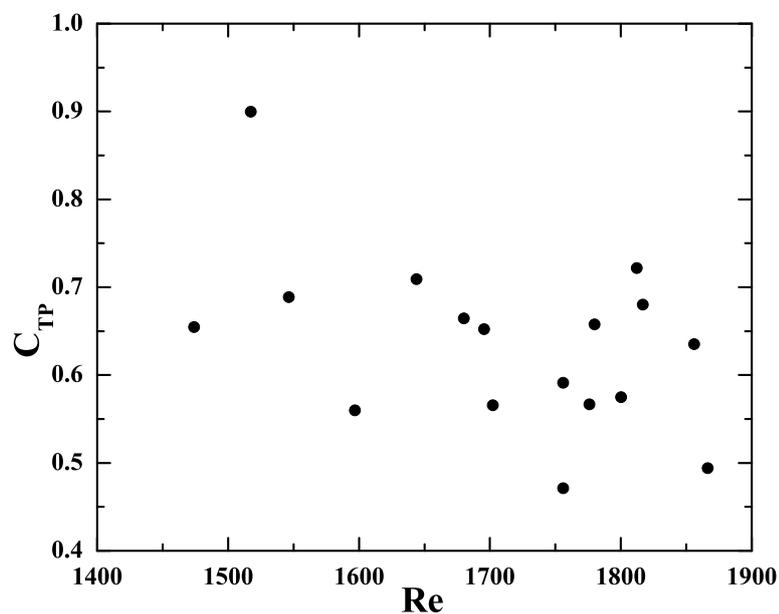


Fig. 3.17: Coeficientes de fuerza vertical en función del número de Reynolds

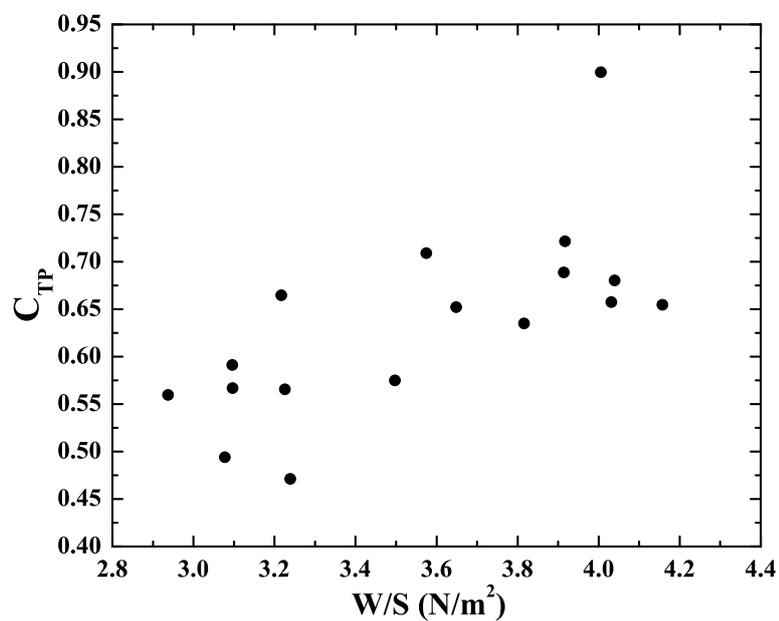


Fig. 3.18: Coeficientes de fuerza vertical en función de la carga alar

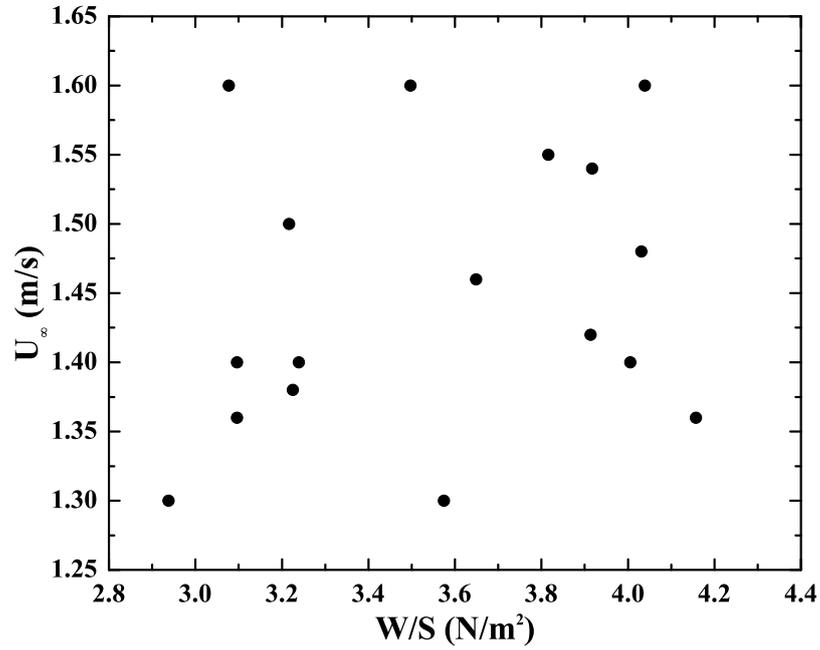


Fig. 3.19: Velocidad de corriente libre en función de la carga alar

3.3.2. Coeficientes de fuerza vertical basados en el área de disco de las muestras

De las Ecs. (3.1)-(3.7) y empleando el área de disco en vez del área en planta, donde el área de disco es el área proyectada por la semilla en rotación:

$$W = \frac{1}{2} \rho U_T^2 S_D C_F \quad (3.9)$$

Como se puede observar, los coeficientes de fuerza vertical varían considerablemente con respecto a los reportados en la sección anterior debido a que el valor del área del disco es un orden de magnitud mayor que el valor del área en planta (ver Tabla 2.1).

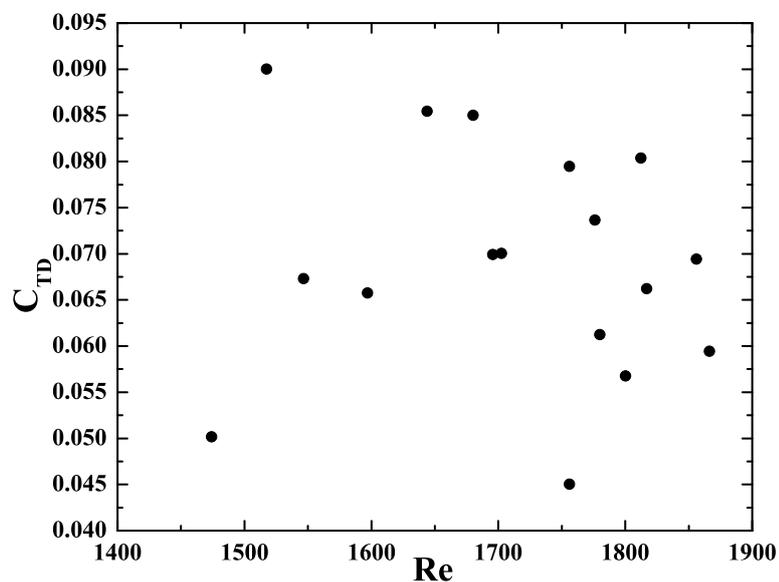


Fig. 3.20: Coeficientes de fuerza vertical en función del número de Reynolds

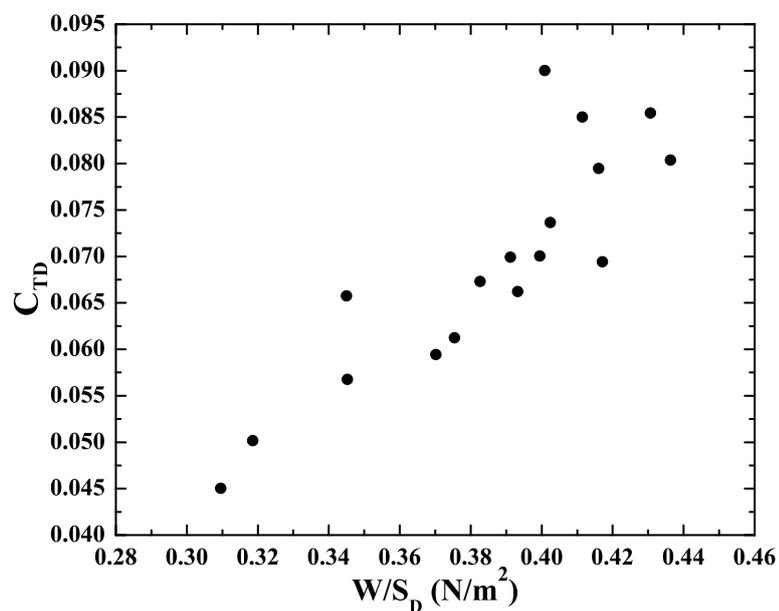


Fig. 3.21: Coeficientes de fuerza vertical en función de la carga alar

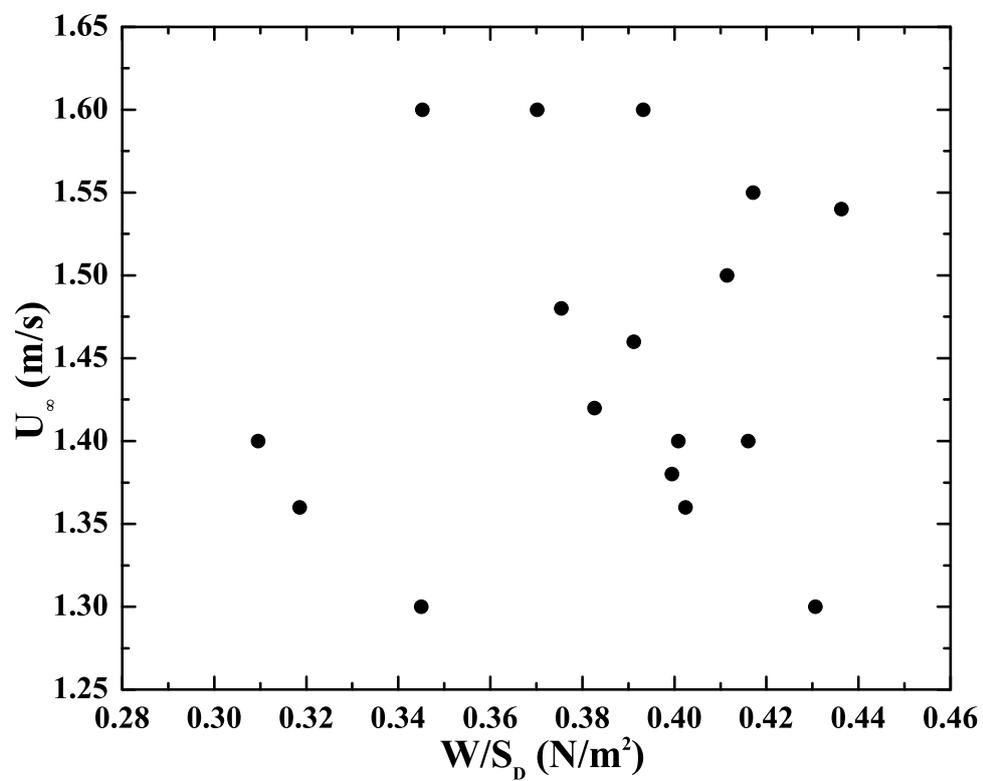


Fig. 3.22: Velocidad de la corriente libre en función de la carga alar

Capítulo 4

Conclusiones

En este trabajo de investigación se estudió la estructura del flujo y dinámica de los vórtices en el borde de ataque de semillas autorrotantes (*Swietenia macrophylla*). El fenómeno se estudió experimentalmente usando la técnica de velocimetría por imágenes de partículas. Los resultados muestran que la estructura del vórtice en el borde de ataque para el caso de estas semillas es muy compleja y tridimensional. Ésta consiste en un flujo en espiral que se encuentra en la parte superior de la envergadura. El remolino nace en una región cercana a $0.25R$ y aumenta sus dimensiones conforme se aleja de la base de la semilla hasta alcanzar un máximo en $0.75R$. Para regiones de la envergadura comprendidas entre $0.75R$ y la punta, el tamaño de la estructura vortical disminuye hasta que se desvanece en la punta. Adicionalmente, se reportó la existencia de un vórtice secundario (TEV) que gira en sentido contrario al LEV y que nace a partir de $0.5R$ y desaparece en regiones cercanas a la punta. En este trabajo, se comprobó que el mecanismo responsable de que la estructura vortical (comprendida por el LEV y el TEV) permanezca adherida a la parte superior de la envergadura sin que se desprenda se debe al flujo en espiral y a la interacción entre ambos vórtices. Por último, se concluye que estudiar flujos tridimensionales empleando aproximaciones en dos dimensiones puede ocasionar que se subestimen las dimensiones de la estructura vortical y por lo tanto del LEV y del TEV.

Referencias

- [1] A. Azuma, K. Yasuda, Flight performance of rotary seeds, *Journal of Theoretical Biology* 138 (1989) 23–54.
- [2] M. Dickinson, F.-O. Lehmann, S. Sane, Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight, *Science* 284 (1999) 1954–1960.
- [3] D. Greene, E. Johnson, The aerodynamics of plumed seeds, *Functional Ecology* 4 (1990) 117–125.
- [4] D. Greene, M. Quesada, Seed size, dispersal, and aerodynamic constraints within the bombacaceae, *American Journal of Botany* 92(6) (2005) 998–1005.
- [5] R. Gupta, G. Arora, R. Sharma, Aerodynamic properties of sunflower seed (*helianthus annuus* l.), *Journal of Food Engineering* 79 (2007) 899–904.
- [6] A. Júnior, P. Corrêa, F. Pinto, D. Queiroz, Aerodynamic properties of coffee cherries and beans, *Biosystems Engineering* 98 (2007) 39–46.
- [7] J. Birch, W. Dickson, M. Dickinson, Force production and flow structure of the leading edge vortex on flapping wings at high Reynolds numbers, *The Journal of Experimental Biology* 207 (2004) 1063–1072.
- [8] H. Liu, C. Ellington, K. Kawachi, C. V. den Berg, A. Willmott, A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering, *The Journal of Experimental Biology* 201 (1998) 461–477.
- [9] H. Howe, J. Smallwood, Ecology of seed dispersal, *Annual Review of Ecology and Systematics* 107/108 (1993) 261–280.

- [10] M. Willson, Dispersal mode, seed shadows, and colonization patterns, *Vegetation* 32 (1968) 21–28.
- [11] S. Fry, R. Sayaman, M. Dickinson, The aerodynamics of hovering flight in *Drosophila*, *The Journal of Experimental Biology* 208 (2005) 2303–2318.
- [12] C. V. den Berg, C. Ellington, The vortex wake of a 'hovering' model hawkmoth, *Philosophical Transactions of the Royal Society Series B* 352 (1997) 317–328.
- [13] A. Brodsky, Vortex formation in the tethered flight of the peacock butterfly *Inachis Io L.* (lepidoptera, nymphalidae) and some aspects of insect flight evolution, *The Journal of Experimental Biology* 161 (1991) 77–95.
- [14] A. Willmott, C. Ellington, A. Thomas, Flow visualization and unsteady aerodynamics in the flight of the hawkmoth, *manduca sexta*, *Philosophical Transactions of the Royal Society Series B* 352 (1997) 329–340.
- [15] J. Usherwood, The aerodynamic forces and pressure distribution of a revolving pigeon wing, *Experiments in Fluids* 46 (2009) 991–1003.
- [16] J. Usherwood, T. Dedrick, C. M. and A.A. Biewener, Dynamic pressure maps for wings and tails of pigeons in slow, flapping flight, and their energetic implications, *The Journal of Experimental Biology* 208 (2005) 355–369.
- [17] A. Hedenström, F. Muijres, R. von Busse, L. Johansson, Y. Winter, G. Spedding, High-speed stereo dpiv measurement of wakes of two bat species flying freely in a wind tunnel, *Experiments in Fluids* 46 (2009) 923–932.
- [18] F. Muijres, L. Johansson, R. Barfield, M. Wolf, G. Spedding, A. Hedenström, Leading-edge vortex improves lift in slow-flying bats, *Science* 319 (2008) 1250–1253.
- [19] C. Ellington, C. V. den Berg, A. Willmott, A. Thomas, Leading-edge vortices in insect flight, *Nature* 384 (1996) 626–630.

- [20] R. Bomphrey, N. Lawson, N. Harding, G. Taylor, A. Thomas, The aerodynamics of *Manduca sexta*: digital particle image velocimetry analysis of the leading-edge vortex, *The Journal of Experimental Biology* 208 (2005) 1079–1094.
- [21] J. Wu, M. Sun, Unsteady aerodynamic forces of a flapping wing, *The Journal of Experimental Biology* 207 (2004) 1137–1150.
- [22] L. Carr, Progress in analysis and prediction of dynamic stall, *Journal of Aircraft* 25 (1988) 6–17.
- [23] W. McCroskey, Unsteady airfoils, *Annual Reviews in Fluid Mechanics* 14 (1982) 285–311.
- [24] C. Ellington, The aerodynamics of hovering insect flight, *Philosophical Transactions of the Royal Society Series B* 305 (1984) 1–181.
- [25] M. Dickinson, K. Götz, Unsteady aerodynamic performance of model wings at low reynolds numbers, *The Journal of Experimental Biology* 174 (1993) 45–64.
- [26] C. V. den Berg, C. Ellington, The three-dimensional leading-edge vortex of a 'hovering' model hawkmoth, *Philosophical Transactions of the Royal Society Series B* 352 (1997) 329–340.
- [27] C. Brown, W. Michael, Effect of leading-edge separation on the lift of a delta wing, *Journal of Aeronautical Sciences* 10 (1954) 690–694.
- [28] K. Stewartson, M. Hall, The inner viscous solution for the core of a leading-edge vortex, *Journal of Fluid Mechanics* 15 (1963) 306–318.
- [29] T. Riddle, A. Wadcock, J. Tso, R. Cummings, An experimental analysis of vortex trapping techniques, *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering* 121 (1999) 555–559.
- [30] J. Birch, M. Dickinson, Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings, *Nature* 412 (2001) 729–733.
- [31] M. Dickinson, The effects of wing rotation on unsteady aerodynamic performance at low reynolds numbers, *The Journal of Experimental Biology* 192 (1994) 179–206.

- [32] S. Lan, M. Sun, Aerodynamic properties of a wing performing unsteady rotational motions at low reynolds number, *Acta Mechanica* 149 (2001) 135–147.
- [33] R. Bomphrey, G. Taylor, A. Thomas, Smoke visualization of free-flying bumblebees indicates independent leading-edge vortices on each wing pair, *Experiments in Fluids* 46 (2009) 811–821.
- [34] D. Lentink, M. Gerritsma, Influence of airfoil shape on performance in insect flight, *AIAA* 212 (2009) 2705–2719.
- [35] M. Raffel, C. Willert, S. Wereley, J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry, a Practical Guide*, Springer, New York, 2007.
- [36] Y. Lu, G. Shen, Three-dimensional flow structures and evolution of the leading-edge vortices on a flapping wing, *The Journal of Experimental Biology* 211 (2008) 1221–1230.
- [37] Y. Lu, G. Shen, G. Lai, Dual leading-edge vortices on flapping wings, *The Journal of Experimental Biology* 209 (2006) 5005–5016.
- [38] S. Ansari, N. Phillips, G. Stabler, P. Wilkins, R. Zbikowski, K. Knowles, Experimental investigation of some aspects of insect-like flapping flight aerodynamics for application to micro air vehicles, *Experiments in Fluids* 46 (2009) 777–798.
- [39] D. Lentink, M. Dickinson, Rotational accelerations stabilize leading edge vortices on revolving fly wings, *The Journal of Experimental Biology* 212 (2009) 2705–2719.
- [40] K. Yasuda, A. Azuma, The autorotation boundary in the flight of samaras, *Journal of Theoretical Biology* 185 (1997) 313–320.
- [41] D. Lentink, W. Dickson, J. van Leeuwen, M. Dickinson, Leading-edge vortices elevate lift of autorotating plant seeds, *Science* 324 (2009) 1438–1440.
- [42] M. Woods, J. Henderson, G. Lock, Energy requirements for the flight of micro air vehicles, paper no. 2546, *The Aeronautical Journal* 105 (2001) 135–149.

- [43] R. Zbikowski, Flapping wing autonomous micro air vehicles: research programme outline. fourth international conference on unmanned air vehicle systems, supplementary papers (1999) 31.1–38.5.
- [44] R. Dudley, Biomechanics (structures and systems): a practical approach, O.U. Press, Cambridge, 1992.
- [45] E. R. Ulrich, D. J. Pines, J. S. Humbert, From falling to flying: the path to powered flight of a robotic samara nano air vehicle, *Bioinspiration & Biomimetics* 5 (4) (2010) 045009.
- [46] J. B. Barlow, W. H. Rae, A. Pope, *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [47] B. Bienkiewicz, J. Cermak, A flow visualization technique for low-speed wind-tunnel studies, *Experiments in Fluids* 5 (3) (1987) 212–214.
- [48] R. J. Moffat, Describing the uncertainties in experimental results, *Experimental Thermal and Fluid Science* 1 (1) (1988) 3–17.
- [49] S. Minami, A. Azuma, Various flying modes of wind-dispersal seeds, *Journal of Theoretical Biology* 225 (2003) 1–14.
- [50] R. Norberg, Autorotation, self-stability and structure of single-winged fruits and seeds (samaras) with comparative remarks on animal flight, *Biological Reviews* 48 (1973) 561–596.
- [51] B. Cabral, L. Leedom, Imaging vector fields using line integral convolution, *Proceedings of ACM SigGraph 93*, Aug 2-6, Anaheim, California 1 (1993) 131–141.
- [52] L. Forssell, S. Cohen, Using line integral convolution for flow visualization: curvilinear grids, variable-speed animation, and unsteady flows, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (1995) 263–270.
- [53] J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, Mc Graw Hill, International Edition, 2007.
- [54] L. Milne-Thompson, *Theoretical Aerodynamics*, Dover, 180 Varick Street, New York, 1966.

- [55] J. J. Bertin, *Engineering Fluid Mechanics*, Prentice-Hall Inc., 1984.
- [56] J. Jeong, F. Hussain, On the identification of a vortex, *Journal of Fluid Mechanics* 285 (1995) 69–94.
- [57] R. Adrian, K. Christensen, Z.-C. Liu, Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields, *Experiments in fluids* 29 (2000) 275–290.
- [58] J. C. R. Hunt, A. A. Wray, P. Moin, Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows, in: *Studying Turbulence Using Numerical Simulation Databases*, 2, 1988, pp. 193–208.
- [59] M. S. Chong, A. E. Perry, B. J. Cantwell, A general classification of three-dimensional flow fields, *Physics of Fluids* 2 (1990) 765–777.

Apéndice A

Cálculo del número de Reynolds

En este apéndice se obtiene el valor de las propiedades termofísicas del aire para la Ciudad de México y a partir de estos valores se calcularon los números de Reynolds para cada muestra. Los valores de la densidad y de la viscosidad dinámica del aire se obtuvieron de tablas de atmósfera estándar [53] y también se calcularon empleando la ecuación de estado para un gas ideal

$$PV = mRT \quad (\text{A.1})$$

donde P es la presión en $[Pa]$, V es el volumen en (m^3) , m es la masa en kg_m , $R = 287.05$ (Nm/kgK) para el aire y T es la temperatura en (K). El volumen específico (v) es el volumen ocupado por unidad de masa de un material y es el inverso de la densidad

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (\text{A.2})$$

de la Ec. (A.1)

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (\text{A.3})$$

Como la densidad de un gas es función de su presión y su temperatura $\rho(T, P)$, en la Tabla A.1 se muestran los valores obtenidos para la densidad del aire calculados a nivel del mar, a una altura de 1000 m (que es donde se encuentra el bosque tropical perennifolio de donde se obtuvieron las semillas) y a una altura de 2240 m (que es la altura de la Ciudad de México).

Los valores fueron calculados empleando tablas de atmósfera estándar [53] y empleando la Ec. A.2, respectivamente.

altura (m)	ρ (kg/m^3) [53]	ρ (kg/m^3) Ec. A.2
0	1.23	1.2
1000	1.11	1.07
2240	0.98	0.94

Tabla A.1: Densidad del aire a diferentes alturas

La viscosidad dinámica para un gas su puede calcular con la fórmula de Sutherland para la viscosidad del aire [55]:

$$\mu = 1.458 \times 10^{-6} \left(\frac{T^{1.5}}{T + 110.4} \right) \quad (\text{A.4})$$

Como los experimentos se realizaron a temperatura ambiente, la viscosidad del aire es independiente de la temperatura. El valor de la temperatura empleado es de 293.15 K, lo que para la altura de la Ciudad de México da un valor de $\mu = 1.81E - 05$ (kg/ms). Como se puede ver, la diferencia entre los valores obtenidos a partir de tablas y de la Eq. (A.2) son menores al 2%. Con los valores para la densidad y la viscosidad dinámica del aire, la velocidad de la corriente libre (o velocidad terminal de la semilla) y el valor de la cuerda media se obtuvieron los números de Reynolds para cada muestra. El intervalo de números de Reynolds para 17 muestras fue de $1474 \leq Re \leq 1866$.

Apéndice B

Criterios de identificación de vórtices

En este apéndice se presentan los múltiples criterios de identificación de vórtices a partir de los cuales se escogió el criterio Z .

B.1. Criterio de vorticidad Z

La vorticidad en un punto está definida como la rotación local o el rotacional de un campo de velocidades tridimensional

$$\begin{aligned}\bar{\omega} = rot(\bar{v}) = \nabla \times \bar{v} = & \left(\frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z} \right) \hat{i} \\ & + \left(\frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x} \right) \hat{j} + \left(\frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y} \right) \hat{k}\end{aligned}\quad (\text{B.1})$$

donde cada término describe la rotación alrededor de los ejes x , y y z , respectivamente. Como no es posible calcular gradientes en un plano en la dirección z , para el plano xy sólo se determinó la rotación alrededor del eje z como:

$$\omega_z = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}\quad (\text{B.2})$$

B.2. Criterio Lambda 2

El criterio de identificación de vorticidad conocido como λ_2 esta basado en el gradiente de velocidad J :

$$J = \nabla \bar{v} = \begin{bmatrix} \partial U/\partial x & \partial U/\partial y & \partial U/\partial z \\ \partial V/\partial x & \partial V/\partial y & \partial V/\partial z \\ \partial W/\partial x & \partial W/\partial y & \partial W/\partial z \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

$$J = \begin{bmatrix} \partial U/\partial x & \partial U/\partial y & 0 \\ \partial V/\partial x & \partial V/\partial y & 0 \\ \partial W/\partial x & \partial W/\partial y & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

donde los términos del lado derecho de B.4 que toman en cuenta los gradientes en dirección z no pueden ser calculados a partir de datos en el plano xy , razón por lo que su valor se toma como cero. Dividiendo el tensor J en su parte simétrica y antisimétrica S y R , que corresponden al tensor de esfuerzo y tensor de deformación, respectivamente:

$$S = \frac{1}{2} (J + J^T) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2(\partial U/\partial x) & \partial V/\partial x + \partial U/\partial y & \partial W/\partial x \\ \partial V/\partial x + \partial U/\partial y & 2(\partial V/\partial y) & \partial W/\partial y \\ \partial W/\partial x & \partial W/\partial y & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

$$R = \frac{1}{2} (J - J^T) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\partial V/\partial x + \partial U/\partial y & -\partial W/\partial x \\ \partial V/\partial x - \partial U/\partial y & 0 & -\partial W/\partial y \\ \partial W/\partial x & \partial W/\partial y & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.6})$$

A partir de esto se calculan los valores característicos del tensor simétrico $S^2 + R^2$. Puesto que el tensor es real y simétrico, entonces los tres valores característicos son reales y pueden ser ordenados de manera que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$. Si el punto de interés es parte de un vórtice, entonces al menos dos valores característicos son negativos, lo que corresponde al criterio de identificación de vórtices λ_2 , en el que sólomente se debe de cumplir que $\lambda_2 < 0$. Los mínimos locales de los valores negativos valuados de λ_2 pueden ser utilizados

para identificar centros de vórtices, mientras que los valores positivos indican áreas del flujo en donde se encuentran presentes esfuerzos cortantes pero no remolinos [56].

B.3. Método de intensidad del remolino

La intensidad del remolino se define como la parte imaginaria del valor característico complejo del tensor del gradiente de velocidad J :

$$J = \nabla \bar{v} = \begin{bmatrix} \partial U/\partial x & \partial U/\partial y & \partial U/\partial z \\ \partial V/\partial x & \partial V/\partial y & \partial V/\partial z \\ \partial W/\partial x & \partial W/\partial y & \partial W/\partial z \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

Como los gradientes en el plano xy no pueden ser calculados en dirección z y al fijar estos valores como cero se simplifica el cálculo del valor característico, la raíz de la parte imaginaria puede ser calculada con:

$$\lambda_{ci}^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} \quad (\text{B.8})$$

donde el valor de λ_{ci}^2 representa la intensidad del remolino [57]. Los valores característicos sólo serán complejos si este número es negativo. Los mínimos locales de los valores negativos de la intensidad del remolino pueden ser empleados para identificar centros de vórtices, mientras que los valores positivos indican áreas del flujo donde pueden haber esfuerzos de corte presentes pero no remolinos. Al emplear este criterio, es importante enfatizar que sólo se recomienda utilizar los valores negativos de la Ec. B.8 y forzar todos los valores positivos a cero.

B.4. Criterio de la segunda invariante Q

La segunda invariante Q del gradiente de velocidad J de la Ec. B.3 también puede emplearse para identificar vórtices y se denota como:

$$Q = \left(\frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial W}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial W}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (\text{B.9})$$

En la vecindad inmediata de un vórtice identificado con este criterio, Q es positiva y tiene un valor máximo en el centro del vórtice. Nuevamente, como los gradientes en dirección z no pueden ser calculados a partir de datos en el plano xy , al asignarles un valor de cero la expresión B.9 queda como:

$$Q = \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} \quad (\text{B.10})$$

Los máximos locales de valores positivos de Q pueden ser usados para la identificación de los centros de un vórtice, mientras que los valores negativos indican áreas del flujo en donde puede haber esfuerzos de corte presentes pero no remolinos. Por lo tanto, es muy común que al emplear este criterio se utilizan sólo los valores positivos, al mismo tiempo que se asigna el valor de cero a todos los valores negativos [58, 59].