



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Nombre del Centro

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA DISPERSIÓN DE SEMILLAS. PARTE I: ACONDICIONAMIENTO DEL TÚNEL DE VIENTO Y ENSAYOS PRELIMINARES

Alumno: Rocío López Rodríguez

Tutores: D^a. María Rocío Bolaños Jiménez

D. José Ignacio Jiménez González

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Enero, 2023



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica

Doña Rocío Bolaños Jiménez y Don José Ignacio Jiménez González , tutores del Trabajo Fin de Grado titulado: Estudio experimental de la dispersión de semillas. Parte I: Acondicionamiento del túnel de viento y ensayos preliminares, que presenta Rocío López Rodríguez, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, febrero de 2023

El alumno:

Rocío López Rodríguez

Los tutores:

BOLAÑOS
JIMENEZ
MARIA ROCIO
- 77329190Q

Firmado digitalmente
por BOLAÑOS JIMENEZ
MARIA ROCIO -
77329190Q
Fecha: 2023.02.08
15:51:24 +01'00'

JIMENEZ
GONZALEZ
JOSE IGNACIO
- 15510201J

Firmado digitalmente
por JIMENEZ
GONZALEZ JOSE
IGNACIO - 15510201J
Fecha: 2023.02.08
22:42:15 +01'00'

Rocío Bolaños Jiménez y José I. Jiménez González

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	13
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1 Resumen/Abstract	17
1.2 Motivación, justificación y objetivos del trabajo	17
1.3 Estado del arte del problema	23
1.4 Conceptos previos	35
1.4.1 Conceptos básicos de aerodinámica	35
1.4.2 Túneles de viento	46
1.5 Descripción del problema y análisis dimensional	49
2. TRABAJO EXPERIMENTAL	58
2.1. Metodología experimental	58
2.2 Descripción y caracterización de las especies estudiadas.	60
2.2.1 Arabidopsis thaliana	64
2.2.2 Ononis natrix	66
2.2.3. Urtica dioica	67
2.2.4 Thymus vulgaris	69
2.2.5 Taraxacum officinale	71
2.2.6 Brachypodium	82
2.3 Descripción y puesta a punto de la instalación: Banco de ensayos	84
2.3.1 Acondicionamiento y caracterización del túnel de viento	85
2.3.2 Sistema de grabación con cámara de alta velocidad, selección de la óptica y diseño del sistema de iluminación.	95
2.4 Generación de las superficies que emulan el sustrato	99
3. RESULTADOS	106
3.1 Velocidad crítica y distancia de dispersión	106

3.1.1 Semillas sin estructura de vuelo: <i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Ononix natrix</i> y <i>Urtica dioica</i> .	106
- <i>Arabidopsis thaliana</i>	106
- <i>Ononix natrix</i>	107
- <i>Urtica dioica</i>	107
3.1.2. Semillas con estructura de vuelo: <i>Thymus vulgaris</i> , <i>Taraxacum officinale</i> , <i>Brachypodium distachyon</i> y <i>Brachypodium stacei</i> .	112
- <i>Thymus vulgaris</i>	112
- <i>Taraxacum officinale</i>	116
- <i>Brachypodium distachyon</i> y <i>stacei</i>	126
3.2 Velocidad de vuelo de la semilla	135
3.2.1. Semillas sin estructura de vuelo	136
3.2.2 Semillas con estructura de vuelo	138
- <i>Thymus vulgaris</i>	138
- <i>Taraxacum officinale</i>	141
- <i>Brachypodium stacei</i>	144
3.3. Comparación entre especies	149
4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	160
5. BIBLIOGRAFÍA	163
6. ANEXOS	167
6.1. Anexo I: Análisis de datos en Matlab para comprobar la uniformidad del flujo	167
6.2. Anexo II: Medición intensidad turbulenta	169
6.3. Anexo III: Tablas de ensayos para la obtención de la velocidad crítica	189
6.4. Anexo IV: Tablas de cálculo de velocidad instantánea de la semilla	194

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Escalas típicas de longitud (figura superior) y tiempo (figura inferior) en la interacción del viento y las plantas (de Langre, E. 2008)	16
Figura 1.2. Condiciones ambientales afectadas por el cambio ambiental global, que provocan una respuesta rápida en la capacidad de dispersión (Johnson et al. 2019)	18
Figura 1.3. Tipos de vías de dispersión (Wilson et al. 2009)	20
Figura 1.4. Etapas de dispersión y posibilidades de su modificación a través de respuestas rápidas de los rasgos de dispersión de plantas al cambio ambiental global	23
Figura 1.5. Potencial de dispersión secundaria (s/m) de las morfologías de las semillas en 4 superficies diferentes: grava, arcilla, arena y ladrillo (Zhu et Al. 2019).	27
Figura 1.6. Causas de la relación entre la dispersión primaria y secundaria por el viento en superficies lisas (Zhu et al. 2019)	28
Figura 1.7. Diagrama conceptual de cómo la orientación de las semillas puede cambiar en superficies de tierra con diferentes rugosidades (Zhu et al. 2019)	28
Figura 1.8. Posición típica de una diáspora entre elementos rugosos (Johnson y Fryer 1992)	29
Figura 1.9. Porcentaje previsto de diferentes especies de semillas que permanecen sin moverse en relación con la resistencia al movimiento de semillas en cuatro superficies diferentes en un túnel de viento	30
Figura 1.10. Diferentes geometrías de paredes ranuradas (Vogel, S.1994)	31
Figura 1.11. Fuerzas del fluido circundante sobre un objeto bidimensional:	34
Figura 1.12. Figura superior ejemplo de área frontal. Figura inferior ejemplo de área en planta.	36
Figura 1.13. Coeficientes aerodinámicos adimensionales típicos representados respecto al ángulo de ataque (Schetz y Fuhs 1996)	37
Figura 1.14. Terminología perfiles aerodinámicos (Vogel, S.1994)	38

Figura 1.15. Ejemplos de lugares donde se generan vórtices (Vogel, S. 1994)	39
Figura 1.16. (a) Flujo potencial con circulación alrededor de un perfil (b) Flujo potencial y flujo tras la separación de la corriente alrededor de un cuerpo romo (Fernández Fera, R. 2001).	40
Figura 1.17. Coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds para un cilindro circular liso y una esfera lisa (Munson et al. 2006).	41
Figura 1.18. Desprendimiento de flujo tras un cilindro circular.	42
Figura 1.19. Carácter del coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds para objetos con varios grados de aerodinámica	42
Figura 1.20. Capa límite bidimensional sobre una superficie (Fernández Fera, R. 2001).	43
Figura 1.21. Capa límite sobre una placa plana con ángulo de incidencia nulo (Fernández Fera, R. 2001).	43
Figura 1.22. Flujo de la capa límite (a,c) y flujo de la capa dosel (b,d)	44
Figura 1.23. Esquema de túnel de viento (a) circuito abierto y (b) circuito cerrado (Cattafesta et al. 2010).	46
Figura 1.24. Esquema de una sección de panal de abeja hexagonal (Cattafesta et al. 2010).	47
Figura 1.25. Boceto ilustrativo de las variables del problema. Figura superior vista del plano yz, figura inferior vista del plano xy.	50
Figura 2.1. Boceto de referencia de la diáspora (semilla y estructura de vuelo), ángulo de ataque y dirección de la velocidad del túnel de viento.	58
Figura 2.2. Bocetos de la diáspora para ángulos de ataque = 0° y 180° .	58
Figura 2.3. Bocetos de la diáspora para ángulos de ataque intermedios: 45° , 90° y 135° .	58
Figura 2.4. Diversas morfologías de semillas mostrando área frontal y lateral.	59
Figura 2.5. Imagen y boceto de una semilla de arce como referencia a las semillas autorotantes (Roccia et al. 2013)	60

Figura 2.6. Vista superior de las diferentes especies de semillas usadas en los experimentos	62
Figura 2.7. Planta <i>Arabidopsis thaliana</i>	64
Figura 2.8. Caracterización nº2 <i>Arabidopsis Thaliana</i>	64
Figura 2.9. Planta <i>Ononix natrux</i>	65
Figura 2.10. Caracterización nº2 <i>Ononix natrux</i> .	66
Figura 2.11. Planta <i>Urtica dioica</i>	67
Figura 2.12. Caracterización nº2 <i>Urtica dioica</i> .	67
Figura 2.13. Planta de <i>Thymus vulgaris</i> a la izquierda, detalle de sus flores a la derecha.	68
Figura 2.14. Caracterización nº2 <i>Thymus Vulgaris</i> .	69
Figura 2.15. Caracterización nº2 <i>Thymus Vulgaris</i> . Medidas de la semilla individual	69
Figura 2.16. Flor amarilla y bola de pelusa blanca formada después de la madurez de la semilla de diente de león a la izquierda. Dispersión por viento del diente de león a la derecha.	70
Figura 2.17. Esquema de una diáspora de diente de león que ilustra las líneas de flujo de aire a través y alrededor del vilano (Seale and Nakayama 2020).	71
Figura 2.18. Esquema que demuestra el cierre del vilano del diente de león por exposición al agua (Seale and Nakayama 2020).	72
Figura 2.19. A la izquierda esquema semilla diente de león	72
Figura 2.20. Modelado de haz de filamentos flexibles del diente de león (Sun and Guo 2022).	73
Figura 2.21. Caracterización nº1 <i>Taraxacum officinale</i> .	75
Figura 2.22. Caracterización nº1 <i>Taraxacum officinale</i> .	75
Figura 2.23. Modelo de papus con una porosidad de 0,89 (Yi-Ming Du et al. 2021).	76
Figura 2.24. Modelos de diente de león con diferentes porosidades	76
Figura 2.25. (a) Semilla de diente de león en túnel vertical genera un anillo de vórtice separado con el punto de remanso por encima del papus. (b) Por el contrario, el	

vórtice para un disco sólido está unido y tiene el punto de remanso en la superficie del disco (Cummins et al. 2018). 77

Figura 2.26. La porosidad del papus y el número de Reynolds determinan la estabilidad del vórtice. Para una porosidad dada, existe un número de Reynolds crítico por debajo del cual se forma un anillo de vórtice separado estable (SVR). 78

Figura 2.27. Comportamientos de flujo para 79

Figura 2.28. Relación coeficientes de arrastre del disco poroso (C_d) con disco sólido (C_{d_solid}) respecto ε en $Re = 100, 200, 300$ y 400 (Dong et al 2021) 80

Figura 2.29. a) El coeficiente de arrastre para semillas de diente de león naturales y ponderadas artificialmente en función de Re 80

Figura 2.30. Plantas *Brachypodium stacei* y *distachyon* a la izquierda. Detalle de la espiga de una *Brachypodium distachyon* a la derecha. 81

Figura 2.31. Caracterización nº1 *Brachypodium Distachyon* 82

Figura 2.32. Túnel de viento usado en los experimentos (vista perspectiva). 85

Figura 2.33. Túnel de viento usado en los experimentos (vista perfil). 85

Figura 2.34. Anemómetro AIRFLOW TA430 utilizado en los ensayos 87

Figura 2.35. Área transversal de salida del túnel de viento y distribución de los puntos de medida 89

Figura 2.36. Gráfica adimensional de velocidad a la salida del túnel con una potencia del ventilador del 100% 89

Figura 2.37. Anemómetro Dostmann TA 888 utilizado para la medición de la intensidad turbulenta 91

Figura 2.38. Gráfica de evolución temporal de la velocidad instantánea para la velocidad media de 3.3 m/s 92

Figura 2.39. Esquema instalación túnel de viento 93

Figura 2.40. Diagrama de proceso (Panel de control) 93

Figura 2.41. Pantalla principal del software SCADA para controlar el túnel de viento 94

Figura 2.42. Configuración de las condiciones de grabación 96

Figura 2.43. Sistema final de grabación del túnel de viento	97
Figura 2.44. Foto tomada con la cámara de alta velocidad de la plataforma en el túnel de viento con una semilla de <i>Brachypodium</i> y en la que se aprecia la escala de medida.	98
Figura 2.45. Previsualización en el software Ultimaker Cura del soporte para las plataformas.	98
Figura 2.46. A la izquierda sistema sujeción plataforma en el túnel de viento. A la derecha zoom del soporte usando un cristal (superficie lisa) como plataforma.	99
Figura 2.47. Placas A, B y C.	99
Figura 2.48. Placas 1-6 con variación de geometrías.	100
Figura 2.49. Coordenadas utilizadas para medir la rugosidad superficial empleando las ecuaciones 2.2 y 2.3. (Kalpakjian, S. y Schmid, S. 2008)	101
Figura 2.50. Boceto de la altura y el ancho de rugosidad de una superficie.	102
Figura 2.51. Rugosímetro Mituyoyo.	102
Figura 2.52. Planos de las placas 1 a 6. Indicadas la altura y el ancho de la rugosidad en mm.	104
Figura 3.1. Diagrama de cajas y bigotes para las semillas sin estructura de vuelo que consiguen abandonar la plataforma. Velocidad crítica (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).	109
Figura 3.2. Despegue <i>Urtica dioica</i> a 4,28 m/s en superficie lisa. Se observa como la semilla rueda hasta el final de la plataforma, incluso una vez abandona la plataforma sigue girando en el aire	109
Figura 3.3. Despegue <i>Urtica dioica</i> a 4,32 m/s en superficie lisa	110
Figura 3.4. Despegue <i>Urtica dioica</i> a 4,6 m/s en placa 6	110
Figura 3.5. Despegue <i>Urtica dioica</i> con 6,2 m/s en placa 6, distancia recorrida 85 cm	111
Figura 3.6. Diagrama de cajas y bigotes para <i>Thymus vulgaris</i> . Velocidad crítica (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).	114

Figura 3.7. Diagrama de cajas y bigotes para <i>Thymus vulgaris</i> . Distancia de dispersión (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).	114
Figura 3.8. Despegue <i>Thymus vulgaris</i> en superficie lisa a la izquierda y en rugosidad A a la derecha.	115
Figura 3.9. Diagrama de cajas y bigotes para <i>Taraxacum officinale</i> en superficie lisa. Ángulo de ataque en el eje x respecto velocidad crítica en el eje Y.	117
Figura 3.10. Diagrama de cajas y bigotes para <i>Taraxacum officinale</i> . Velocidad crítica (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).	119
Figura 3.11. Diagrama de cajas y bigotes para <i>Taraxacum officinale</i> . Distancia de dispersión (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).	119
Figura 3.12. <i>Taraxacum officinale</i> $\beta = 180^\circ$ en superficie lisa. La semilla se reorienta a $\beta = 0^\circ$.	120
Figura 3.13. <i>Taraxacum officinale</i> $\beta = 180^\circ$ en superficie lisa. La semilla no se reorienta.	121
Figura 3.14. <i>Taraxacum officinale</i> $\beta = 90^\circ$ en superficie lisa. La semilla se reorienta a $\beta = 0^\circ$.	122
Figura 3.15. <i>Taraxacum officinale</i> $\beta = 0^\circ$ en superficie lisa.	123
Figura 3.16. <i>Taraxacum officinale</i> $\beta = 0^\circ$ en superficie lisa	124
Figura 3.17. <i>Taraxacum officinale</i> $\beta = 0^\circ$ en placa A	125
Figura 3.18. Diagrama de cajas y bigotes para <i>Brachypodium stacei</i> . Velocidad crítica (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).	128
Figura 3.19. Diagrama de cajas y bigotes para <i>Brachypodium stacei</i> . Distancia de dispersión (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).	129
Figura 3. 20.a. <i>Brachypodium stacei</i> $\beta = 180^\circ$, reorientación a $\beta = 0^\circ$	129
Figura 3.20.b. <i>Brachypodium stacei</i> $\beta = 180^\circ$, despegue semilla	130
Figura 3.21. <i>Brachypodium stacei</i> con $\beta = 135^\circ$, la semilla se reorienta a $\beta = 0^\circ$. Vista superior de la plataforma	130
Figura 3.22. <i>Brachypodium stacei</i> $\beta = 0^\circ$ en superficie lisa	131

Figura 3.23. <i>Brachypodium stacei</i> $\beta = 0^\circ$ en superficie lisa a la izquierda y en placa A a la derecha.	132
Figura 3.24. <i>Brachypodium stacei</i> $\beta = 0^\circ$ en placa B.	133
Figura 3.25. <i>Brachypodium stacei</i> $\beta = 0^\circ$ en placa 3 a la izquierda y en placa 5 a la derecha.	134
Figura 3.26. Descomposición en coordenadas cartesianas de la velocidad de una semilla.	135
Figura 3.27. Gráfica de la velocidad de la semilla respecto al tiempo para la especie <i>Urtica dioica</i> en diferentes rugosidades.	136
Figura 3.28. Gráfica velocidad horizontal de la semilla respecto al tiempo de <i>Urtica dioica</i> en diferentes rugosidades.	137
Figura 3.29. Gráfica velocidad vertical de la semilla respecto al tiempo de <i>Urtica dioica</i> en diferentes rugosidades.	137
Figura 3.30. Gráfica velocidad de la semilla respecto al tiempo de <i>Thymus Vulgaris</i> en diferentes rugosidades.	139
Figura 3.31. Gráfica velocidad horizontal de la semilla respecto al tiempo de <i>Thymus Vulgaris</i> en diferentes rugosidades.	139
Figura 3.32. Gráfica velocidad vertical de la semilla respecto al tiempo de <i>Thymus Vulgaris</i> en diferentes rugosidades.	140
Figura 3.33. Gráfica de la velocidad de la semilla respecto al tiempo de <i>Taraxacum officinale</i> con condiciones constantes	141
Figura 3.36. Gráfica velocidad horizontal de la semilla respecto al tiempo de <i>Taraxacum officinale</i> variando los ángulos de ataque.	143
Figura 3.42. Gráfica velocidad horizontal de la semilla respecto al tiempo de <i>Brachypodium stacei</i> con distintas rugosidades.	148
Figura 3.43. Gráfica velocidad vertical de la semilla respecto al tiempo de <i>Brachypodium stacei</i> con distintas rugosidades.	149
Figura 3.44. Gráfico de barras de la velocidad crítica de las diferentes especies en función de su rugosidad.	151

Figura 3.45. Gráfico de barras del número de Reynolds de las diferentes especies en función de su rugosidad.	153
Figura 3.46. Gráfico de barras del número de Reynolds de <i>Taraxacum officinale</i> para la superficie lisa, S0, en función del ángulo de ataque.	153
Figura 3.47. Gráfica adimensional velocidad de la semilla respecto al tiempo de <i>Urtica dioica</i> .	155
Figura 3.48. Gráfica adimensional velocidad de la semilla respecto al tiempo de <i>Brachypodium stacei</i> .	156
Figura 3.50. Gráfica adimensional velocidad de la semilla respecto al tiempo de <i>Taraxacum officinale</i> usando el diámetro del vilano.	158
Figura 6.2. Gráfica velocidad en m/s.	168
Figura 6.3. Gráfica velocidad adimensional.	169
Figura 6.4. Ejemplo archivo de texto generado por el software Meeter con los datos extraídos del anemómetro.	170
Figura 6.5. Ejemplo Software y gráfica. Imagen superior para el 50% de potencia, imagen inferior para el 100% de potencia.	171
Figura 6.6. Gráfica de evolución temporal de la velocidad instantánea para la velocidad media de 3.3 m/s.	186
Figura 6.7. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 3.8 m/s.	186
Figura 6.8. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 4.6 m/s.	187
Figura 6.9. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 4.9 m/s.	187
Figura 6.10. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 5.2 m/s.	188
Figura 6.11. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 5.6 m/s.	188
Figura 6.12. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 6.2 m/s.	189

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Matriz dimensional de las variables que describen el problema.	51
Tabla 1.2. Medidas geométricas de las diferentes especies y números adimensionales relacionados con estas.	56
Tabla 2.2. Peso medio y desviación típica (σ) de las semillas de las siete especies a estudiar	62
Tabla 2.3. Caracterización geométrica <i>Arabidopsis thaliana</i> .	65
Tabla 2.4. Caracterización geométrica <i>Ononix natrix</i> .	66
Tabla 2.5. Caracterización geométrica <i>Urtica dioica</i> .	68
Tabla 2.6. Caracterización geométrica <i>Thymus vulgaris</i> .	70
Tabla 2.7. Masa, radio del pappus y velocidad terminal de <i>Taraxacum officinale</i> reportados en la literatura.	74
Tabla 2.8. Caracterización geométrica <i>Taraxacum officinale</i> .	74
Tabla 2.10. Caracterización geométrica <i>Brachypodium stacei</i> y <i>distachyon</i> .	83
Tabla 2.10. Resumen mediciones velocidad media, desviación típica y cálculo intensidad turbulenta según la ecuación 1.5	92
Tabla 2.11. Datos de altura y ancho de la rugosidad de las diferentes placas utilizadas, así como su relación.	103
Tabla 3.1. Resultados de la velocidad crítica y números adimensionales de las especies <i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Ononix natrix</i> y <i>Urtica dioica</i> (Ver Anexo III para más detalle).	108
Tabla 3.2. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de la semilla <i>Thymus vulgaris</i> .	113
Tabla 3.3. Ensayos con <i>Taraxacum officinale</i> en superficie lisa variando la orientación de la semilla.	116
Tabla 3.4. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de la especie <i>Taraxacum officinale</i> para $\beta = 0^\circ$	118

Tabla 3.5. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de las especies <i>Brachypodium stacei</i> (tabla superior) y <i>Brachypodium distachyon</i> (tabla inferior).	128
Tabla 3.6. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla <i>Urtica dioica</i> en los ensayos de dispersión primaria y secundaria.	138
Tabla 3.7. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla <i>Thymus vulgaris</i> en los ensayos de dispersión primaria y secundaria.	140
Tabla 3.8. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla <i>Taraxacum officinale</i> en ensayos con mismas condiciones variando la intensidad turbulenta.	141
Tabla 3.9. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla <i>Taraxacum officinale</i> en ensayos con mismas condiciones variando el ángulo de ataque.	142
Tabla 3.10. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla <i>Taraxacum officinale</i> en ensayos con mismas condiciones variando la intensidad turbulenta.	144
Tabla 3.11. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla <i>Brachypodium stacei</i> en ensayos con mismas condiciones variando el ángulo de ataque.	145
Tabla 3.12. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla <i>Brachypodium stacei</i> en distintas rugosidades.	147
Tabla 3.13. Resultados morfológicos y valores de velocidad crítica y velocidad máxima alcanzada por la semilla para las distintas especies analizadas durante el trabajo.	150
Tabla 3.14. Números adimensionales que controlan el problema.	152
Tabla 3.15. Rugosidades relativas, Reynolds y secuencia de fotos correspondientes a los ensayos de la gráfica adimensional de <i>Urtica dioica</i> .	156
Tabla 3.16. Rugosidades relativas, Reynolds y secuencia de fotos correspondientes a los ensayos de la gráfica adimensional de <i>Brachypodium stacei</i> .	157
Tabla 3.17. Rugosidades relativas, Reynolds y secuencia de fotos correspondientes a los ensayos de la gráfica adimensional de <i>Thymus vulgaris</i> .	158
Tabla 3.18. Rugosidades relativas, Reynolds y secuencia de fotos correspondientes a los ensayos de la gráfica adimensional de <i>Taraxacum officinale</i> .	159

Tabla 6.1. Resultados código Matlab: velocidad media y desviación de las 3 mediciones de velocidad para cada % potencia del ventilador, y cálculo final de la intensidad turbulenta.	185
Tabla 6.13. Resultados de la velocidad crítica y números adimensionales de las especies <i>Arabidopsis thaliana</i> , <i>Ononix natrix</i> y <i>Urtica dioica</i> .	189
Tabla 6.14. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de la semilla <i>Thymus vulgaris</i> .	190
Tabla 6.15. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de la semilla <i>Taraxacum officinale</i> , variando el ángulo de ataque.	191
Tabla 6.16. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de la semilla <i>Taraxacum officinale</i> , variando la rugosidad.	192
Tabla 6.17. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de la semilla <i>Brachypodium</i> , variando la rugosidad.	193
Tabla 6.18. Ejemplo cálculo del error de la velocidad en la especie <i>Urtica dioica</i> , ensayo correspondiente a la tabla 6.4.	195
Tabla 6.19. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de <i>Urtica dioica</i> .	196
Tabla 6.20. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de <i>Thymus vulgaris</i> .	197
Tabla 6.22. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de <i>Taraxacum officinale</i> sin malla metálica.	199
Tabla 6.23. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de <i>Taraxacum officinale</i> variando el ángulo.	200
Tabla 6.24. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de <i>Brachypodium stacei</i> variando el ángulo.	201

Tabla 6. 25.a. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de *Brachypodium stacei* para distintas rugosidades. 202

Tabla 6.25.b. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de *Brachypodium stacei* para distintas rugosidades. 203

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen/Abstract

La polinización de las plantas se basa en la dispersión de las semillas de las mismas, esta dispersión está fuertemente influenciada por el viento. Sin embargo, hasta el momento, no hay estudios rigurosos sobre este tema, ni se han desarrollado técnicas que permitan una caracterización precisa de la dinámica del vuelo de las semillas. Por ello, el objetivo de este trabajo es diseñar tanto la instalación experimental como el tipo de experimentos que permitan caracterizar el vuelo de semillas de diferentes plantas usando un túnel de viento. En concreto, esta parte se centra en acondicionar el túnel de viento y en realizar ensayos con semillas individuales para analizar su dispersión secundaria.

La dispersión de semillas es una parte fundamental en el ciclo biológico de las plantas. Muchas especies producen frutos con características que facilitan su dispersión por un vector determinado. Por ejemplo, las especies anemócoras tienen frutos con alas o vilanos para aumentar su distancia de dispersión, las sámaras son frutos típicos de la dispersión anemócora...

Keywords: anemochory, morphology, lift speed, secondary dispersal, diaspore, drag coefficient, roughness, attack angle...

1.2 Motivación, justificación y objetivos del trabajo

Las interacciones viento-planta cubren una gama mucho más amplia de mecanismos que los comúnmente experimentados a escala humana, desde los efectos térmicos en una hoja hasta la dispersión de semillas a gran distancia. Cuestiones biológicas fundamentales han creado la necesidad de datos y modelos de interacciones mecánicas viento-planta para ayudar a comprender los efectos del viento en las funciones esenciales de una planta.

Las escalas de longitud de interés comienzan en 10^{-6} m, que es el tamaño del polen pequeño en el aire. Las semillas escalan a 10^{-3} m, mientras que los órganos de las plantas, como hojas, flores, ramas y las propias plantas, varían de 10^{-2} m (hojas pequeñas) a 10^2 m (los árboles más grandes).

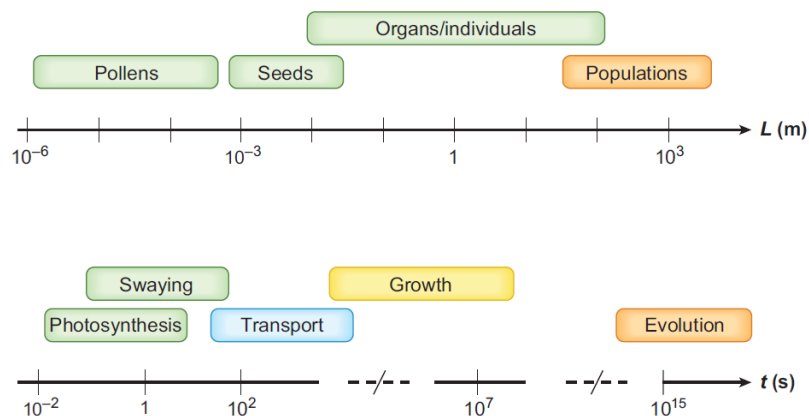


Figura 1.1. Escalas típicas de longitud (figura superior) y tiempo (figura inferior) en la interacción del viento y las plantas (de Langre, E. 2008)

El flujo puede ser uno de los aspectos más complicados del mundo físico. Por ello los efectos de este suelen ignorarse con demasiada frecuencia o relegarse a paréntesis o especulaciones. Sin embargo, una vida sumergida en un fluido no es nada inusual para un organismo.

La dispersión pasiva de propágulos por viento o corrientes de agua es practicada por al menos un miembro de cada división principal de animales, así como de plantas. Un propágulo tiene que liberarse en la corriente en primer lugar, y necesita aterrizar en una superficie al final del viaje (Vogel, S. 1994)

La dispersión de semillas es el mecanismo predominante por el cual las plantas se mueven en el espacio. Avances dramáticos en el modelado de la dispersión de semillas y polen por el viento han sido motivados en las últimas décadas por una creciente necesidad de comprender y predecir los procesos ecológicos y evolutivos en las poblaciones de plantas.

La dispersión ocurre cuando las semillas se alejan de la planta de origen. La longitud de este movimiento, la distancia de dispersión D , es la medida del proceso de dispersión, y la distribución de distancias de dispersión, el núcleo de dispersión de semillas $p(x)$, es su descriptor estadístico básico. $P(x)$ es una función de densidad de probabilidad que representa la probabilidad de que una semilla dispersa llegue a una distancia x de la fuente (Nathan et al. 2011).

La capacidad de dispersión de semillas se convierte en un rasgo clave que determina la posibilidad de las especies de colonizar nuevos hábitats (Clark et al. 2001; Soons et al. 2005; Nathan et al. 2011).

La propia dispersión del viento, así como la producción de semillas y el establecimiento de semillas dispersas, pueden verse modificadas por el cambio climático y la fragmentación, debido a cambios en las condiciones del viento (Soons et al. 2004; Meehl et al. 2007; Kuparinen et al. 2009; Nathan et al. 2011), en las concentraciones atmosféricas de CO_2 (LaDeau y Clark 2001) y en la supervivencia posterior a la dispersión (Nathan et al. 2011).

Las plantas proporcionan servicios ecosistémicos esenciales para las poblaciones humanas, como la alimentación humana y de animales, la obtención y desarrollo de nuevos medicamentos, la fabricación de materiales, o el cultivo de biocombustibles (Haines-Young y Potschin 2010; RBG Kew 2016). Por tanto, urge entender bien la respuesta de las plantas a estos factores de riesgo de extinción.

Más allá de los efectos de la dispersión sobre el potencial evolutivo de las poblaciones vegetales, la dispersión de las diásporas en particular es un proceso clave para el mantenimiento de los ecosistemas terrestres y la colonización de nuevos hábitats (Wang y Smith 2002).

Global environmental threat	Variables	Exemplary studies	Main consequence for dispersal ability
Plants			
Climate change	Temperature increase	Zhang <i>et al.</i> (2012)	Increase in dispersal distance
		Teller <i>et al.</i> (2016)	Increase in probability of seed release
		Li <i>et al.</i> (2018)	Increase in fruit dehiscence—phenology of dispersal
	Drought	Teller <i>et al.</i> (2014)	Increase in dispersal distance
	Decrease in water availability	Martorell and López (2014)	Increase in highly dispersible seeds
Habitat fragmentation	Increase in distance of suitable habitat patches	Cheptou <i>et al.</i> (2008)	Increase of proportion of non-dispersing seeds in highly fragmented habitat
Nutrient cycling	Nutrient depletion	Imbert and Ronce (2001)	Increase in seeds with dispersal structures
Biodiversity loss	Loss of dispersal vectors	Galetti <i>et al.</i> (2013)	Decrease in seed size—negative effects on population fitness
Animals			
Climate change	Temperature increase		
	Drought	Rozen-Rechels <i>et al.</i> (2018)	Increased anxiety (maternal effects) and greater exploration behaviour
	Precipitation, extreme weather events	Loe <i>et al.</i> (2016)	Behavioral plasticity leads to increased movement to favourable habitats
	Ocean acidification	Rossi <i>et al.</i> (2018)	Maladaptation to environmental cues to unsuitable habitat in larval fish
	Winter weather conditions	Gurarie <i>et al.</i> (2017)	
Habitat fragmentation	Wind	Vansteelandt <i>et al.</i> (2017)	
		Moraes <i>et al.</i> (2018)	
	Comparison extant metapopulation with fragmented extinct population	Fountain <i>et al.</i> (2016)	Selection for genotypes with higher colonization capacity in fragmented landscapes in butterflies

Figura 1.2. Condiciones ambientales afectadas por el cambio ambiental global, que provocan una respuesta rápida en la capacidad de dispersión (Johnson *et al.* 2019)

Las semillas se pueden dispersar por muchos vectores diferentes y se pueden redispersar varias veces hasta que se depositan en su ubicación final. En el caso de las plantas, la dispersión generalmente se caracteriza mediante el núcleo de dispersión o la función de densidad de probabilidad.

Para las semillas, el núcleo de dispersión total (TDK por sus siglas en inglés, Total Dispersion Kernel) describe la influencia combinada de todos los vectores de dispersión: primarios, secundarios y de orden superior, para una planta individual, población, especie o comunidad (Rogers *et al.* 2019)

Las semillas de la mayoría de las especies de plantas se dispersan por múltiples mecanismos: viento, agua, mecanismos balísticos, animales... (Nathan et al. 2008). Estos mecanismos involucran diferentes formas en que el mismo vector mueve las semillas. Como ejemplo de esto último, el viento puede dispersar semillas tanto por el aire (dispersión por el viento primario) como por el suelo (dispersión por el viento secundario), y cada mecanismo depende de diferentes rasgos funcionales (Nathan et al. 2002; Schurr et al. 2005).

Comprender el papel de cada vector dentro del TDK, y su influencia combinada en él, es de vital importancia para poder predecir las respuestas de las plantas a un entorno biótico o abiótico cambiante.

Aunque el TDK es ampliamente aceptado como concepto sencillo, no se ha puesto en práctica ampliamente en la última década a pesar de su importancia crucial para comprender los efectos de la dispersión en la dinámica de la comunidad. El hecho de que pocos estudios han medido un TDK completo se explica más fácilmente por el monumental esfuerzo requerido para medir todos los aspectos de la dispersión, incluyendo dónde se originó una semilla (fuente natal), los medios de dispersión (vectores abióticos y/o bióticos), el número de eventos de dispersión individuales a los que está sujeta una semilla (primaria, secundaria, terciaria, etc.), su ubicación final y, para TEDKs, el destino de la semilla (muerte o germinación, establecimiento y crecimiento) (Rogers et al. 2019)

La medición de la dispersión de semillas secundarias o de orden superior, así como la identificación de estos dispersores, a menudo requiere un conjunto diferente de métodos que los que se utilizarían para la dispersión de semillas primarias (Vander Wall et al. 2005; Gallegos et al. 2014).

Wilson y colaboradores, en 2009, distinguieron hasta seis tipos generales de vías de dispersión: dispersión de vanguardia, corredores, dispersión por salto, dispersión de larga distancia, dispersión masiva y cultivo.

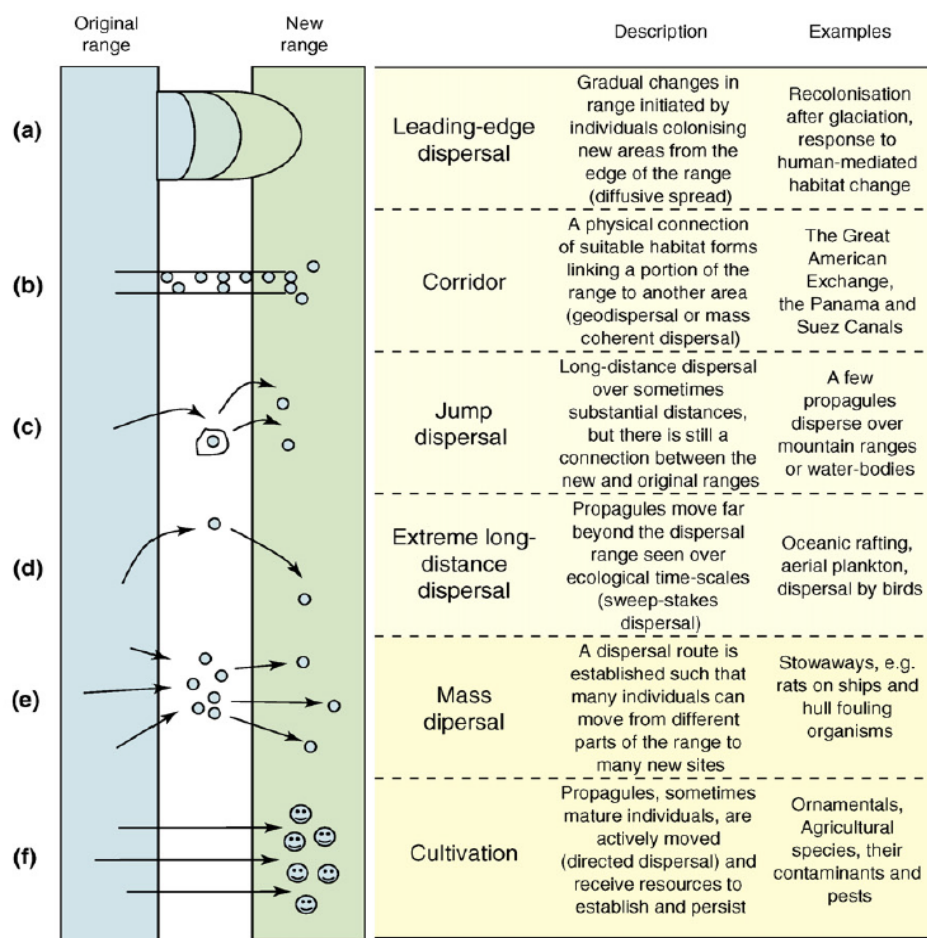


Figura 1.3. Tipos de vías de dispersión (Wilson et al. 2009)

En la mayoría de los sistemas reales, la dispersión es probablemente intermedia entre categorías o es una combinación de varias categorías.

La dispersión de semillas impulsada por el viento a lo largo del suelo se ha observado en pastizales templados (van Tooren 1988), ambientes costeros (Watkinson 1978; Redbo-Torstensson & Telenius 1995), tundra (Glaser 1981), hábitats alpinos (Chambers et al. 1991).), ambientes áridos y semiáridos (Reichman 1984; Milton 1995; Aguiar & Sala 1997), sobre nieve (Matlack 1989; Greene & Johnson 1997), así como en ambientes alterados por incendios (Bond 1988; Hammill et al. 1998), actividades humanas (Chambers et al. 1991; Campbell et al. 2003) o erupciones volcánicas (eg Fuller & del Moral 2003).

La dispersión por viento secundaria puede ser más importante que la dispersión primaria con respecto al patrón espacial de las poblaciones de plantas y el movimiento de semillas a larga distancia.

En consecuencia, la dispersión del viento secundario se considera importante para procesos tan diversos como la migración de plantas en respuesta al cambio climático (Midgley et al. 2002), la persistencia de especies en paisajes fragmentados (Bond 1988), la sucesión después de perturbaciones naturales o antropogénicas (Chambers et al. 1991; Campbell et al. 2003; Fuller & del Moral 2003), y el funcionamiento del ecosistema (Wiegand et al. 1995; Aguiar & Sala 1997).

1.3 Estado del arte del problema

Existe una gran cantidad de trabajos e investigaciones con el fin de comprender los procesos de dispersión con el objetivo de relacionar estos procesos con la ecología de poblaciones y comunidades, procesos de colonización, procesos evolutivos de las especies, etc. Por el contrario, existe una literatura limitada en cuanto a la parametrización, medición y predicción de la capacidad dispersiva (Valenzuela, V. 2021).

Durante el siglo pasado, se desarrollaron varios modelos mecánicos para estimar la magnitud de la dispersión de semillas por el viento y dilucidar la importancia relativa de los factores físicos y biológicos que afectan este proceso de transporte pasivo (Nathan et al. 2011).

En lo que concierne a estudios en relación a los efectos del cambio climático sobre los rasgos dispersivos de las plantas se han centrado solamente en el efecto de la sequía y la temperatura (Martorell y Martínez-López 2014; Teller et al. 2014), demostrando que los rasgos funcionales que son importantes para la dispersión pasiva (cuyo agente de dispersión es el viento principalmente) responden plásticamente a las señales ambientales, manteniendo o incluso incrementando la distancia de dispersión de sus semillas en condiciones de sequía (Teller et al. 2014).

Las posibles consecuencias de los rasgos de dispersión al cambio climático se ejemplifican con un estudio de Teller y sus colaboradores en 2014, donde estudiaron el efecto de la sequía en diversos rasgos de dispersión (*) durante diferentes etapas del proceso de dispersión en *Carduus nutans* (especie botánica de cardo) (Figura 1.4)

Las condiciones de sequía (figuras rojas) redujeron la altura de liberación de plantas y semillas, mientras que las plantas bien regadas (figuras azules) mostraron más variabilidad en su altura (A).

Curiosamente, las semillas de plantas más altas de *Carduus nutans* en el tratamiento de sequía se dispersan tanto como individuos del mismo tamaño en condiciones de buen riego debido a una disminución en la velocidad terminal de semillas en el tratamiento de sequía (B).

Bajo estrés por sequía, la plasticidad fenotípica de la planta materna y el rasgo de la semilla (C) podría favorecer la dispersión a mayor distancia (D) pero con el costo de menos semillas que también podrían germinar más tarde (E). Los efectos maternos para la próxima generación no se pudieron observar en este ejemplo (F).

Hoy en día existe un consenso general de que los modelos de dispersión de semillas por el viento son mucho más avanzados que los modelos de dispersión de semillas por cualquier otro vector. Actualmente, la dispersión primaria de semillas por el viento es probablemente el único tipo de dispersión en el que se pueden aplicar modelos mecánicos con alguna confianza. Pocos autores han estudiado los mecanismos que determinan la dispersión del viento secundario.

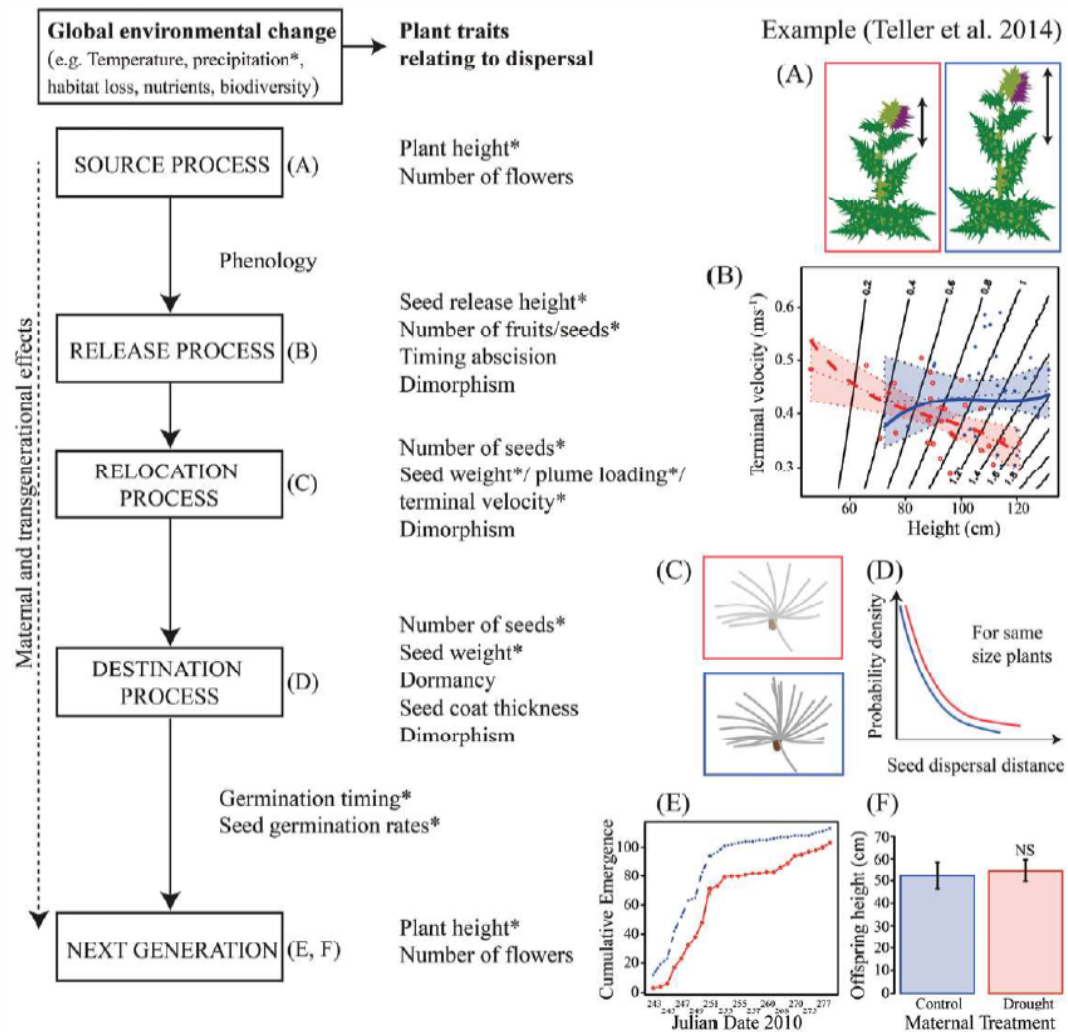


Figura 1.4. Etapas de dispersión y posibilidades de su modificación a través de respuestas rápidas de los rasgos de dispersión de plantas al cambio ambiental global (Teller et al. 2014)

El modelo analítico de dispersión a larga distancia de Wald, se deriva de la teoría de enfoque lagrangiano para el transporte de viento turbulento y hace mejores predicciones sobre las distancias de dispersión, particularmente la dispersión a larga distancia, que los modelos mecanísticos analíticos anteriores (Okubo y Levin 1989; Katul et al. 2005) Este modelo tiene la propiedad deseable de que sus parámetros están directamente relacionados con las características de la especie y el medio ambiente que se pueden obtener independientemente de los datos de distancia de dispersión, se deriva de modelos bien establecidos en mecánica de fluidos y predice una distribución gaussiana inversa (Wald) de distancias de dispersión, r (Katul et al. 2005)

$$p(r) = \left(\frac{\lambda'}{2\pi r^3} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{\lambda'(r - \mu')^2}{2\mu'^2 r} \right],$$

Ecuación 1.1. Modelo de WALD (Skarpaas, O. y Shea, K. 2007)

donde μ' es la media (el parámetro de ubicación) y λ' es el parámetro de escala:

$$\mu' = \frac{HU}{F}, \quad \lambda' = \left(\frac{H}{\sigma} \right)^2,$$

Ecuación 1.2. Parámetros ecuación de WALD (Skarpaas, O. y Shea, K. 2007)

Estos parámetros están relacionados con las especies y las características ambientales de la siguiente manera, donde H es la altura de liberación de la semilla, F es la velocidad de sedimentación de la semilla, U es la velocidad media horaria del viento horizontal entre H y el suelo, y σ es un parámetro de flujo turbulento que refleja la variación del viento debido a la estructura de la vegetación y las condiciones climáticas.

La tasa de dispersión aumenta exponencialmente con velocidades de sedimentación más bajas (F) y linealmente con alturas de liberación más altas (H).

Zhu et al. 2019 investigaron cómo los rasgos afectan la dispersión de semillas impulsada por el viento en el aire y en el suelo, dispersión por viento primario y secundario, respectivamente. Para ello se midió la distancia de dispersión primaria a diferentes velocidades del viento y alturas de liberación, y se cuantificó el potencial de dispersión secundaria como la velocidad del viento umbral para el movimiento de semillas en cuatro superficies diferentes.

La distancia de dispersión del viento primario aumenta con la altura de liberación de la semilla y disminuye con la velocidad de caída terminal de la semilla (Greene y Johnson 1989; Soons et al. 2004).

En la dispersión por viento secundario, una semilla comienza a moverse por el suelo cuando experimenta viento por encima de un umbral de velocidad de despegue, U_{lift} , en el que la resistencia supera la fricción (Johnson y Fryer 1992; Schurr et al. 2005) Siendo la condición para el inicio del movimiento de la semilla en ausencia de obstáculos en términos de una velocidad de despegue umbral:

$$p|\vec{U}_{ref}| = |\vec{U}| > U_{lift} = \frac{2mg}{\rho A \left(C_L + \frac{C_D}{\mu_s} \right)}$$

Ecuación 1.3. Condición de inicio del movimiento de una semilla (Schurr et al. 2005).

U_{lift} es, por tanto, un parámetro agregado que resume las propiedades de la semilla, las interacciones semilla-superficie (μ_s , C_D , C_L) y las constantes físicas (g , ρ).

Esta velocidad de despegue a la altura de la semilla está relacionada con el umbral de la velocidad del viento a la altura de referencia, $U_{ref} = \frac{U_{lift}}{p}$, donde p es el parámetro de intercepción del viento de la semilla, una relación adimensional entre la velocidad del viento experimentada por la semilla y la velocidad del viento a la altura de referencia. Resume los efectos de la proyección vertical de la semilla (h) y el perfil de la velocidad del viento (que describe qué tan rápido la velocidad disminuye a medida que uno se acerca a la superficie del suelo) y (Schurr et al. 2005).

$$p = \begin{cases} \frac{h(\ln h - \ln z_0) - h + z_0}{h(\ln z_{ref} - \ln z_0)} & h > z_0 \\ 0 & h \leq z_0 \end{cases}$$

Ecuación 1.4. Parámetro de intercepción del viento para un perfil logarítmico (Schurr et al. 2005)

Para una semilla perfectamente esférica, la velocidad terminal y de despegue deberían ser directamente proporcionales. Sin embargo, en las semillas no esféricas, el área de forma en planta expuesta al flujo de aire puede diferir dependiendo de si la semilla cae por el aire o yace en el suelo, en consecuencia, la carga alar puede diferir.

Tanto la velocidad terminal como la velocidad de despegue dependen no solo de la carga alar, sino también de otras propiedades de la semilla, como los coeficientes de arrastre, fricción y sustentación (Johnson y Fryer 1992; Nathan et al. 2001; Schurr et al. 2005).

El índice de potencial de dispersión secundaria I_{sdp} depende de la interacción entre la morfología de la semilla y el tipo de superficie del suelo. Esta interacción es pequeña debido a que el potencial de dispersión secundaria de diferentes morfologías de semillas muestra respuestas similares al tipo de superficie del suelo. Para todas las morfologías de semillas, el potencial de dispersión secundaria aumenta con la suavidad de la superficie (Figura 1.5)

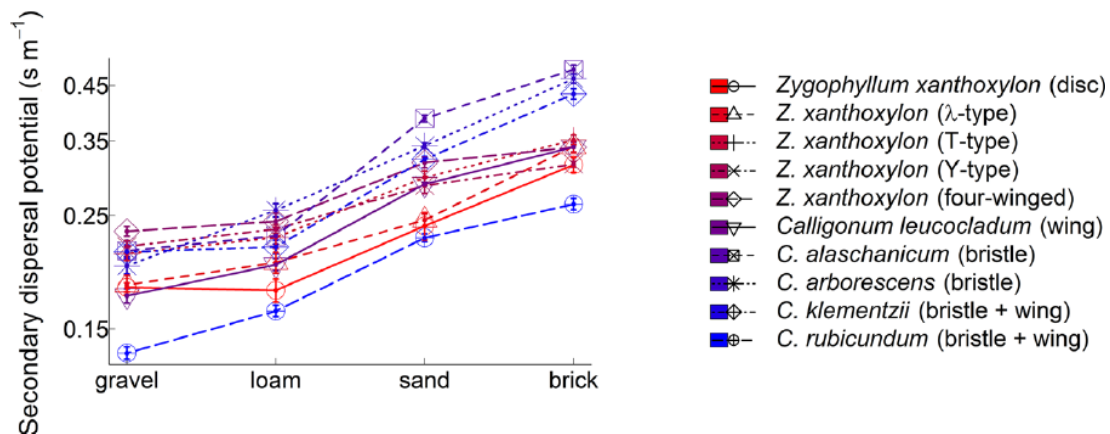


Figura 1.5. Potencial de dispersión secundaria (s/m) de las morfologías de las semillas en 4 superficies diferentes: grava, arcilla, arena y ladrillo (Zhu et Al. 2019).

En las semillas de *Zygophyllum*, el potencial de dispersión secundaria en general aumenta con el número de alas, pero este efecto es menos pronunciado en la superficie más lisa (ladrillo). En *Calligonum*, las semillas con cerdas en lugar de alas tienen el mayor potencial de dispersión secundaria.

Una relación v/h (relación entre la proyección de semillas horizontal y vertical) creciente aumenta el potencial de dispersión secundaria ($I_{sdp} = 1/U_{ref} = p/U_{lift}$) al aumentar el parámetro de intercepción del viento p , pero también aumenta la carga alar y la velocidad terminal y, por lo tanto, disminuye la distancia de dispersión primaria.

En un entorno de dispersión determinado, las semillas más planas favorecen la dispersión por el viento primario y las semillas más redondas favorecen la dispersión por el viento secundario.

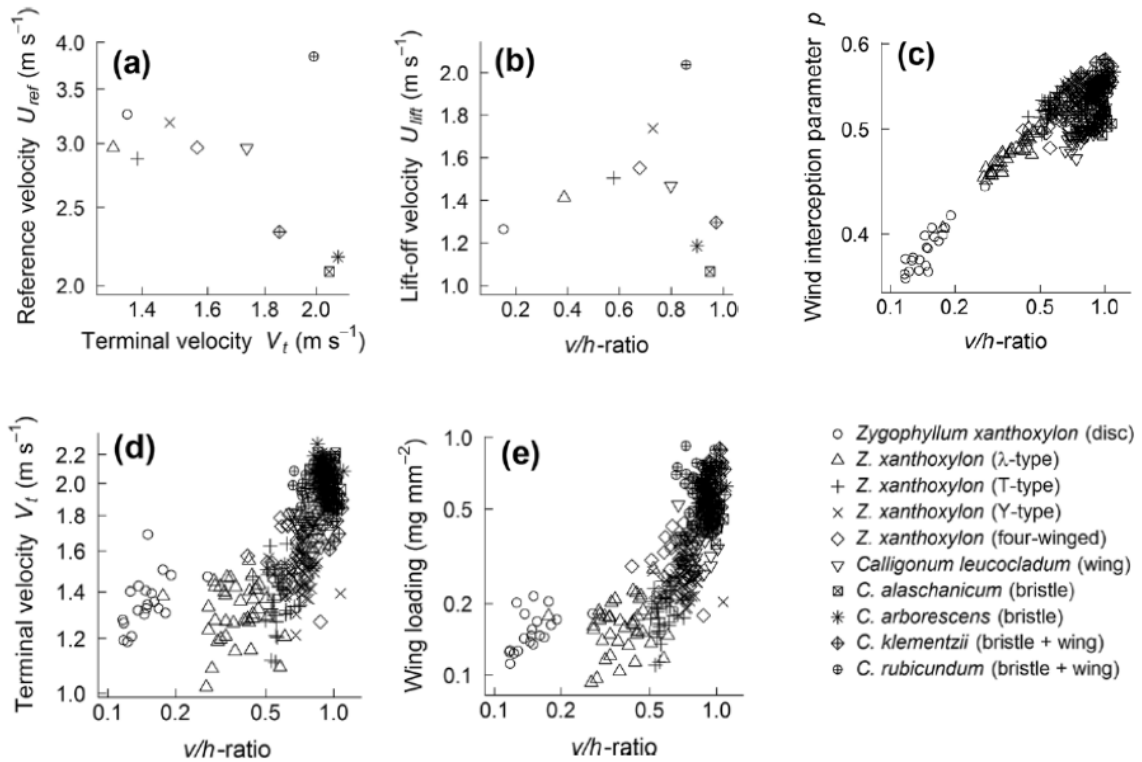


Figura 1.6. Causas de la relación entre la dispersión primaria y secundaria por el viento en superficies lisas (Zhu et al. 2019)

Además, las semillas que se encuentran sobre superficies ásperas tienen orientaciones diferentes a las semillas sobre superficies lisas, lo que afecta tanto el área de forma en planta como la carga alar. Cuanto más áspera es la superficie, más probable es que las semillas no estén orientadas horizontalmente (Johnson y Fryer 1992).

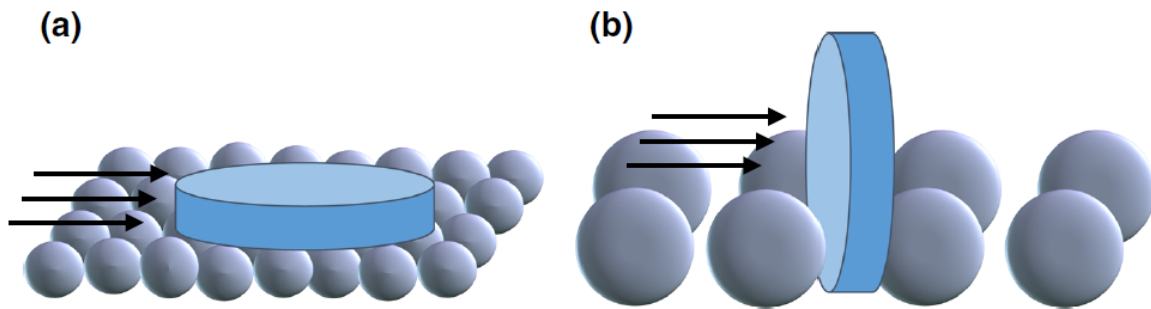


Figura 1.7. Diagrama conceptual de cómo la orientación de las semillas puede cambiar en superficies de tierra con diferentes rugosidades (Zhu et al. 2019)

En una superficie lisa, las semillas probablemente estén orientadas horizontalmente (a). Cuanto más rugosa sea la superficie, más probable es que las semillas no estén orientadas horizontalmente. (b) En el caso extremo de una semilla orientada en un ángulo de 90° con respecto a la superficie del suelo, la extensión 'vertical' de la semilla es irrelevante para la dispersión secundaria.

Asimismo, a medida que aumenta la rugosidad de la superficie del suelo, el ángulo de ataque se vuelve más variado. Se supone que a medida que la superficie se vuelve más áspera, es más probable que el extremo pesado de la samara (cargado por la semilla) termine en una grieta con el ala apuntando hacia arriba (Figura 1.8). Esto constituirá un ángulo de ataque negativo y requerirá una mayor velocidad de umbral para compensar.

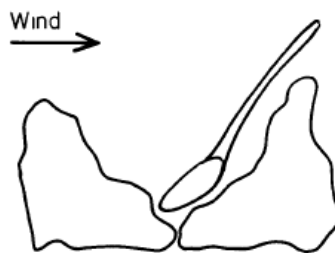


Figura 1.8. Posición típica de una diáspora entre elementos rugosos (Johnson y Fryer 1992)

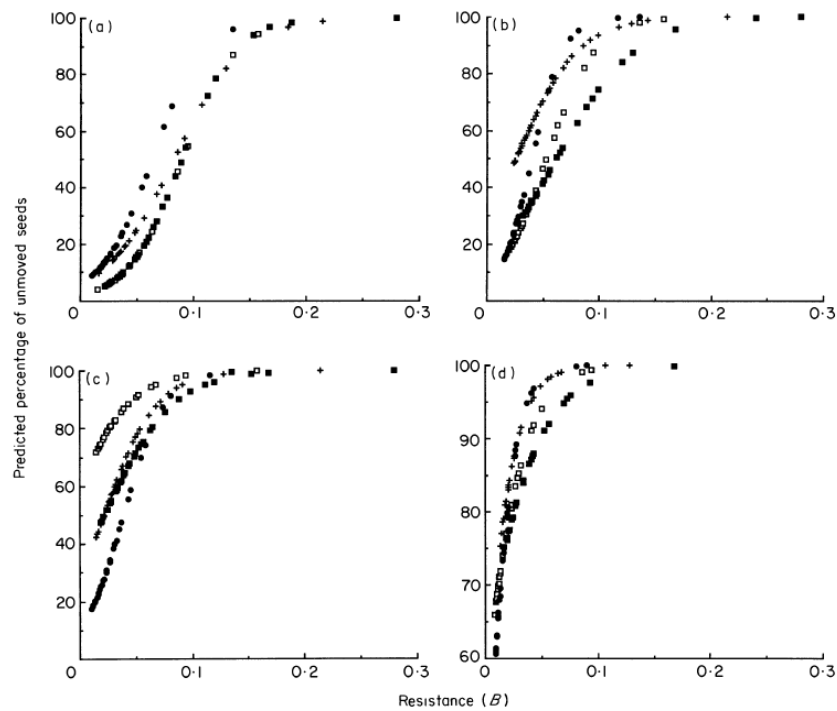


Figura 1.9. Porcentaje previsto de diferentes especies de semillas que permanecen sin moverse en relación con la resistencia al movimiento de semillas en cuatro superficies diferentes en un túnel de viento: (a) madera, (b) arena, (c) suelo y (d) grava. Las superficies utilizadas fueron relativamente suaves en comparación con la variedad de superficies encontradas en un entorno natural. Usando ajuste de mínimos cuadrados (Johnson y Fryer 1992).

En la superficie más lisa, la madera, todas las semillas se movían de manera similar, donde se supuso que la orientación de las semillas era la misma y la variable adimensional, la resistencia, parecía describir el mecanismo del movimiento. Sin embargo, en las superficies más ásperas, la ecuación de resistencia no explica completamente el movimiento de las semillas, las cuatro especies no se movían de manera similar, y en estas superficies la orientación de las semillas fue variable.

Esto sugiere que la orientación de las semillas es un factor que influye en el movimiento de las semillas y que la ecuación de resistencia, al describir el movimiento de las semillas en superficies más rugosas, es incompleta.

Chambers et al. 1994, en su estudio del movimiento del viento de 4 sámaras asimétricas en 4 rugosidades superficiales (un tablero liso, superficies de 250 μm , 50 μm y 2,0 mm) mostraron que las semillas permanecieron en su lugar por más tiempo en superficies más ásperas porque el umbral de la velocidad del viento era mayor y el retorno el tiempo para esa velocidad era más largo, mientras las semillas pesadas se movieron con menos frecuencia que las livianas.

En superficies de menor rugosidad, las semillas más pequeñas tienden a permanecer atrapadas en su posición, mientras que las semillas que son más largas o tienen mayor excentricidad se mueven horizontalmente sobre el suelo y no quedan atrapadas. En suelos de mayor rugosidad, las semillas grandes y pequeñas quedan atrapadas, pero las semillas más pequeñas alcanzan mayores profundidades.

Las depresiones en el suelo o las obstrucciones sirven como sitios de acumulación para las semillas que se mueven sobre la superficie del suelo generando remolinos o sombras de viento y atrapando las semillas movidas por los flujos terrestres. El efecto más importante de la rugosidad es el cambio del perfil de velocidad media cerca de la pared, con su consiguiente modificación del coeficiente de fricción.

Según Steven Vogel, 1994, dependiendo de la geometría de las ranuras se establecerían 3 configuraciones diferentes de vorticidad:

- a) Flujo independiente: Si los bultos individuales están bien espaciados, sus alturas son mucho menores que las distancias entre ellos, entonces cada uno actúa independientemente. Se crean vórtices de recirculación estables que aíslan el flujo exterior de la rugosidad (Figura 1.10.a)
- b) Flujo interactivo: las paredes con ranuras más anchas, con un espacio ligeramente mayor que su altura, se crean burbujas de recirculación que se vuelven a unir antes de la siguiente ranura, exponiéndola al flujo exterior (Figura 1.10.b)

- c) Skimming flow: flujo reptante. Cuando se cubre más de una doceava parte de la superficie, los remolinos no penetran bien y se obtiene lo que se denomina “skimming flow” con vórtices estables en los intersticios (Jumars y Nowell 1984) (Figura 1.10.c)

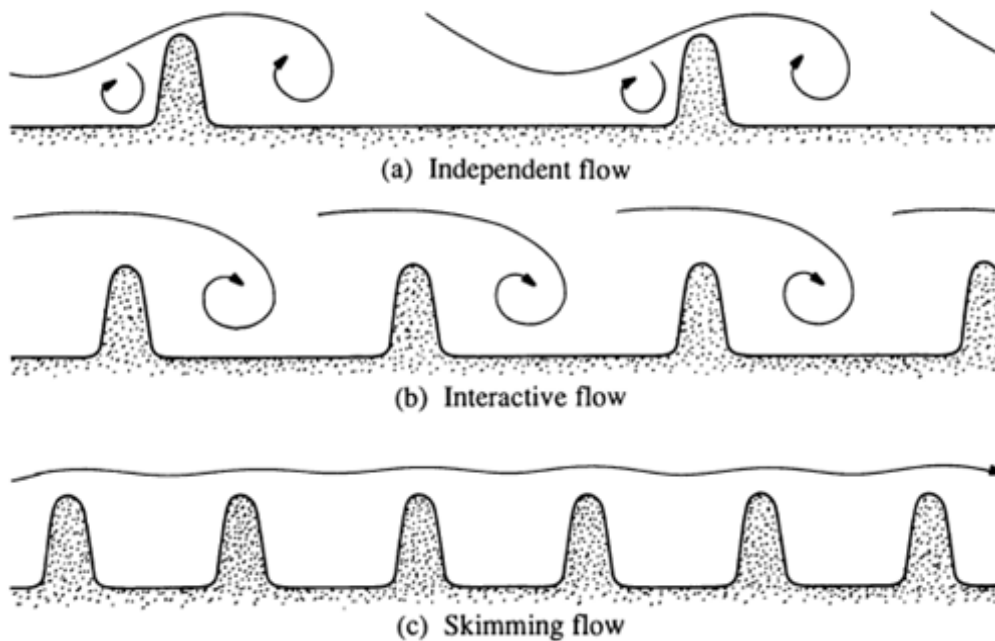


Figura 1.10. Diferentes geometrías de paredes ranuradas (Vogel, S.1994)

Todo esto presupone números de Reynolds lo suficientemente altos como para que los vórtices ocurran fácilmente. Con números de Reynolds bajos, habrá pequeñas protuberancias dentro del fluido que se mueve lentamente cerca de la superficie y, por lo tanto, la rugosidad tendrá poca importancia.

Hoy en día, la atención de los trabajadores aumenta en realidades prácticas de canopias en colinas, detrás de cortavientos, cerca de claros o bordes del bosque, o donde la vegetación es dispersa e irregular. En la naturaleza en numerosas ocasiones el flujo turbulento es la regla y no la excepción (Raupach & Thom 1981; Finnigan, J. 2000). Así como la dispersión del viento secundario generalmente se dirige hacia obstáculos cerca de la superficie del suelo, como matas de hierba, piedras, depresiones superficiales (Schurr et al. 2005)

La intensidad de la turbulencia, TI, normalmente se calcula como en la ecuación 1.5. expresada como un porcentaje de la velocidad media local, donde V es la velocidad media del viento y u', es la fluctuación de velocidad, es decir, la desviación instantánea de la velocidad media del viento (Glickman 2000).

$$TI = \frac{u'}{V}$$

Ecuación 1.5. Intensidad turbulenta

En el estudio de Skarpaas et al. 2005 expusieron cabezas de flores de dos especies de cardo (*Carduus nutans* y *Carduus acanthoides*) con semillas maduras a una serie de flujos de aire laminares y turbulentos de velocidad creciente en un túnel de viento. Tanto en el tratamiento laminar como en el turbulento, el flujo de aire se inició en cero y se aumentó hasta cinco niveles consecutivos (aproximadamente 2, 3, 6, 9 y 12 m/s para flujo laminar), manteniendo cada uno durante 30 segundos.

La liberación de semillas aumentó con la velocidad del viento tanto para flujos laminares como turbulentos para ambas especies. Sin embargo, se liberaron muchas más semillas, a velocidades del viento significativamente más bajas, durante los flujos turbulentos. La liberación de semillas a velocidades de viento más bajas, puede conducir a distancias de dispersión más cortas que las esperadas en condiciones de campo medias. Aunque, por otro lado, los estudios de modelado detallados del vuelo de semillas han demostrado que la turbulencia también puede aumentar las distancias de dispersión porque los movimientos de remolinos turbulentos estructurados tienden a elevar las semillas a elevaciones más altas con velocidades de viento horizontales más altas (Horn et al. 2001; Nathan et al. 2002; Soons et al. 2004)

La turbulencia pudo haber contribuido a una mayor liberación de semillas de varias maneras. Por un lado, los flujos turbulentos aumentan la probabilidad de extremos de velocidades de viento altas y bajas. En ausencia de movimiento ondulatorio, el arrastre extrae menos energía cinética del aire; el coeficiente de

arrastre es menor para el flujo turbulento que para el flujo laminar (Poggi et al. 2004b), dejando más energía cinética para dispersar las semillas.

Ignorar la variabilidad en las condiciones ambientales durante la fase de liberación de semillas puede resultar en predicciones erróneas de los patrones de dispersión. Es probable que las estimaciones de los umbrales de liberación basados en condiciones de campo medio, es decir, flujos laminares en túneles de viento, sean demasiado altas. Las plantas en poblaciones densas pueden experimentar más turbulencia que las plantas aisladas, que a menudo se utilizan como sistemas modelo para la medición de la dispersión.

1.4 Conceptos previos

1.4.1 Conceptos básicos de aerodinámica

Cuando cualquier cuerpo se mueve a través de un fluido, ocurre una interacción entre el cuerpo y el fluido; este efecto se puede dar en términos de las fuerzas en la interfaz fluido-cuerpo. Estas fuerzas se pueden describir en términos de tensiones: tensiones de corte de la pared τ_w , debido a efectos viscosos y tensiones normales debido a la presión, p . Las distribuciones típicas de esfuerzo cortante y presión se muestran en las Figs. 1.11. (a) y 1.11. (b).

Sin embargo, muchas veces solo se necesitan los efectos integrados o resultantes de estas distribuciones que son difíciles de obtener. La fuerza resultante en la dirección de la velocidad se denomina arrastre, D , y la fuerza resultante normal a la velocidad se denomina sustentación, L , como se indica en la figura 1.11. (c). Para algunos cuerpos tridimensionales también puede haber una fuerza lateral que sea perpendicular al plano que contiene D y L .

Las componentes x e y netas de la fuerza sobre el objeto son:

$$\mathcal{D} = \int dF_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau_w \sin \theta dA$$

Ecuación 1.6. Ecuación forma integral para el arrastre (Munson et al. 2006)

$$\mathcal{L} = \int dF_y = - \int p \sin \theta dA + \int \tau_w \cos \theta dA$$

Ecuación 1.7. Ecuación forma integral para la sustentación (Munson et al. 2006)

Aunque las ecuaciones. 1.6 y 1.7 son válidas para cualquier cuerpo, la dificultad de su uso radica en obtener las distribuciones adecuadas de esfuerzos cortantes y presiones en la superficie del cuerpo.

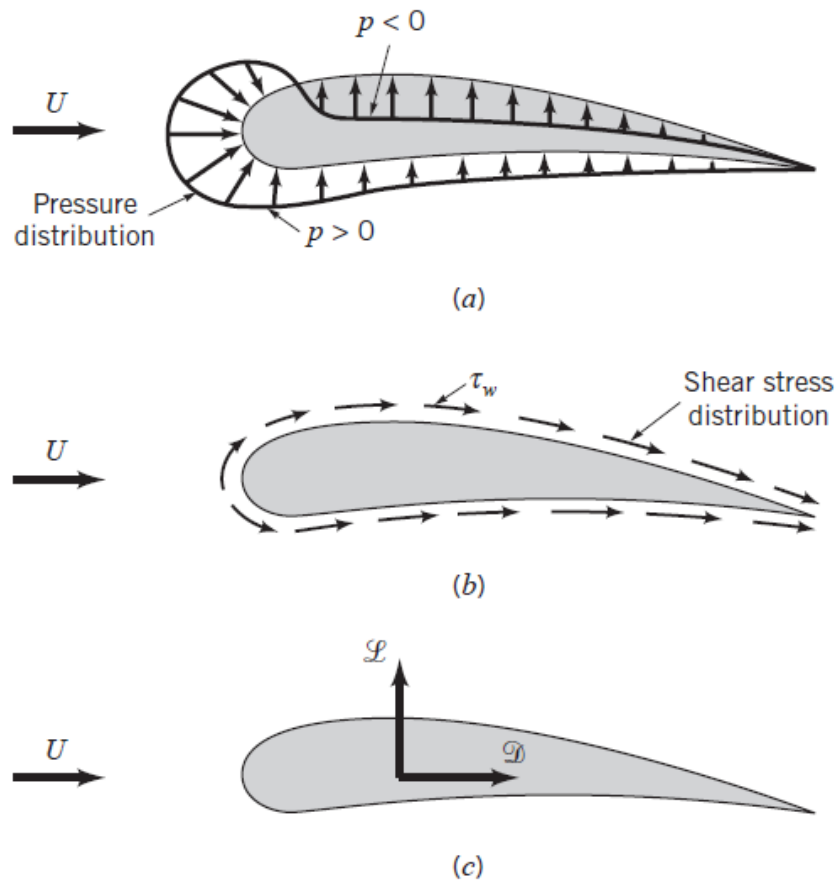


Figura 1.11. Fuerzas del fluido circundante sobre un objeto bidimensional: (a) fuerza de presión, (b) fuerza viscosa, (c) fuerza resultante (levantamiento y arrastre) (Munson et al. 2006).

La alternativa ampliamente utilizada es definir coeficientes de sustentación y arrastre adimensionales y determinar sus valores aproximados por medio de un análisis simplificado, alguna técnica numérica o un experimento apropiado. El coeficiente de sustentación, C_L , y el coeficiente de arrastre, C_D , se definen en la

ecuación 1.8. donde, ρ , es la densidad del aire, U , la velocidad de la semilla y A , es un área característica del objeto. Por lo general, A , se toma como el área frontal: el área proyectada vista por una persona que mira hacia el objeto desde una dirección paralela a la velocidad, U , como se indica en la figura 1.12. Se usa para cuerpos romos principalmente.

$$C_L = \frac{\mathcal{L}}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}, \quad C_D = \frac{\mathcal{D}}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$$

Ecuación 1.8. Coeficientes de sustentación y arrastre (Munson et al. 2006).

En otras situaciones, A , se toma como el área de la forma en planta que es la superficie del ala desde arriba. Esta área es independiente de la orientación con respecto al flujo, esto es importante si, por ejemplo, se dibuja un gráfico del coeficiente de arrastre respecto los valores del ángulo entre el ala y el viento; sería muy incómodo tener la definición de una variable cambiando en respuesta a las alteraciones en la otra.

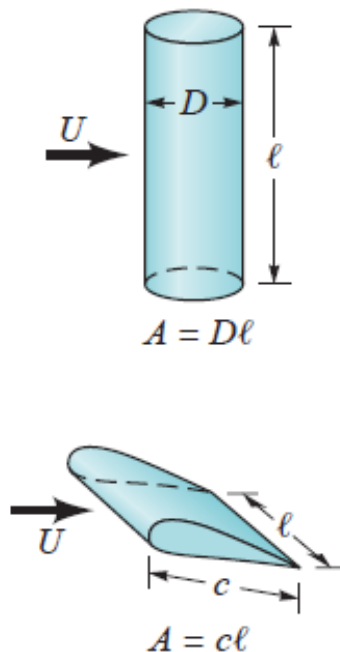


Figura 1.12. Figura superior ejemplo de área frontal. Figura inferior ejemplo de área en planta.

Se puede considerar que la sustentación y el arrastre actúan a través de un punto fijo del cuerpo a estudiar y pueden generar un momento alrededor de este punto. El momento tiende a cambiar el ángulo entre el eje de referencia del cuerpo de estudio y el viento relativo. Denominándose este momento “pitching moment” o momento de cabeceo, y el ángulo, ángulo de ataque. Los momentos de sustentación, arrastre y cabeceo se reducen a su forma de coeficiente al dividirlos por la presión dinámica y las áreas y longitudes de referencia apropiadas (Figura 1.13)

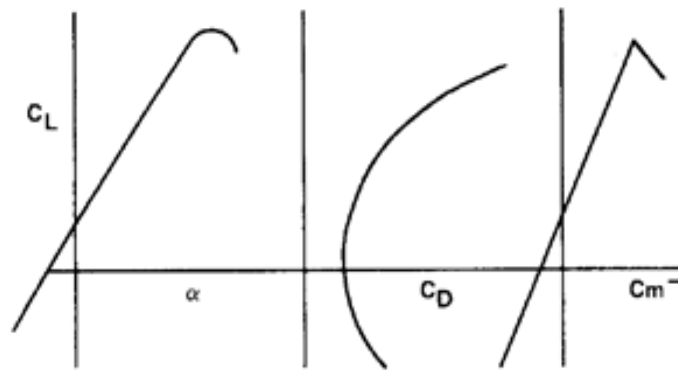


Figura 1.13. Coeficientes aerodinámicos adimensionales típicos representados respecto al ángulo de ataque (Schetz y Fuhs 1996)

A medida que el ángulo de ataque aumenta desde valores pequeños, el coeficiente de sustentación aumenta casi linealmente con α . En ángulos más grandes, hay una disminución repentina en la sustentación y gran aumento en la resistencia. Esta condición indica que el ala se ha estancado.

Para un objeto de forma dada, las características del flujo dependen en gran medida de varios parámetros como el tamaño, la orientación, la velocidad y las propiedades del fluido (Vogel, S. 1994)

El cambio de forma entre especies se estudia examinando:

- La carga alar, m/A_w , es la relación entre el peso de un objeto, m , y el área característica de la(s) ala(s), A_w . Cuanto más ligera sea la carga alar, más lento podrá despegar, volar y aterrizar el cuerpo de estudio.

- La relación de esbeltez, L/H , mide la relación entre la longitud de la semilla y la altura, y determina si el perfil es aerodinámico o no. A menor relación mayor esbeltez tendrá la semilla.
- La relación de aspecto, w^2/A , es una relación entre el cuadrado del ancho de la samara y el área de la forma en planta. Identifica la esbeltez del perfil aerodinámico.

La orientación, en la práctica, depende principalmente del ángulo de ataque, formado por el extremo de salida (la cuerda) y la dirección del viento que se aproxima. En nuestro caso, el ángulo de ataque es el ángulo entre la longitud de la semilla y la dirección del viento.

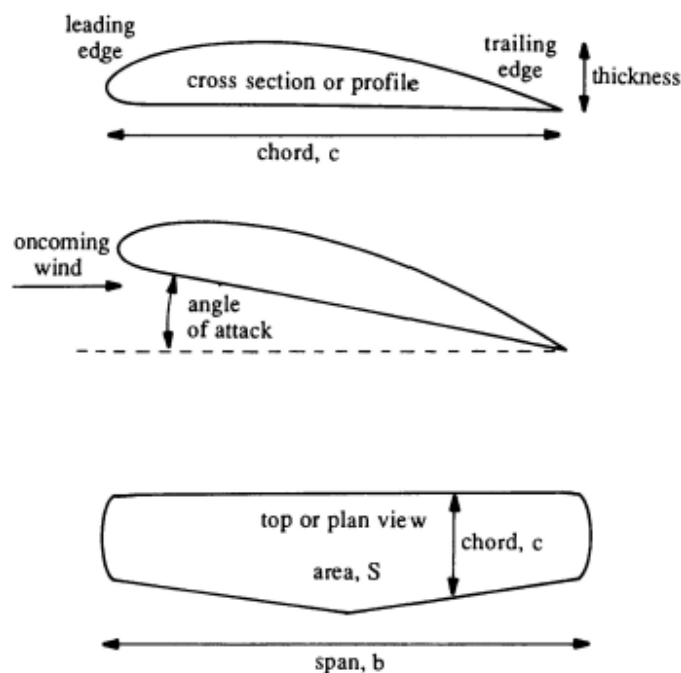


Figura 1.14. Terminología perfiles aerodinámicos (Vogel, S.1994)

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que caracteriza la importancia relativa de las fuerzas de inercia frente a las viscosas en un fluido. Donde c , es la longitud característica del objeto (para las semillas aladas se toma el ala (Dommasch, Sherby & Conolly 1961) para esferoides $D = 2a$ del eje menor del esferoide), u la velocidad del fluido y ν la viscosidad cinemática del fluido.

$$Re = \frac{cu}{\nu}$$

Ecuación 1.9. Número de Reynolds

Un perfil aerodinámico es un dispositivo que puede producir circulación en su vecindad sin que realmente gire (F.W Lanchester). La circulación (Γ) es el producto de la velocidad circunferencial y tangencial; por tanto, para cualquier línea de corriente rodeando al núcleo de un vórtice irrotacional:

$$\Gamma = 2\pi r U_t \quad \Gamma \equiv \int_L \vec{v} \cdot d\vec{l}$$

Ecuación 1.10. Ecuaciones circulación. A la derecha definición integral de la circulación a lo largo de una línea L.

Este producto proporciona una medida de la intensidad del torbellino. La resistencia del fluido al corte entre lo que está adentro e inicialmente estacionario y lo que está afuera y en movimiento hará que el fluido interior gire en un vórtice que corre a lo largo del surco (Figura 1.15).

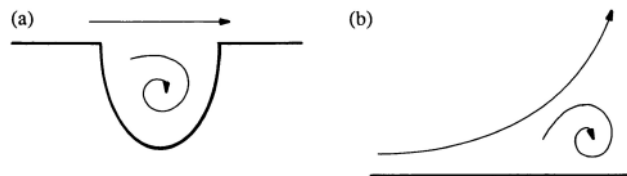


Figura 1.15. Ejemplos de lugares donde se generan vórtices (Vogel, S. 1994) (a) flujo a través de un surco (b) flujo haciendo un giro aguas arriba desde una esquina cerrada.

A diferencia de un cuerpo aerodinámico con perfil aerodinámico diseñado para generar una fuerza de sustentación mayor que la fuerza de arrastre, donde el ancho del cuerpo disminuye gradualmente hacia el borde de fuga, un cuerpo como tiene una reducción más dramática del ancho del cuerpo en las porciones posteriores y un gran gradiente de presión, lo que lleva a que la capa límite se

separe de los lados del cuerpo en algún punto, típicamente desde un punto cercano al ancho máximo del cuerpo.

En el caso de un borde de salida romo (Figura 1.16. (b)), se forman una serie de torbellinos de signo opuesto, de forma que la circulación es prácticamente nula. La sustentación, por tanto, es nula, o casi nula, en un cuerpo romo. Una de las principales ventajas del perfil aerodinámico sobre el romo, es que la fuerza de resistencia es mucho menor en el perfil, al ajustarse el flujo real bastante bien al ideal, siendo esta fuerza principalmente debida a la fricción viscosa, cuyo efecto es mucho menor que el de la presión cuando la corriente se separa en un cuerpo romo.

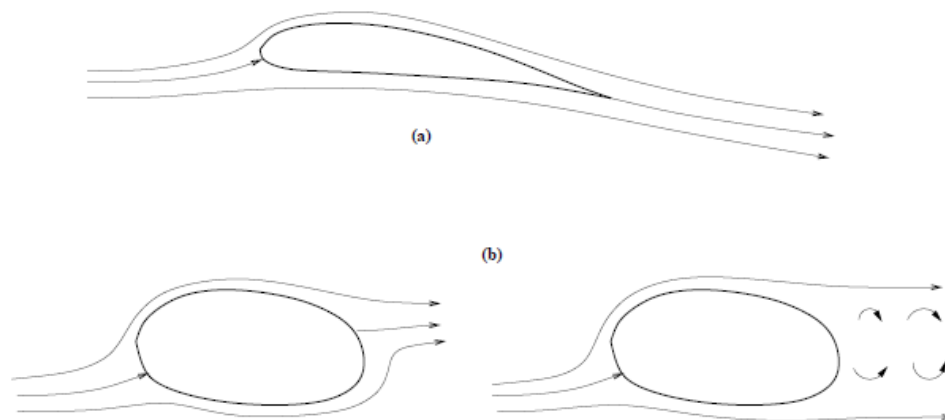


Figura 1.16. (a) Flujo potencial con circulación alrededor de un perfil (b) Flujo potencial y flujo tras la separación de la corriente alrededor de un cuerpo romo (Fernández Fera, R. 2001).

Para cuerpos aerodinámicos, el coeficiente de arrastre aumenta cuando la capa límite se vuelve turbulenta porque la mayor parte del arrastre se debe a la fuerza de corte, que es mayor para el flujo turbulento que para el flujo laminar. Por otro lado, el coeficiente de arrastre de un objeto relativamente romo, como un cilindro o una esfera, en realidad disminuye cuando la capa límite se vuelve turbulenta. Ver figura 1.17.

La estructura del campo de flujo de los números de Reynolds seleccionados indicados en la figura 1.17 se muestra en la figura 1.18. Para un objeto dado existe una amplia variedad de situaciones de flujo, dependiendo del número de Reynolds involucrado.

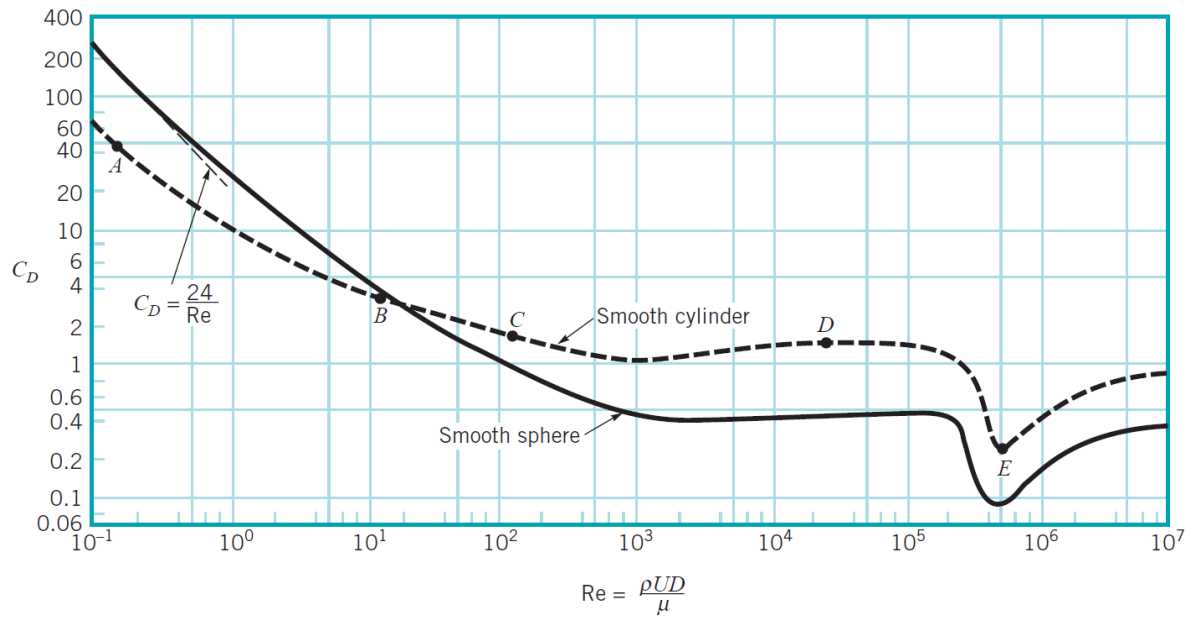


Figura 1.17. Coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds para un cilindro circular liso y una esfera lisa (Munson et al. 2006).

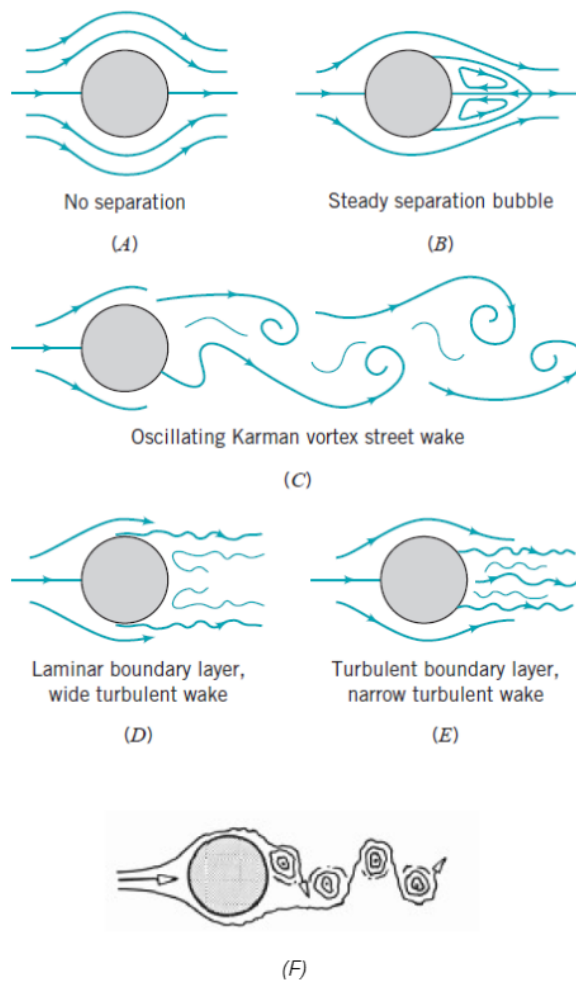


Figura 1.18. Desprendimiento de flujo tras un cilindro circular. **(A)** $Re < 5$: sin separación de capa límite (creeping flow) **(B)** $5-15 < Re < 40$: Vórtices estables **(C)** $40 < Re < 150$: Vórtices von Karman **(D)** $150 < Re < 3 \cdot 10^5$: capa límite laminar y separación **(E)** $3 \cdot 10^5 < Re < 3 \cdot 10^6$: capa límite laminar turbulenta **(F)** $Re > 3 \cdot 10^6$: Estela turbulenta (Munson et al. 2006).

Los coeficientes de arrastre para una serie de cuerpos bidimensionales de geometría variable se dan como una función del número de Reynolds en la figura 1.19.

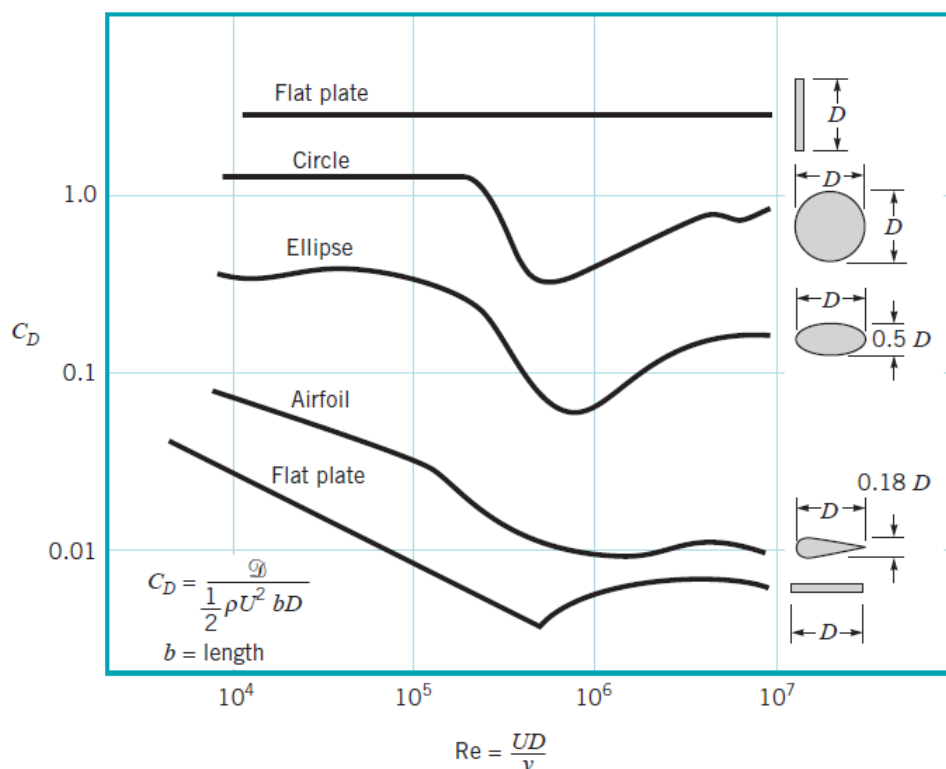


Figura 1.19. Carácter del coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds para objetos con varios grados de aerodinámica, desde una placa plana perpendicular al flujo aguas arriba hasta una placa plana paralela al flujo (flujo bidimensional).

El mundo de los organismos cuyas alturas sobre el sustrato son menores o del mismo orden de magnitud que el espesor de la capa límite, está definido no por alguna velocidad sino por la ubicuidad de un gradiente espacial de velocidad. Prandtl estableció que cerca de las paredes sólidas los efectos viscosos son siempre

importantes por muy pequeña que sea la viscosidad del fluido y son los responsables de que se cumpla la condición de no deslizamiento del fluido sobre la superficie sólida.

Así los flujos de fluidos con viscosidad pequeña (flujos a número de Reynolds grande) constan de dos regiones diferenciadas: una externa donde el fluido se puede considerar como ideal, y una capa límite delgada, alrededor de las superficies sólidas, donde los efectos viscosos son importantes, no porque la viscosidad sea mayor allí, sino porque el gradiente de velocidad normal a la superficie es muy acusado al ser una capa muy delgada.

El espesor de la capa límite (cuyo orden de magnitud se designa habitualmente por δ) es proporcional a la raíz cuadrada de la viscosidad y por tanto tiende a cero cuando $\mu \rightarrow 0$.

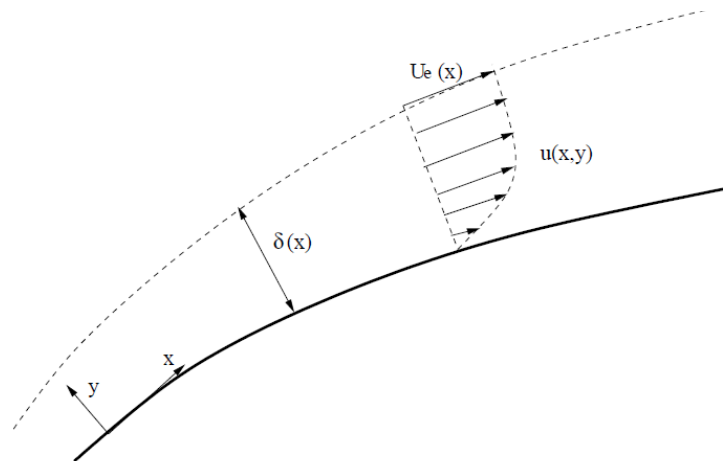


Figura 1.20. Capa límite bidimensional sobre una superficie (Fernández Fera, R. 2001).

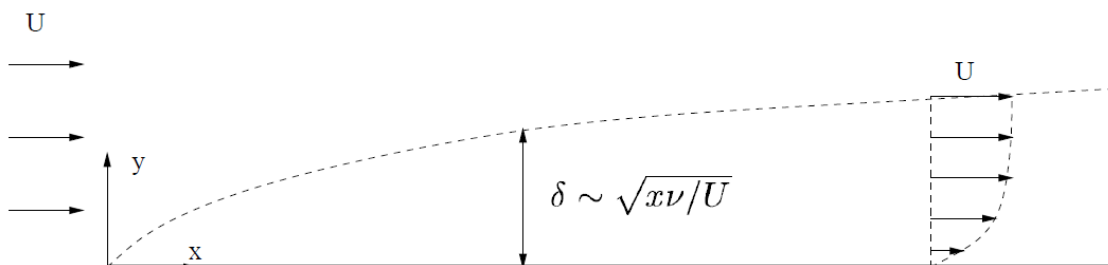


Figura 1.21. Capa límite sobre una placa plana con ángulo de incidencia nulo (Fernández Fera, R. 2001).

En ausencia de vegetación, la velocidad del viento horizontal, $U(z)$, a una altura z sobre el suelo, normalmente sigue un perfil logarítmico (Figura 1.22.a). Mientras que en una canopia (dosel), el viento existe en forma de una capa límite interna, denominada aquí capa de dosel (Figura 1.22.b).

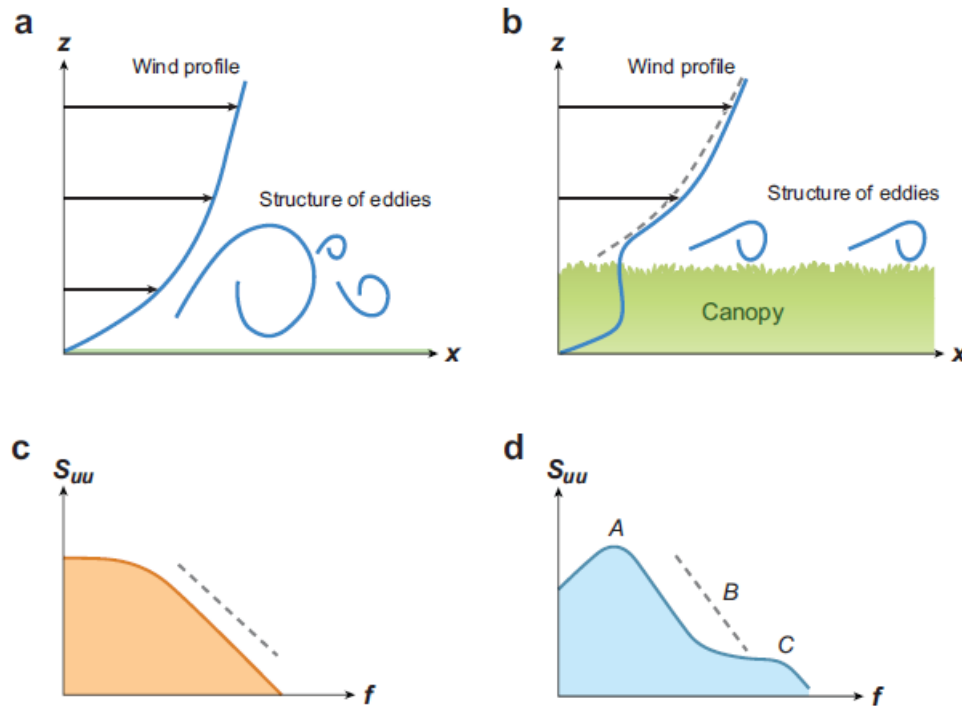


Figura 1.22. Flujo de la capa límite (a,c) y flujo de la capa dosel (b,d). Gráficas superiores: Perfil de viento y estructura de remolinos. Gráficas inferiores: Espectro de fluctuaciones de la velocidad horizontal, S_{uu} (de Langre, E. 2008).

En la ecuación 1.11. se observa el perfil logarítmico de la velocidad horizontal del viento, U , donde z_0 es la longitud de rugosidad aerodinámica, U^* es la velocidad de fricción y K la constante de von Karman (Monteith & Unsworth 1990).

$$|\vec{U}(z)| = \begin{cases} \frac{U_*}{K} \ln \frac{z}{z_0} & z > z_0 \\ 0 & z \leq z_0 \end{cases}$$

Ecuación 1.11. Perfil logarítmico velocidad horizontal del viento (U) (Schurr et Al. 2005).

1.4.2 Túneles de viento

Los túneles de viento generan flujos de aire uniformes, con baja turbulencia e intensidad. Se utilizan en muchas industrias, incluidas la aeroespacial, la automotriz y la defensa. También juegan un papel clave en la gestión térmica electrónica. Se fabrican en diferentes formas y tamaños, desde solo 30 cm de largo hasta lo suficientemente grandes como para contener un avión de pasajeros. Pero la idea básica detrás de todos los túneles de viento es universal (Basic Principles of Wind Tunnel Design, 2009).

En un túnel de viento, el objeto o modelo permanece en reposo mientras se propulsa aire o gas alrededor de él.

Muchos casos ocurren donde las técnicas teóricas y/o computacionales son inadecuadas, ya sea por la complejidad del problema o por la falta de recursos computacionales adecuados. Las pruebas en túnel de viento a menudo sirven como el enfoque más rentable por estas razones, así como por los gastos involucrados en muchas formas de pruebas a gran escala.

El parámetro adimensional clave de interés en las pruebas de túnel de viento de baja velocidad suele ser el número de Reynolds. Una instalación aerodinámica de un túnel de viento debe proporcionar un rango Re razonable, uniformidad de flujo e intensidades de turbulencia bajas (Cattafesta et al. 2010).

Sistema de accionamiento

Una característica definitoria es el sistema de accionamiento del túnel, que determina cómo se mueve el fluido de trabajo a través de la sección de prueba. El aire es aspirado a través de un conducto equipado con rejillas estabilizadoras que garantiza que el flujo al comienzo del túnel se comporte de manera laminar.

Para un túnel de aire, los sistemas de accionamiento principales son un compresor y un ventilador. En el primero, el aire a presión se suministra desde un compresor a través de una válvula controlada o regulador al túnel. En este último, los ventiladores axiales o centrífugos empujan o tiran aire a través de la sección de prueba (Cattafesta et al. 2010).

Tipos de circuitos

Los túneles de viento se pueden diseñar con dos tipos principales de circuitos de conductos: abiertos o cerrados (Figura 1.23). Una instalación de circuito abierto toma aire del ambiente en un extremo del circuito del túnel, lo pasa a través del túnel y lo expulsa al ambiente. Los túneles de circuito cerrado retienen una masa fija de aire, sin tener en cuenta las fugas, y hacen circular el flujo en un bucle a través de los diversos componentes del túnel de viento.

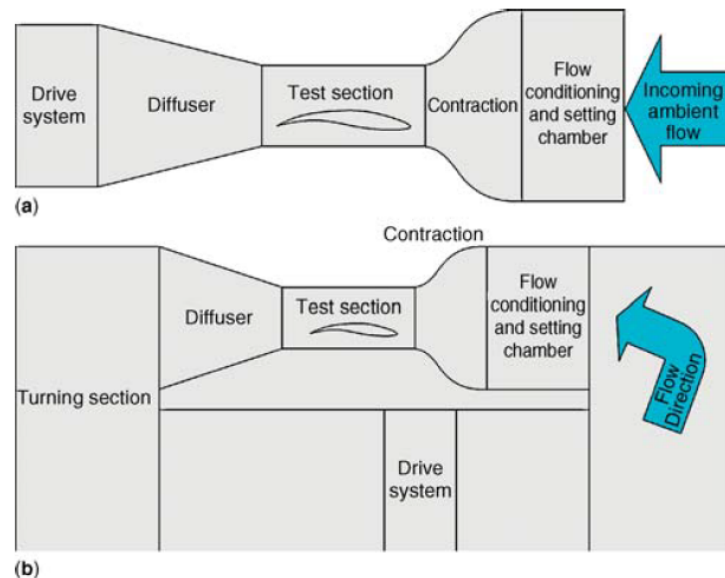


Figura 1.23. Esquema de túnel de viento (a) circuito abierto y (b) circuito cerrado (Cattafesta et al. 2010).

Es de gran importancia aprovechar al máximo la energía disponible en el aire, por eso se colocan toberas y difusores a la entrada y salida de la cámara de ensayo. De esta forma podemos transformar la energía disponible en forma de presión, en

un aumento de velocidad y posteriormente realizar la operación inversa en el difusor. Así, conseguimos una mayor velocidad en la zona de ensayos.

Diseño de un túnel de viento

Un buen túnel de viento debería permitir mediciones precisas de datos estacionarios o inestables, según la aplicación deseada. La intensidad de la turbulencia en la sección de prueba debe ser lo suficientemente baja para facilitar el estudio de los fenómenos físicos de interés. Por ejemplo, los experimentos de transición de la capa límite a menudo requieren niveles de turbulencia extremadamente bajos. Los experimentos aeroacústicos de ruido de borde de salida requieren niveles bajos de turbulencia para minimizar los efectos causados por la incidencia de la turbulencia de corriente libre en el borde de ataque de un modelo. El flujo de la sección de prueba debe ser uniforme y sin inestabilidades no deseadas, mientras que los efectos secundarios del flujo deben minimizarse en la contracción.

Acondicionadores del flujo

En la mayoría de los túneles, la sección de acondicionamiento de flujo contiene un panel (Figura 1.24), pantallas y un conducto de sedimentación. El panel alinea el flujo con el eje del túnel y rompe la inestabilidad del flujo a gran escala. Las pantallas proyectan en cascada fluctuaciones turbulentas a gran escala en escalas más pequeñas. Estos se descomponen en el conducto de sedimentación, que debe ser lo suficientemente largo para permitir un decaimiento suficiente y minimizar el crecimiento de la capa límite.

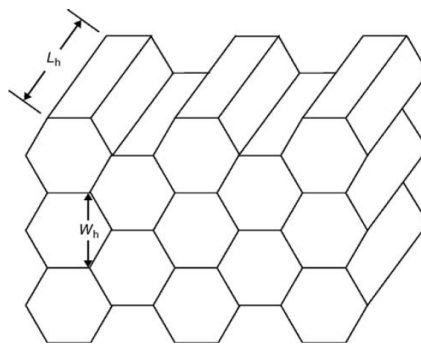


Figura 1.24. Esquema de una sección de panel de abeja hexagonal (Cattafesta et al. 2010).

El panal de abeja elimina el remolino del flujo entrante y minimiza las variaciones laterales tanto en la velocidad media como en la fluctuante (Mehta y Bradshaw, 1979). El ángulo de rumbo para el flujo entrante debe ser inferior a 10° para evitar el estancamiento de las celdas de nido de abeja. El panal viene en diferentes formas, como secciones transversales circulares, cuadradas y hexagonales. Entre estos, el hexagonal suele ser la forma de sección transversal de elección, ya que tiene el coeficiente de caída de presión más bajo (Barlow, Rae y Pope, 1999). Se ha demostrado que las celdas de nido de abeja tienen el mejor rendimiento con una relación longitud-diámetro de entre 7 y 10.

1.5 Descripción del problema y análisis dimensional

El problema objeto de estudio en este trabajo está esquematizado en la Figura 1.25, las variables relevantes son:

- Propiedades físicas del aire
 - Densidad (ρ)
 - Viscosidad dinámica (μ)
- Propiedades físicas de la semilla: masa de la semilla (m)
- Propiedades geométricas
 - Longitudes características de la semilla
 - Diámetro mayor (D)
 - Diámetro menor (d)
 - Altura (h)
 - Rugosidad superficie
 - Altura rugosidad (ϵ)
 - Ancho rugosidad (L)
 - Ángulo de ataque (β)
- Movimiento: velocidad viento (v)
- gravedad (g)

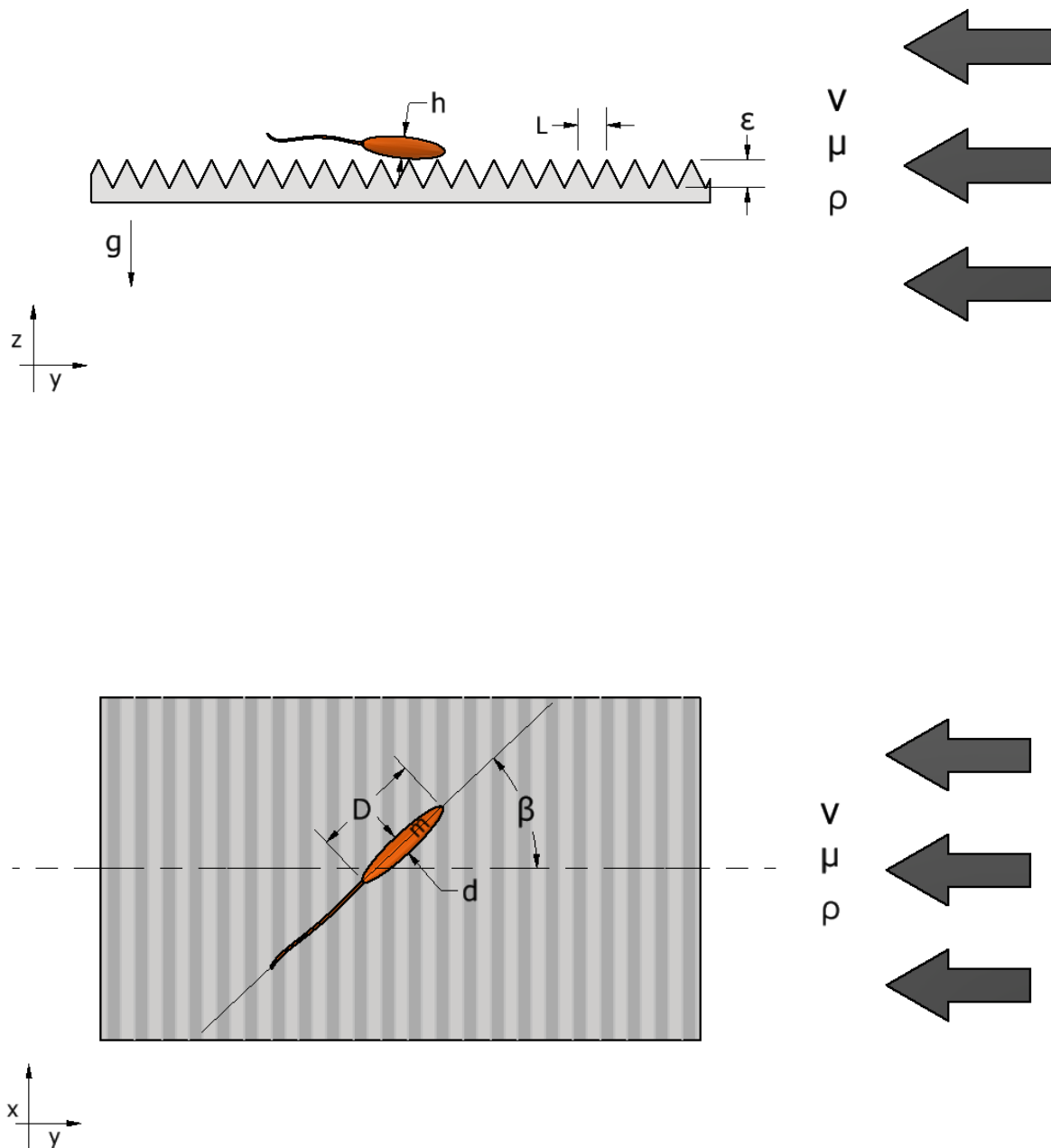


Figura 1.25. Boceto ilustrativo de las variables del problema. Figura superior vista del plano yz, figura inferior vista del plano xy.

El análisis dimensional es el procedimiento básico para producir variables adimensionales. La concordancia entre los resultados del análisis dimensional y los de la mecánica general de fluidos brinda confianza en la capacidad del análisis dimensional para generar resultados valiosos en problemas nuevos y complejos.

Después de establecer una lista de variables, se deben emplear ecuaciones físicas conocidas y suposiciones adicionales que reduzcan el número de variables.

El análisis dimensional emplea el hecho de que un evento físico es independiente de las unidades de escala utilizadas para medir las variables. Es un hecho de experiencia que 3 dimensiones son suficientes para medir cualquier cantidad física, estas se denominan dimensiones primarias, y en mecánica, masa M, longitud L y tiempo T son las dimensiones fundamentales. La elección de 4 dimensiones primarias es redundante (Tropea et al. 2007)

El teorema de Π nos dice cuántas variables adimensionales se necesitan para un problema dado con variables dimensionales.

Si el problema físico es descrito por una función de n variables dimensionales, $x_n = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1})$ y el rango de la matriz dimensional es r , entonces la función puede reorganizarse en variables adimensionales que serán $n-r$ en total, $\Pi_{n-r} = f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r-1})$.

Creamos una matriz de dimensiones de las variables que describen nuestro problema, cuyas columnas están formadas por los exponentes de la ecuación de dimensiones de cada una de las variables.

Elegimos un subconjunto de 3 variables dimensionalmente independientes:

- (a) Una propiedad que caracterice al fluido: ρ
- (b) Una magnitud que caracterice el flujo: v
- (c) Un parámetro que caracterice la geometría: D

	ρ	μ	m	D	d	h	ε	L	β	v	g
M	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
L	-3	-1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
T	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2
	(a)			(c)						(b)	

Tabla 1.1. Matriz dimensional de las variables que describen el problema.

Una vez definido el problema, procedemos a calcular los números adimensionales.

1. Número adimensional viscosidad dinámica:

$$\Pi_{\mu} = [\mu] \cdot [\rho]^a \cdot [v]^b \cdot [D]^c$$

$$M: 0 = 1+a \rightarrow a = -1$$

$$L: 0 = -1-3a+b+c \rightarrow c = -1$$

$$T: 0 = -1-b \rightarrow b = -1$$

$$\Pi_{\mu} = \frac{\mu}{\rho v D} \rightarrow Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Ecuación 1.12. Número adimensional de la viscosidad: número de Reynolds.

El primer número adimensional obtenido es el número de Reynolds, que representa las fuerzas de inercia respecto las viscosas. Generalmente es importante en todo tipo de problemas fluidodinámicos.

2. Número adimensional masa:

$$\Pi_m = [m] \cdot [\rho]^a \cdot [v]^b \cdot [D]^c$$

$$M: 0 = 1+a \rightarrow a = -1$$

$$L: 0 = -3a+b+c \rightarrow c = -3$$

$$T: 0 = -b \rightarrow b = 0$$

$$\Pi_m = \frac{m}{\rho D^3} = \frac{\rho_s v}{\rho_{aire} v} = \frac{\rho_s}{\rho_{aire}} = M$$

Ecuación 1.13. Número adimensional de la masa: relación másica.

Dependiendo de la morfología de la semilla el volumen variará. Basándonos en el artículo de Li y co., (2006) para *Arabidopsis thaliana* la forma de las semillas se

considera como un elipsoide, pudiendo así determinar un valor de volumen. Otra aproximación aplicada es suponer que el eje menor (d) es igual a la altura máxima (h), por ello, en nuestro caso $b = c$. De esta forma calculamos el eje mayor (D) y el eje menor (d,h) con la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen} = \frac{4}{3} \times \pi \times a \times b \times c$$

La relación de masa es del orden de 10^3 para todos los casos de interacciones viento-planta, ya que la densidad del material vegetal suele ser 10^3 veces mayor que la del aire.

3. Número adimensional diámetro menor:

$$\Pi_d = [d] \cdot [\rho]^a \cdot [v]^b \cdot [D]^c$$

$$M: 0 = a \rightarrow a = 0$$

$$L: 0 = 1 - 3a + b + c \rightarrow c = -1$$

$$T: 0 = -b \rightarrow b = 0$$

$$\Pi_d = \frac{d}{D}$$

Ecuación 1.14. Número adimensional del diámetro menor: relación de aspecto.

Obtenemos una relación de aspecto o relación de diámetros. Mientras más cercana a uno, más redonda es la semilla.

4. Número adimensional altura:

$$\Pi_h = [h] \cdot [\rho]^a \cdot [v]^b \cdot [D]^c$$

$$M: 0 = a \rightarrow a = 0$$

$$L: 0 = 1 - 3a + b + c \rightarrow c = -1$$

$$T: 0 = -b \rightarrow b = 0$$

$$\Pi_h = \frac{h}{D}$$

Ecuación 1.15. Número adimensional de la altura de la semilla: relación de esbeltez.

5. Número adimensional altura de la rugosidad:

$$\Pi_\varepsilon = [\varepsilon] \cdot [\rho]^a \cdot [v]^b \cdot [D]^c$$

$$M: 0 = a \rightarrow a = 0$$

$$L: 0 = 1 - 3a + b + c \rightarrow c = -1$$

$$T: 0 = -b \rightarrow b = 0$$

$$\Pi_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{D}$$

Ecuación 1.16. Número adimensional de la altura de la rugosidad: rugosidad relativa.

6. Número adimensional ancho de la rugosidad:

$$\Pi_L = [L] \cdot [\rho]^a \cdot [v]^b \cdot [D]^c$$

$$M: 0 = a \rightarrow a = 0$$

$$L: 0 = 1 - 3a + b + c \rightarrow c = -1$$

$$T: 0 = -b \rightarrow b = 0$$

$$\Pi_L = \frac{L}{D}$$

Ecuación 1.17. Número adimensional del ancho de la rugosidad: rugosidad relativa.

7. Número adimensional ángulo de ataque:

$$\Pi_{\beta} = [\beta] \cdot [\rho]^a \cdot [v]^b \cdot [D]^c$$

$$M: 0 = a \rightarrow a = 0$$

$$L: 0 = 0 - 3a + b + c \rightarrow c = 0$$

$$T: 0 = -b \rightarrow b = 0$$

$$\Pi_{\beta} = \beta$$

Ecuación 1.18. Número adimensional del ángulo de ataque.

Se trata del mismo ángulo de ataque, ya que es una variable adimensional.

8. Número adimensional gravedad:

$$\Pi_g = [g] \cdot [\rho]^a \cdot [v]^b \cdot [D]^c$$

$$M: 0 = a \rightarrow a = 0$$

$$L: 0 = 1 - 3a + b + c \rightarrow c = 1$$

$$T: 0 = 2 - b \rightarrow b = -2$$

$$\Pi_g = \frac{g D}{v^2} \rightarrow Fr = \frac{v}{\sqrt{g D}}$$

Ecuación 1.19. Número adimensional de la gravedad: número de Froude.

Se obtiene el número de Froude que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas gravitacionales.

Por tanto, los números adimensionales que controlan el problema son:

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho v D}{\mu}; & \text{M} &= \frac{\rho_s}{\rho_{\text{aire}}}; & \Pi_d &= \frac{d}{D}; & \Pi_h &= \frac{h}{D}; \\ \Pi_\varepsilon &= \frac{\varepsilon}{D}; & \Pi_L &= \frac{L}{D}; & \Pi_\beta &= \beta; & \text{Fr} &= \frac{v}{\sqrt{g D}}; \end{aligned}$$

En la Tabla 1.2. se agrupan los números adimensionales que solo dependen de la geometría de la semilla.

Especie	Morfología	m (mg)	D (mm)	d (mm)	h (mm)	V (mm ³)	ρs (kg/m ³)	ρs / ρa	d/D	h/D
Arabidopsis Thaliana	Elipsoide	0,022	0,51 ± 0,03	0,28 ± 0,04	~0	0,169	130,017	107,979	0,55 ± 0,04	~0
Ononis natrix	Elipsoide (más esférico)	2,1 ± 0,7	1,47 ± 0,02	1,15 ± 0,04	~0	8,176	251,153	208,582	0,78 ± 0,02	~0
Urtica dioica	Elipsoide	0,57 ± 0,08	1,82 ± 0,13	1,21 ± 0,09	0,54 ± 0,05	4,948	115,193	95,667	0,66 ± 0,02	0,30 ± 0,03

Especie	Morfología	m (mg)	Semilla			Estructura de vuelo			V (mm ³)	ρs (kg/m ³)	ρs / ρa	d/D		h / D
			Ds (mm)	ds (mm)	hs (mm)	dEV (mm)	nEV (mm)					semilla	semilla + EV	
Thymus vulgaris	Semilla elipsoidal con estructura de vuelo (5 filamentos cilíndricos)	0,6 ± 0,2	2,0 ± 0,3	0,62 ± 0,10	0,7 ± 0,2	0,110 ± 0,007	3,1 ± 0,4	9,075	68,317	56,737	0,32 ± 0,04	0,75 ± 0,11		0,37 ± 0,08
Brachypodium stacei	Semilla elipsoidal con estructura de vuelo (1 filamento cilíndrico)	4,5 ± 2	7,9 ± 0,4	1,51 ± 0,08	1,22 ± 0,09	0,09 ± 0,03	7 ± 2	62,473	71,391	59,290	0,19 ± 0,02	0,103 ± 0,005		0,155 ± 0,014
Brachypodium distachyon	Semilla elipsoidal con estructura de vuelo (1 filamento cilíndrico)	4 ± 2	7,8 ± 0,5	1,42 ± 0,12	1,23 ± 0,15	0,07 ± 0,04	8 ± 1	58,567	68,541	56,923	0,183 ± 0,006	0,092 ± 0,009		0,158 ± 0,010

Especie	Morfología	m (mg)	Semilla (y tallo)			Estructura de vuelo				V (mm ³)		ρs (kg/m ³)	ρs / ρa	d/D	
			Ds (mm)	ds (mm)	hs (mm)	DEV (mm)	Ddisk (mm)	hfil (mm)	dfil (mm)	n				semilla	semilla + EV
Taraxacum officinale	Semilla elipsoidal con estructura de vuelo (área disco)	0,60 ± 0,10	5,2 ± 0,8	1,30 ± 0,10	13 ± 1	12,316	7,636	7,400	0,016	100	91,171*	7,067	5,869	0,25 ± 0,03	0,044 ± 0,003

* El papus tiene un volumen de menos de 77,5 pm3 (dado que los filamentos individuales son huecos en más del 50%).

Tabla 1.2. Medidas geométricas de las diferentes especies y números adimensionales relacionados con estas.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1. Metodología experimental

Para los ensayos es utilizado un túnel de viento en el que cual se colocan las semillas variando los parámetros fundamentales que intervienen en su proceso de dispersión secundaria:

1. Morfología de las semillas:
 - a. Peso
 - b. Geometría y dimensiones
2. Orientación semilla: Ángulo de ataque
3. Rugosidad

Por cada especie se realizan un mínimo de 10 medidas. Con esta cantidad de ensayos tras analizar los datos obtenidos se pueden obtener patrones de comportamiento de las variables que intervienen en el experimento. Para grabar el fenómeno del despegue, se utiliza la cámara de alta velocidad PHOTRON FASTCAM SA1.1 model 675K-M1, apoyada sobre un trípode de altura ajustable. El sistema cuenta con un rendimiento básico superior con resolución de megapíxeles, sensor de imagen ultrasensible capaz de una grabación clara en poca luz, y un marco de velocidad ultra-alta.

Por un lado, se utilizan diferentes orientaciones en los casos en los que pueda afectar por la geometría de la diáspora, es decir, cuando la semilla posee estructura de vuelo. Las orientaciones utilizadas son: $\beta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ y 180° .

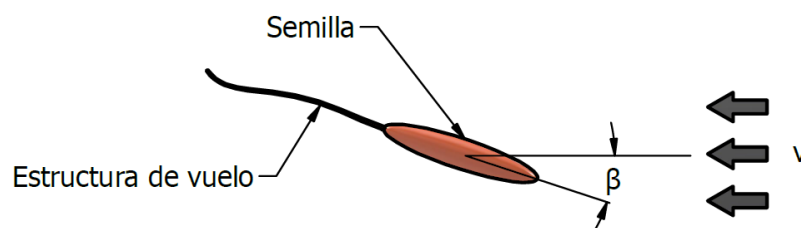


Figura 2.1. Boceto de referencia de la diáspora (semilla y estructura de vuelo), ángulo de ataque y dirección de la velocidad del túnel de viento.



Figura 2.2. Bocetos de la diáspora para ángulos de ataque = 0° y 180° .

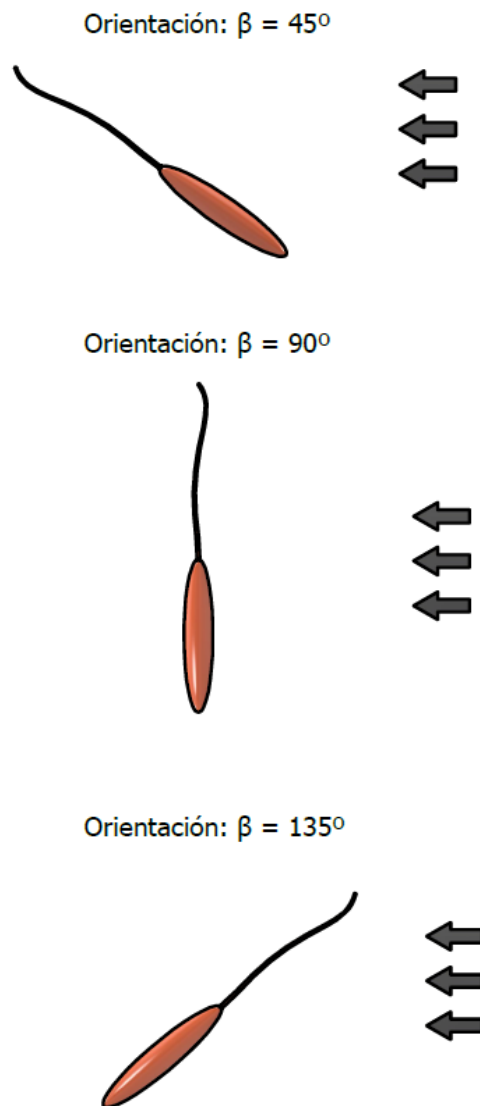


Figura 2.3. Bocetos de la diáspora para ángulos de ataque intermedios: 45° , 90° y 135° .

En los siguientes subapartados se describirá como se han conseguido obtener los parámetros descritos anteriormente, así como la puesta a punto del banco de ensayos.

2.2 Descripción y caracterización de las especies estudiadas.

Después de cientos de millones de años de evolución natural, diferentes semillas han desarrollado estructuras diversas pero únicas y, por lo tanto, tienen sus propios comportamientos aerodinámicos que mejoran la resistencia. Es por ello que algunas semillas producen estructuras aladas para ganar algo de sustentación durante el deslizamiento o autorrotación mientras otras semillas maximizan la resistencia al construir plumas (Figura 2.4) Estos atributos morfológicos de las diásporas, como pelos, alas, tamaño pequeño y diseños estructurales adaptables, facilitan su transporte aerodinámico (Casseau, V. et al. 2015).

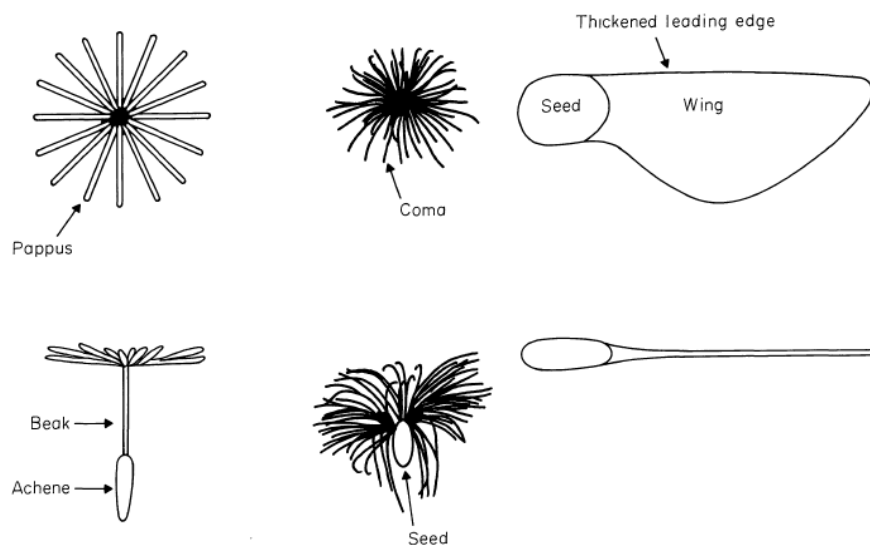


Figura 2.4. Diversas morfologías de semillas mostrando área frontal y lateral. *Taraxacum officinale*, *Asclepius syriaca* y una samara de arce asimétrica (Greene, D.F. y Johnson, E.A. 1990)

Para que las semillas se extiendan a largas distancias, su estructura es generalmente una estructura de disco compuesta por filamentos flexibles. Durante el proceso de vuelo de la semilla, debido a la acción de la presión hidrodinámica, el

filamento flexible se deformará para adoptar una forma aerodinámica, reduciendo así la resistencia al flujo.

Las semillas emplumadas contienen un haz de filamentos comúnmente denominado pappus o vilano que mejora el arrastre. El vilano prolonga el descenso de la semilla para que pueda ser arrastrada más lejos por los vientos horizontales y también puede servir para orientar la semilla en su caída. Este mecanismo de vuelo pasivo es muy eficaz y permite la dispersión de semillas a distancias formidables.

Las semillas aladas presentan diferentes mecanismos de vuelo, algunas de ellas planean (gliding), otras descienden balanceándose mientras otras exhiben un movimiento de rotación estable mientras caen. Estas estructuras no sólo ralentizan la caída por un mayor rozamiento, sino que también, algunas especies plumadas de bajas velocidades terminales son capaces de elevar su posición inicial con vientos verticales ascendentes corrientes o por vientos ascendentes de convección como ocurre también en la dispersión de algunos tipos de pólenes.

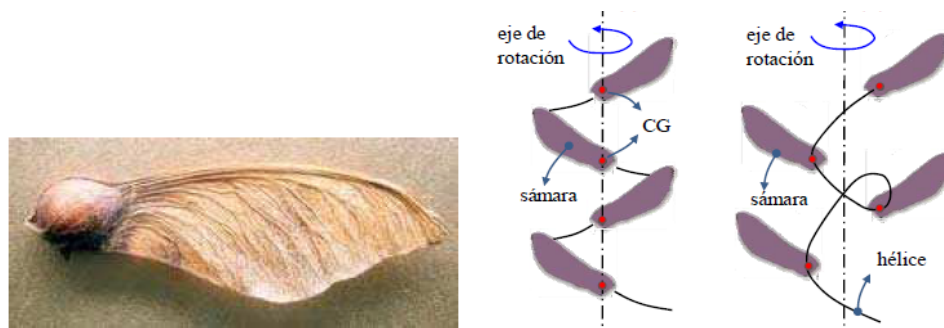


Figura 2.5. Imagen y boceto de una semilla de arce como referencia a las semillas autorotantes (Roccia et al. 2013)

Minghu Liu et al. 2020 dividieron las especies en siete categorías (tabla 2.1) por tipo aerodinámico basado en la morfología de la semilla y la aerodinámica en aire en calma (Augsburger 1986; Matlack 1987; Stevenson et al. 2015).

Aerodynamic type	Aerodynamic behavior in still air	Seed morphology
Floater	Floats downward in a vertical line	Plume/achene
Rolling autogyro	Rotates simultaneously around seed's longitudinal axis and one end of the seed in a spiral	Two-winged seed
Autogyro	Rotates tightly around the seed end of the seed	Samara, one-winged seed
Helicopter	Spins tightly around a vertical line	Pappus/achene
Helix	Rotates around vertical helix's axis	Long spiral shaped appendage
Tumbler	Tumbles but not on a consistent axis or rotates around a vertical line	Four-winged or five-winged seed
Plummeting	Falls downward in a vertical line	Balloon-liked or bristled seed

Tabla 2.1. Comportamiento aerodinámico y estructuras morfológicas de las semillas dispersadas por viento (Minghu Liu et al. 2020)

Aunque este tipo de atributos morfológicos tengan probablemente mayor importancia en la dispersión primaria donde la semilla aún está en la planta y puede beneficiarse de la altura, dado nuestro interés en la dispersión secundaria también tendremos en cuenta este factor en el estudio. Para ello se caracteriza la morfología de las semillas de las diferentes especies usadas en nuestros ensayos. El objetivo es poder comparar y analizar la relación e influencia de tanto el peso como de la geometría de la diáspora con su velocidad de despegue y posterior trayectoria de vuelo.

Se diferenciarán dos grupos principales, por un lado las semillas sin estructura de vuelo (a,b,c) y por otro las que constan de cualquier elemento que ayude al vuelo (d-g) Se pueden observar las diferentes especies en la figura 2.6, **(a)** **(b)** **(c)** semillas pequeñas elipsoidales sin estructura de vuelo **(d)** semilla con estructura de vuelo formada por cinco filamentos **(e)** semilla emplumada con haz de filamentos **(f)** **(g)** semillas alargadas elipsoidales con estructura de vuelo formada por un filamento.

Para el peso es usada una balanza analítica, realizando un mínimo de 7 medidas. Aquellas semillas con un peso igual o inferior al error instrumental de la balanza, como es el caso de *Arabidopsis thaliana*, son pesadas en conjunto, y tras el conteo de semillas, se divide la cantidad medida se por el número de semillas (tabla 2.2).

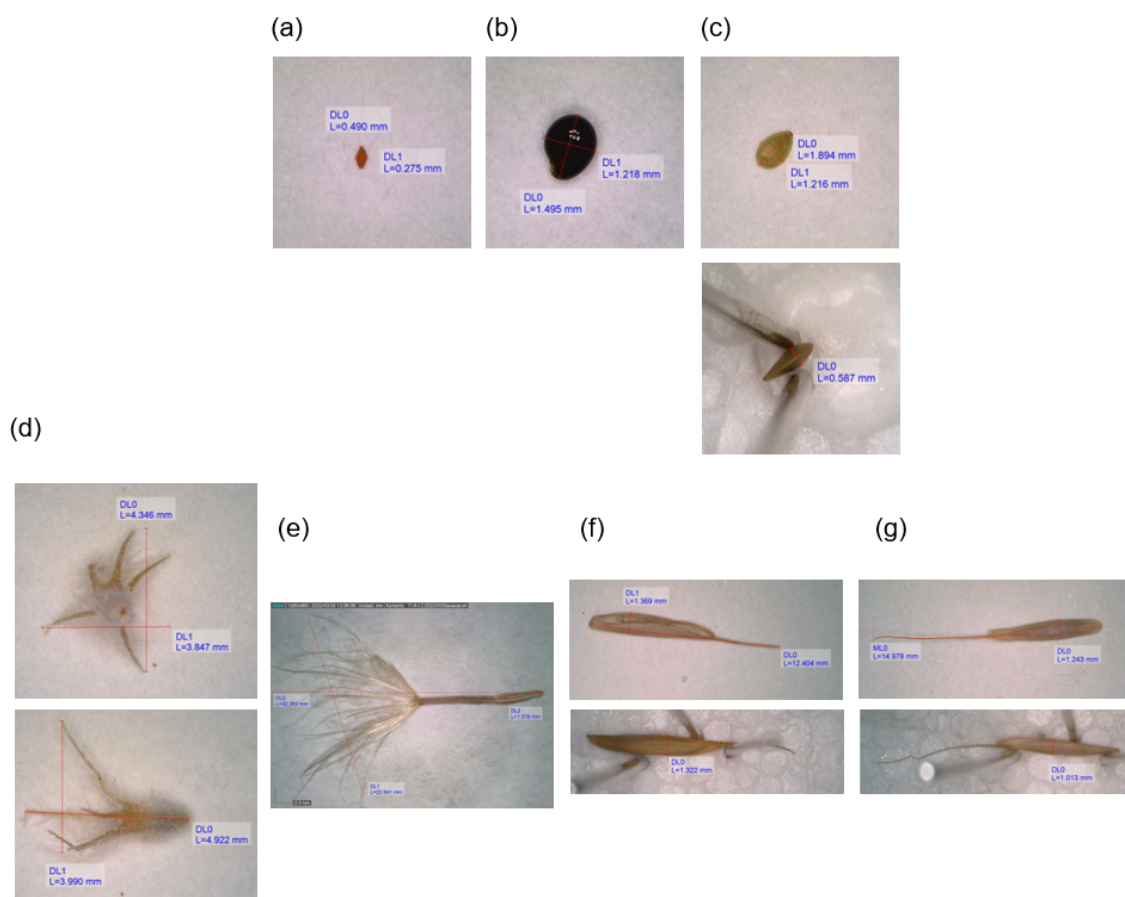


Figura 2.6. Vista superior de las diferentes especies de semillas usadas en los experimentos **(a)** *Arabidopsis thaliana* **(b)** *Ononix natrix* **(c)** *Urtica dioica* **(d)** *Thymus vulgaris* **(e)** *Taraxacum officinale* **(f)** *Brachypodium stacei* **(g)** *Brachypodium distachyon*. En (c) (d) (f) (g) también se aprecia la vista lateral

Especie	Abrev.	Peso semillas (mg)															Media	σ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
<i>Arabidopsis Thaliana</i> *	AT	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0
<i>Ononis natrix</i>	ON	2,5	2,2	1,5	1	3,6	2,1	1,4	2	2,3	1,2	1,9	2,7	1,8	2,1	2,5	2,1	0,7
<i>Urtica dioica</i>	UD	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4						0,57	0,08
<i>Thymus vulgaris</i>	TV	1	0,6	1	0,5	0,4	0,6	0,5	0,7	0,5	0,4						0,6	0,2
<i>Taraxacum officinale</i>	TO	0,49	0,43	0,64	0,7	0,53	0,63	0,56	0,73	0,6	0,68						0,6	0,1
<i>Brachypodium stacei</i>	BS	6,3	4,3	3,1	4,8	5	3,7	4,9	4,5	4,9	6,1	6,1	6,7	1,2	4,7	0,6	4	2
<i>Brachypodium distachyon</i>	BD	4,2	1,5	1,3	1,3	7,5	3,2	3,7	7,7	5,9	5,5	1	4,1	6,3	3		4	2

* 0,5/23

Tabla 2.2. Peso medio y desviación típica (σ) de las semillas de las siete especies a estudiar.

Las dimensiones de las semillas son calculadas con una cámara de alta precisión y el software DinoCapture 2.0. Son tomadas hasta tres tipos de medidas: diámetro mayor (D), diámetro menor (d) y altura (h). Cada una de ellas repetida en 5 semillas por especie estudiada. Para algunos casos (*Arabidopsis thaliana* y *Ononis natrix*) al ser las semillas tan pequeñas la tercera dimensión se despreció, al ser muy complicado realizar su medición.

Para las semillas sin estructura de vuelo estas tres/dos dimensiones (D, d, h) son suficientes para el análisis. Sin embargo, para las semillas con estructura de vuelo, no es idóneo, pues hay que tener en cuenta la semilla (D_s , d_s , h_s) y la estructura de vuelo (d_{EV} , h_{EV}) independientemente. Para ello se utiliza el software ImageJ para analizar las imágenes y obtener las medidas restantes.

Todas estas medidas de peso y longitud formarán parte de las variables usadas en nuestro análisis dimensional, el cual nos permitirá sacar conclusiones.

2.2.1 Arabidopsis thaliana

Arabidopsis thaliana, conocida simplemente como *Arabidopsis*, es una planta herbácea de pequeño tamaño y ciclo anual. Una de las características que han hecho que *Arabidopsis* sea muy utilizada en el laboratorio son su ciclo vital corto y la gran cantidad de semillas que produce, hasta 5000 por planta.

Además de su función como modelo general para la investigación en biología vegetal, también ofrece un sistema atractivo para el estudio de las semillas oleaginosas. Sin embargo, las limitaciones asociadas con el uso de *Arabidopsis* como modelo para especies de cultivo son que las plantas son pequeñas y sus semillas son diminutas ($\sim 20 \mu\text{g}$) (Li, Y. et al. 2006)

Es una planta que puede medir entre 10 y 30 centímetros de altura sin incluir la raíz. Las flores son muy pequeñas y se agrupan formando pequeños grupos. El fruto es una silicua de un par de centímetros de largo y dos milímetros de ancho,

que puede llegar a contener cerca de treinta semillas. Éstas se dispersan a través del viento al abrirse la silicua madura.



Figura 2.7. Planta *Arabidopsis thaliana*

Las semillas de *Arabidopsis* son bastante simples a nivel de estructura y, en general, germinan cerca de la planta de origen porque no tienen sistemas sofisticados de dispersión. Este hecho puede ser contraproducente cuando las condiciones ambientales son adversas (episodio de sequía, contaminación local, etc.) ya que la mayor parte de las semillas se ven afectadas.

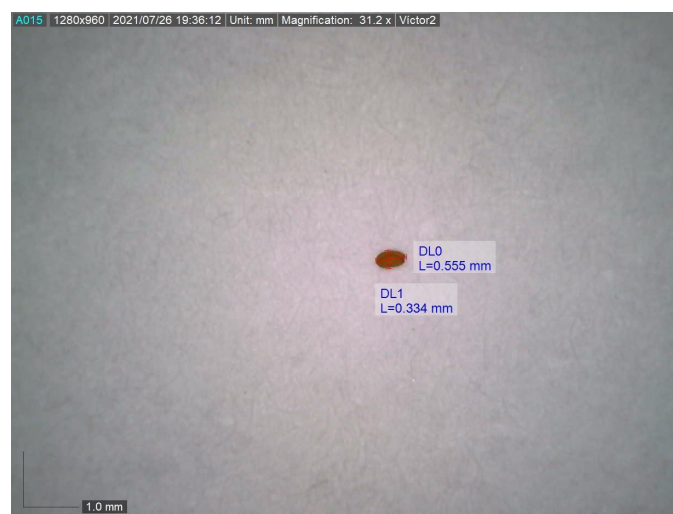


Figura 2.8. Caracterización n°2 *Arabidopsis Thaliana*. *DL0* y *DL1*, diámetro mayor y menor de la semilla respectivamente

Arabidopsis thaliana	Número de ensayos				Media	σ
	1	2	3	4		
D (mm)	0,49	0,56	0,49	0,51	0,51	0,03
d (mm)	0,28	0,33	0,26	0,26	0,28	0,04
d/D	0,56	0,60	0,52	0,50	0,55	0,04

Tabla 2.3. Caracterización geométrica Arabidopsis thaliana.

2.2.2 Ononis natrix

Ononis natrix es una hierba perenne en ocasiones de porte arbustivo, alcanzando hasta el metro de altura. Sus tallos son erectos y están cubiertos de pelos glandulosos como prácticamente la totalidad de la planta. La mayoría de las hojas tienen tres folíolos, muy pegadizos al tacto y ligeramente dentados. Sus flores, amarillas y solitarias, presentan una corola formada por cinco pétalos. El fruto es una legumbre, que contiene entre 3 y 30 semillas.

Esta planta melífera con néctar en sus flores es capaz de atraer insectos polinizadores, de ahí su nombre vulgar, pegamoscas.



Figura 2.9. Planta *Ononis natrix* (Fuente:

<https://bioeduca.malaga.eu/es/catalogo-de-especies/detalle-de-la-especie/Pegamoscas/#!tab1>)



Figura 2.10. Caracterización n°2 Ononix natrix. *DL0* y *DL1*, diámetro mayor y menor de la semilla respectivamente.

Ononix natrix	Número de ensayos					Media	σ
	1	2	3	4	5		
D (mm)	1,50	1,49	1,47	1,45	1,45	1,47	0,02
d (mm)	1,22	1,14	1,12	1,14	1,15	1,152	0,04
d/D	0,81	0,77	0,76	0,79	0,79	0,78	0,02

Tabla 2.4. Caracterización geométrica Ononix natrix.

2.2.3. *Urtica dioica*

Urtica dioica, vulgarmente conocida como ortiga verde, es una hierba cosmopolita de la familia de las Urticaceae que alcanza entre los 50 y 150 cm de altura. La característica más conocida de esta planta es la presencia de pelos urticantes cuyo líquido ácido produce una irritación con picor intenso en la piel cuando se la toca o roza. Tiene el tallo de sección cuadrada, hojas ovaladas, con el borde aserrado y sus flores son verdes, pequeñas y dioicas; de ahí su apellido. Sus frutos son pequeños aquenios ovoide-elipsoideos secos de color verde aceitunado-marrón.



Figura 2.11. Planta *Urtica dioica* (Fuente: <https://www.asturnatura.com/especie/urtica-dioica.html>
<https://www.naturalista.mx/taxa/51884-Urtica-dioica>).

Se cría en suelos ricos en nitrógeno y húmedos, en corrales, en huertos, a lo largo de caminos, de muros de piedra, en el campo o en la montaña, etc. Se reproduce y expande rápidamente, lo cual en muchas ocasiones resulta difícil de controlar.

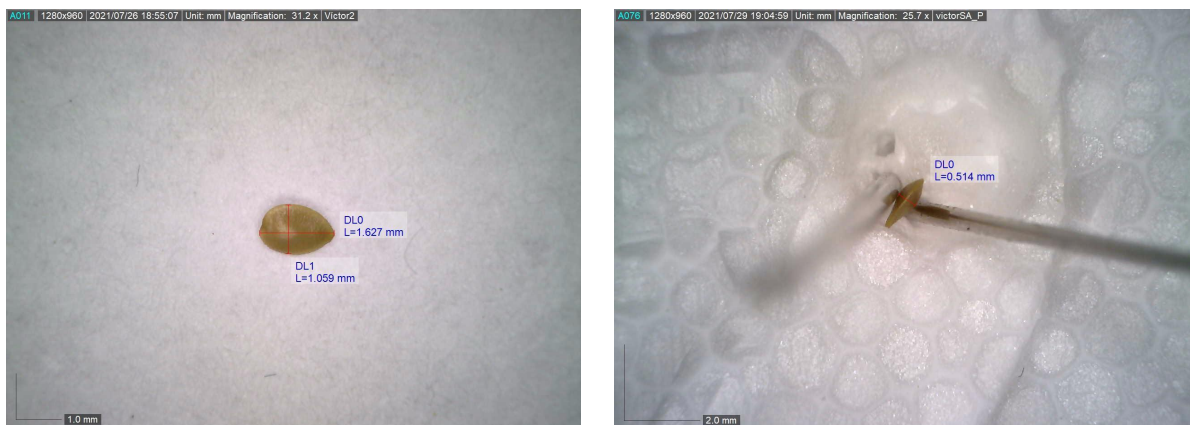


Figura 2.12. Caracterización n°2 *Urtica dioica*. Imagen izquierda *DL0* y *DL1*, diámetro mayor y menor de la semilla respectivamente. Imagen derecha *DL0*, altura.

Urtica dioica	Número de ensayos					Media	σ
	1	2	3	4	5		
D (mm)	1,89	1,63	1,83	1,80	1,96	1,82	0,13
d (mm)	1,22	1,06	1,26	1,23	1,27	1,21	0,09
h (mm)	0,59	0,51	0,59	0,50	0,50	0,54	0,05
d/D	0,64	0,65	0,69	0,68	0,65	0,66	0,02
h/D	0,31	0,32	0,32	0,28	0,25	0,30	0,03

Tabla 2.5. Caracterización geométrica Urtica dioica.

2.2.4 *Thymus vulgaris*

Thymus vulgaris o popularmente conocido tomillo es una planta de la familia de las labiadas de amplia distribución. Es una planta perenne de origen mediterráneo, con tallos de sección cuadrangular o redondeada, generalmente pelosos, de escasa altura que no suele superar los 40 centímetros y que puede vivir en suelos pobres y pedregosos de regiones secas.

Las brácteas son verde-grisáceas, el cáliz está formado por tres dientes cortos casi iguales en el labio superior y dos más largos en el inferior, con pelos en sus bordes y de color rojizo. El fruto es un tetraquenio (cuatro achenios: fruto seco con una sola semilla y con pericarpio no soldado a ella) de color marrón.



Figura 2.13. Planta de *Thymus vulgaris* a la izquierda, detalle de sus flores a la derecha.

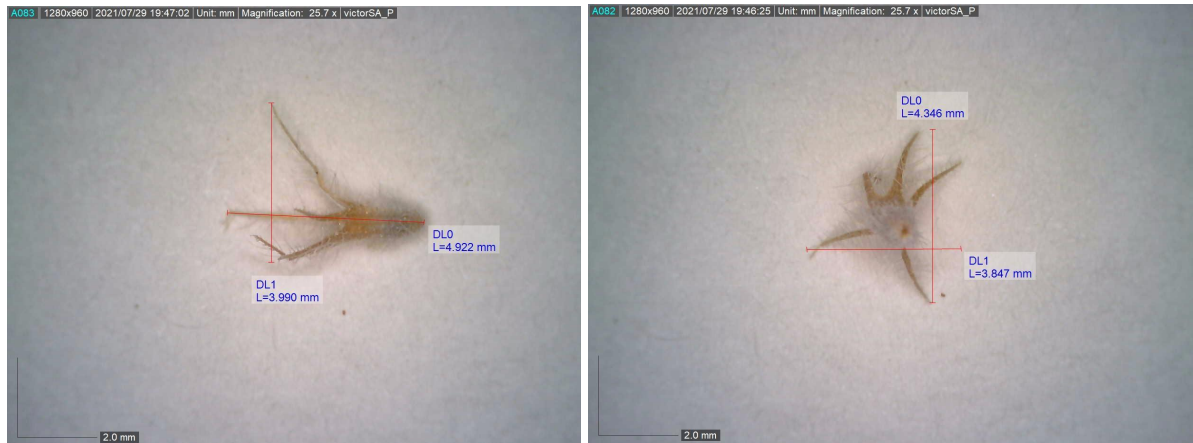


Figura 2.14. Caracterización n°2 Thymus Vulgaris. Medidas máximas de la semilla y estructura de vuelo tomadas como un conjunto. Imagen izquierda *DL0* y *DL1*, diámetro mayor y menor respectivamente. Imagen derecha *DL1*, altura.

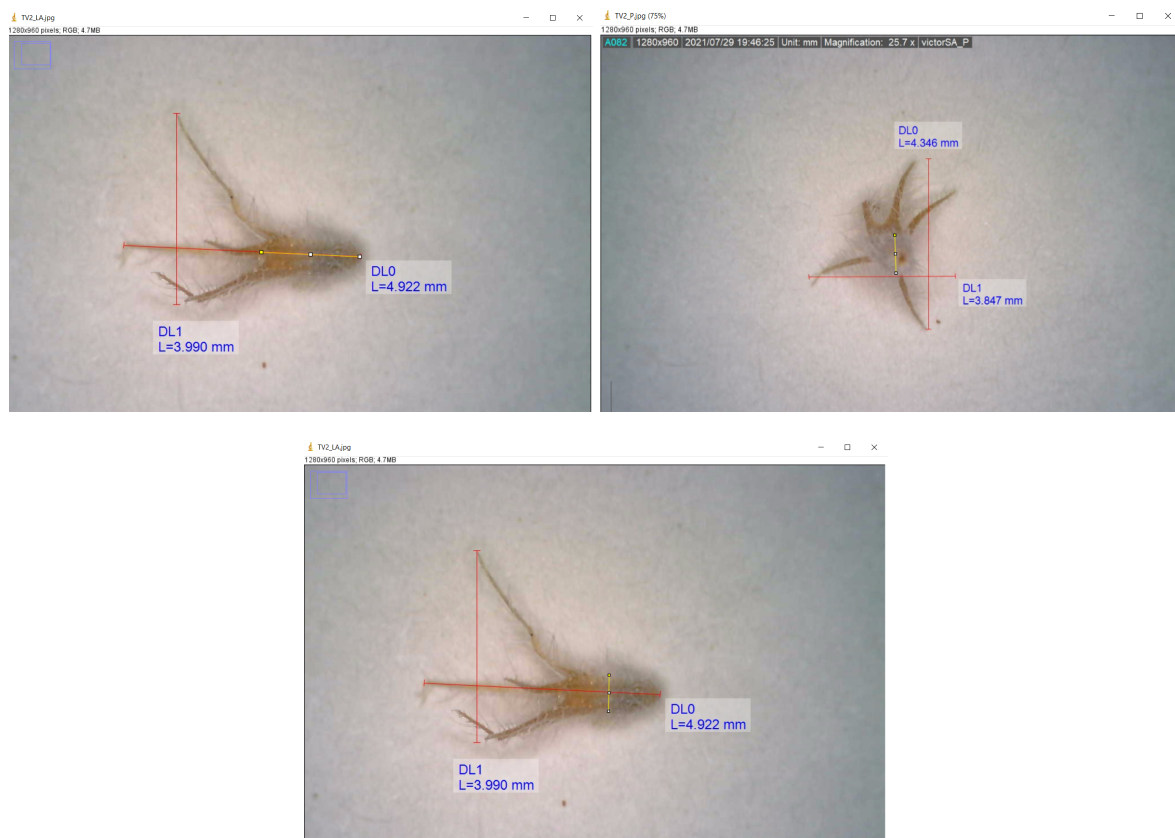


Figura 2.15. Caracterización n°2 Thymus Vulgaris. Medidas de la semilla individual D_s , d_s , h_s analizadas con ImageJ.

Thymus vulgaris	Número de ensayos				Media	σ
	1	2	3	4		
Dmax (mm)	5,2	4,9	5,9	5,4	5,3	0,4
dmax (mm)	4,2	4,0	4,6	3,2	4,0	0,6
h (mm)	4,0	3,8	3,3	3,8	3,7	0,3
dmax/Dmax	0,81	0,81	0,79	0,59	0,75	0,11
Ds (mm)	1,7	2,1	1,7	2,4	2,0	0,3
ds (mm)	0,57	0,75	0,52	0,64	0,62	0,10
hs(mm)	0,7	0,9	0,6	0,7	0,7	0,2
ds/Ds	0,33	0,37	0,31	0,27	0,32	0,04
hs / Ds	0,43	0,45	0,33	0,29	0,37	0,08
dEV(mm)	0,120	0,110	0,104	0,107	0,110	0,007
hEV (mm)	3,2	2,5	3,4	3,3	3,1	0,4

Tabla 2.6. Caracterización geométrica Thymus vulgaris.

2.2.5 Taraxacum officinale

Taraxacum officinale, ordinariamente conocido como diente de león común, es una planta perenne compuesta común de la familia Asteraceae que crece en muchas regiones templadas y húmedas del mundo. Tiene una gran capacidad de dispersión y necesita muy pocos requisitos, por lo que crece en casi cualquier parte, por ello muchas veces se la considera una mala hierba.



Figura 2.16. Flor amarilla y bola de pelusa blanca formada después de la madurez de la semilla de diente de león a la izquierda. Dispersión por viento del diente de león a la derecha.

Sus flores son de un color amarillo fácilmente identificable. El capítulum del diente de león contiene cientos de semillas que forman un haz de filamentos cuando sus semillas están maduras. Este vilano blanco (pappus), está conectado al aquenio por un tallo llamado pico que se alarga a medida que madura la fruta.

La visualización del flujo en la estela del vilano ha descubierto un anillo de vórtice separado en el que el aire recircula de manera estable a una corta distancia del propio vilano. En 2018, Cummins et al. determinaron que la porosidad de esta especie junto con su geometría en forma de disco son las responsables de esta estructura de flujo observada que ayuda a la dispersión de esta especie. Esto se debe a una capa límite de aire relativamente viscoso, que no puede pasar fácilmente entre las cerdas. Al crear un anillo de vórtice separado a su paso, el vuelo del vilano se estabiliza y se produce más sustentación y resistencia, llegando a alcanzar distancias de dispersión de hasta 100 metros.

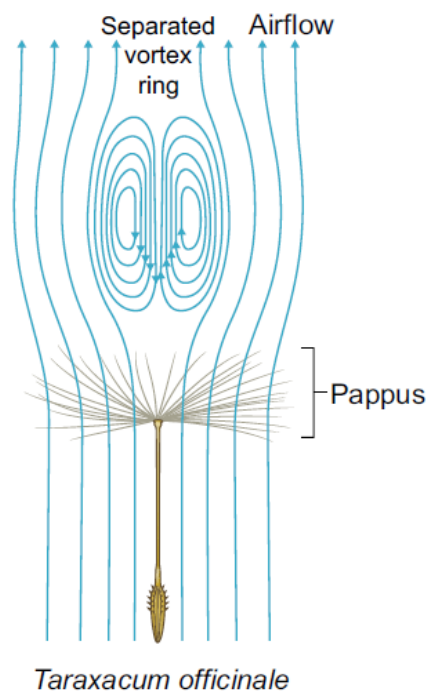


Figura 2.17. Esquema de una diáspora de diente de león que ilustra las líneas de flujo de aire a través y alrededor del vilano (Seale and Nakayama 2020).

Asimismo, el vilano puede cerrarse dependiendo de los niveles de humedad para modificar la dispersión (ver Seale et al., 2022) Esto altera el flujo aerodinámico alrededor de las diásporas que exhiben una resistencia reducida y anillos de vórtice separados más pequeños. Cerrar el vilano en respuesta a la humedad reduce su capacidad de desprenderse de la planta madre en respuesta al flujo de aire (Seale and Nakayama 2020)

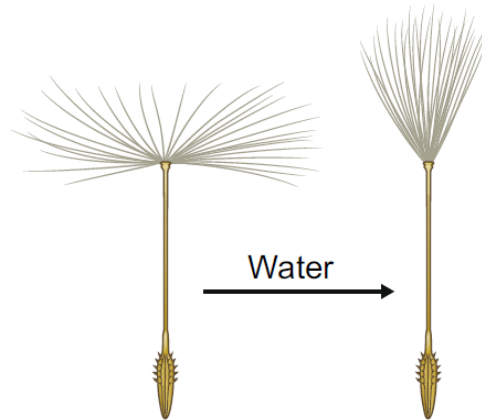


Figura 2.18. Esquema que demuestra el cierre del vilano del diente de león por exposición al agua (Seale and Nakayama 2020).

Cuando madura, el vilano exhibe una morfología radial típica con un ángulo de apertura, $2\beta \approx 180^\circ$. Cuando se expone a condiciones húmedas y se estabiliza, llega a tener un ángulo de apertura de $2\beta \approx 72^\circ$. Los pappi completamente abiertos tienen un área proyectada más grande, mientras que los pappi cerrados dan un área proyectada más pequeña (figura 2.19). Por lo tanto, la configuración del pappi es un parámetro crítico que afecta el área proyectada A (Meng, Q. et al 2016).

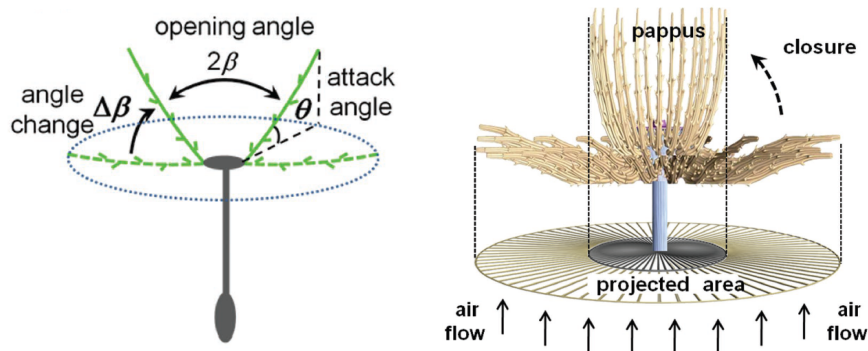


Figura 2.19. A la izquierda esquema semilla diente de león, 2β , $\Delta\beta$ y θ denotan el ángulo de apertura entre cada vilano, el cambio en el ángulo del vilano y el ángulo

de ataque, respectivamente. A la derecha ilustración de cómo el área proyectada del pappus varía significativamente cuando la configuración del pappi cambia de un estado abierto a un estado cerrado (Meng, Q. et al 2016).

Los filamentos deformados y desorientados de las semillas de diente de león son complicados de estudiar numéricamente debido a las irregularidades en sus longitudes y distribución radial. Así pues, su morfología ha sido simplificada en varios estudios (Dong et al. 2021, Cummins et al. 2018) como un disco poroso compuesto por muchos filamentos flexibles (figura 2.20). El vilano consta aproximadamente de 100 filamentos, con una longitud media de 7,4 mm y un diámetro medio de 16,3 μm , los cuales ocupan solo un 10% de la estructura del papus, con espacio vacío entre ellos crucial para el mecanismo de vuelo (Cummins et al. 2018). Las cerdas pueden reducirse a cilindros cuadrados (Dong et al. 2021) o bien a cilindros circulares (Cummins et al. 2018)

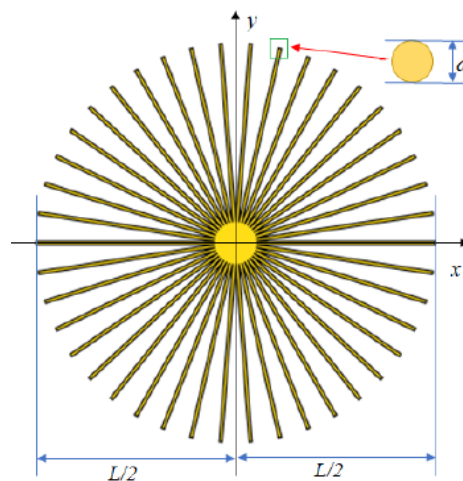


Figura 2.20. Modelado de haz de filamentos flexibles del diente de león (Sun and Guo 2022).

Al variar el número de cerdas n , se obtiene un rango de porosidades ε definido como el área vacía dividida por el área total ($\varepsilon = 0$ para discos sólidos). La porosidad ε fue definida por Yi-Ming Du et al. 2021 (ecuación 2.1.) como la relación entre el área proyectada vacía y el área plana del disco envolvente del vilano.

$$\varepsilon \approx 1 - \frac{nd'(R - d/2) + \pi(d/2)^2}{\pi(R)^2}$$

Ecuación 2.1. Porosidad de un vilano de diente de león.

Los diámetros del disco central y del cilindro del filamento son representados por d y d' respectivamente, n el número de filamentos y R el valor promedio del radio. Ver en tabla 2.7 valores promedios utilizados en otros ensayos, en la tabla 2.8 los valores obtenidos con la cámara de alta precisión y el uso posterior del software ImageJ.

Taraxacum officinale			
Masa (mg)	Radio pappus (mm)	Velocidad terminal (m/s)	Ref
-	5,0	-	Yi-Ming Du et al. 2021
0,633	6,9	-	Cummins et al. 2018
-	7,4	-	Ledda 2019
0,62	6,2	0,269	Azuma et al 2014
0,68	5,29	0,42	Matlack 1987
			Casseau 2015

Tabla 2.7. Masa, radio del pappus y velocidad terminal de Taraxacum officinale reportados en la literatura.

Taraxacum officinale	Número de ensayos				Media	σ
	1	2	3	4		
h total (mm)	28	31	32	28	30	2
Ds (mm)	5,0	6,1	5,6	4,3	5,2	0,8
ds (mm)	1,35	1,32	1,38	1,16	1,30	0,10
ds / Ds	0,27	0,22	0,25	0,27	0,25	0,03
ds / h total	0,048	0,042	0,043	0,042	0,044	0,003
hs+tallo(mm)	12	14	15	12	13	1
R pappus (mm)	11	7	11	12	10	2
d fil (mm)	0,12	0,09	0,06	0,08	0,09	0,02
h fil (mm)	12	14	11	9	12	2

Tabla 2.8. Caracterización geométrica Taraxacum officinale.

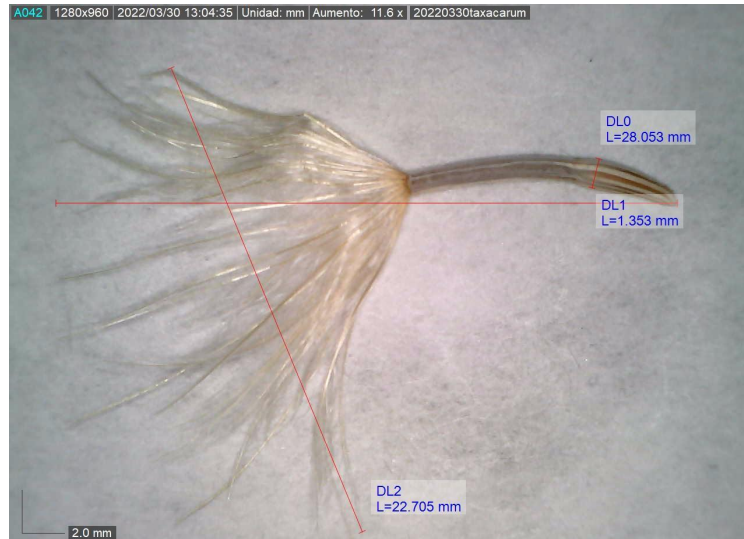


Figura 2.21. Caracterización nº1 Taraxacum officinale. $DL0$, $DL1$ y $DL2$, altura total del conjunto de semilla y estructura de vuelo (h_{total}), diámetro menor de la semilla (d_s), y diámetro estructura de vuelo (D_{pappus}), respectivamente.

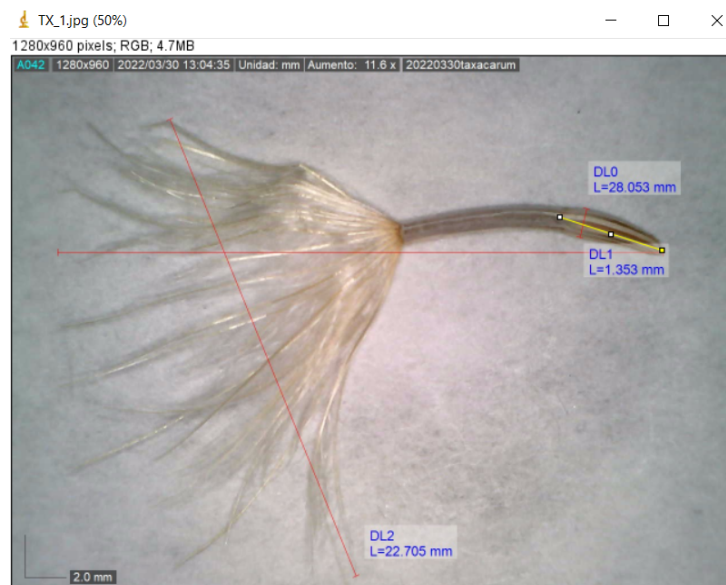


Figura 2.22. Caracterización nº1 Taraxacum officinale. Diámetro mayor de la semilla (D_s) calculado con ImageJ.

En los estudios de Cummins et al. 2018 y Casseau et al. 2015 la porosidad varía de cero a uno al cambiar no solo el número de cilindros sino también el tamaño del marco central y las cerdas (figura 2.24) lo que dificulta identificar el parámetro que domina la conexión entre la porosidad y los comportamientos de flujo. Cummins et al. encontraron que un disco plano con 42 filamentos cilíndricos es suficiente para imitar a un diente de león (genera un anillo de vórtice separado en el túnel de viento), correspondiendo a una porosidad de 0,89 (figura 2.23)

Según Cummins et al. 2018 para que un disco sólido suministre la misma fuerza de arrastre que el vilano a la misma velocidad terminal, su diámetro viene dado por $D_{\text{disk}} = 8W / (1,17\rho\pi U^2) = 8,6 \text{ mm}$, que es un 38% más pequeño que D . El número de Reynolds del vilano es 357, mientras que el de un disco equivalente tiene un Re de 222.

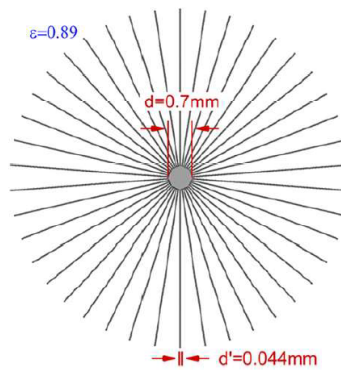


Figura 2.23. Modelo de papus con una porosidad de 0,89 (Yi-Ming Du et al. 2021).

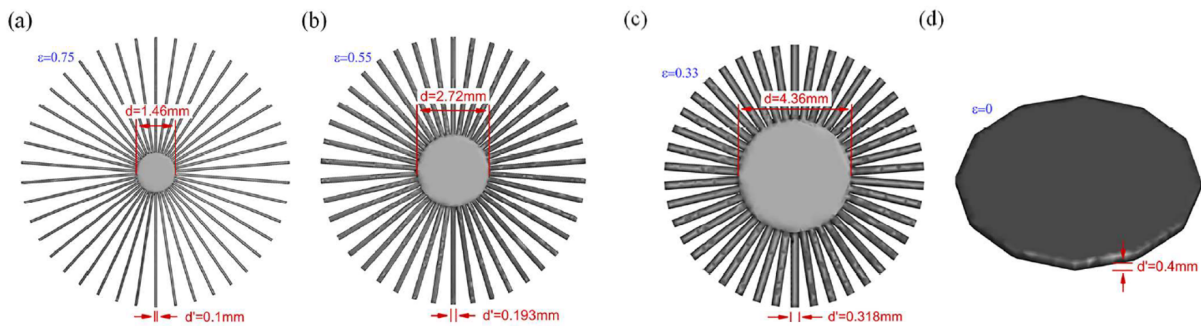


Figura 2.24. Modelos de diente de león con diferentes porosidades (a)-(d) 0.75, 0.55, 0.33, y 0 (disco sólido) respectivamente (Yi- Ming Du et al. 2021)

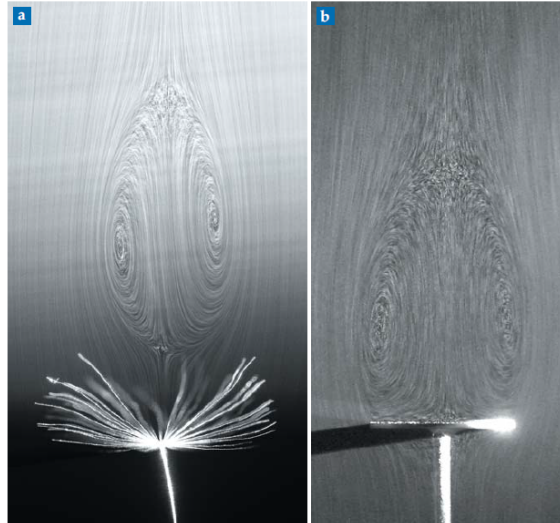


Figura 2.25. (a) Semilla de diente de león en túnel vertical genera un anillo de vórtice separado con el punto de remanso por encima del papus. (b) Por el contrario, el vórtice para un disco sólido está unido y tiene el punto de remanso en la superficie del disco (Cummins et al. 2018).

La figura 2.26. muestra la dependencia medida de la formación de vórtices estables entre la porosidad y el número de Reynolds. En cada porosidad, el SVR se volvió inestable por encima de un número de Reynolds crítico y ese valor aumentó con la porosidad.

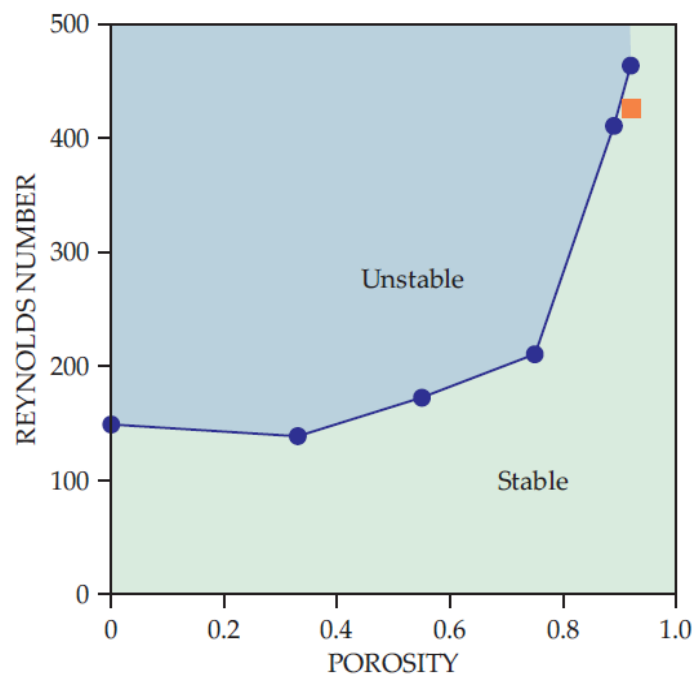


Figura 2.26. La porosidad del pappus y el número de Reynolds determinan la estabilidad del vórtice. Para una porosidad dada, existe un número de Reynolds crítico por debajo del cual se forma un anillo de vórtice separado estable (SVR). El pappus de un diente de león, indicado por el cuadrado naranja, tiene una porosidad que es lo suficientemente alta como para garantizar la estabilidad. Eso los hace optimizados para generar resistencia con un SVR, que es como vuelan. Por encima de ese valor, el anillo de vórtice es inestable y se aleja del vilano. (Adaptado por Physics Nature 2019, de C. Cummins et al. (2018))

Sin embargo, para Dong et al. 2021 las únicas variables con respecto a las características del flujo fueron la separación entre cerdas y Re . A través de simulaciones numéricas, identificaron los anillos de vórtice adjuntos con diferentes dimensiones para un cierto rango de ϵ . A medida que ϵ aumenta, los anillos de vórtice se acortan gradualmente y eventualmente desaparecen. Un Re más alto también es eficaz para alargar el vórtice debido a los intensos efectos de inercia, en cuyas condiciones la estela permanece estable, en contraste con la turbulencia en el caso sólido (figura 2.27)

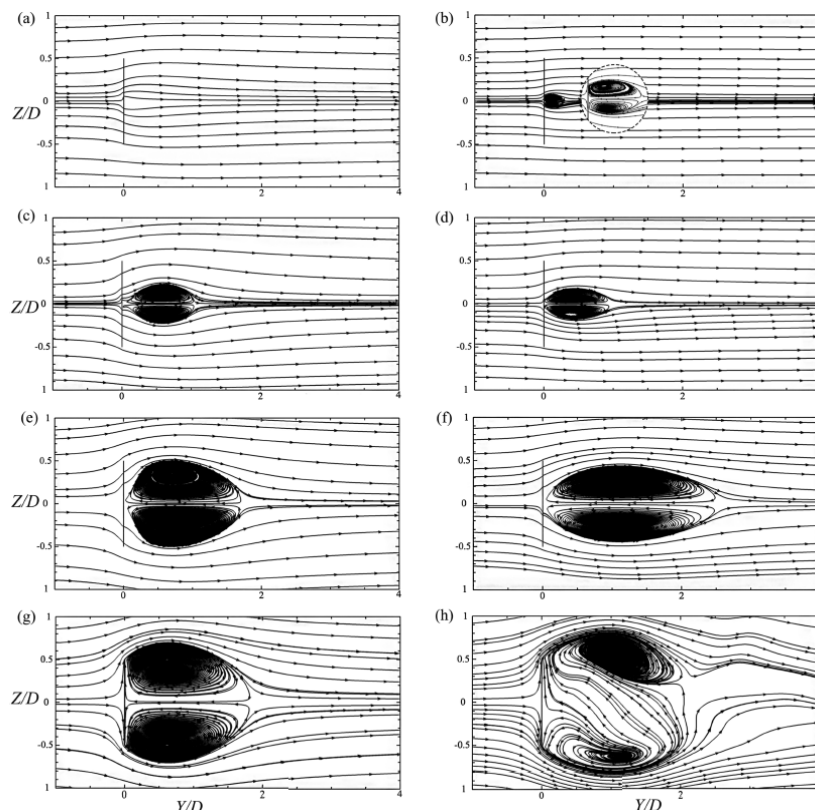


Figura 2.27. Comportamientos de flujo para (a) $\varepsilon = 0.964$, $Re = 100$; (b) $\varepsilon = 0.964$, $Re = 400$; (c) $\varepsilon = 0.930$, $Re = 100$; (d) $\varepsilon = 0.930$, $Re = 400$; (e) $\varepsilon = 0.887$, $Re = 100$; (f) $\varepsilon = 0.887$, $Re = 400$; (g) disco sólido, $Re = 100$; y (h) disco sólido, $Re = 400$ (Dong et al. 2021)

En términos de flujo a través de una geometría compleja con filamentos unidos alrededor de un marco central, se pueden usar dos enfoques para definir el número de Reynolds: (I) considerar las semillas como un esqueleto integral, donde D es el diámetro del vilano (II) considerar las cerdas individualmente siendo la longitud característica el diámetro del filamento. Se utiliza este número de Reynolds cuando se requiere analizar los efectos de baja resolución.

La figura 2.28 representa la relación de los coeficientes de arrastre del disco poroso (C_d) con el disco sólido (C_{d_solid}) respecto ε a diferentes números de Reynolds. Podemos notar cómo a medida que la porosidad disminuye, el coeficiente de arrastre disminuye drásticamente. Al mismo tiempo, el coeficiente de arrastre es mayor a un número de Reynolds bajo debido al efecto de pared más fuerte de la interacción de capas límite de filamentos más gruesos. Sin embargo, la variación del coeficiente de arrastre con el número de Reynolds y la porosidad no es concluyente. Hasta la fecha, no se ha explicado a fondo la forma en que los espacios en una configuración de varios cuerpos afectan la estructura del flujo y la fuerza aerodinámica, en función de la porosidad y el número de Reynolds (Dong et al 2021)

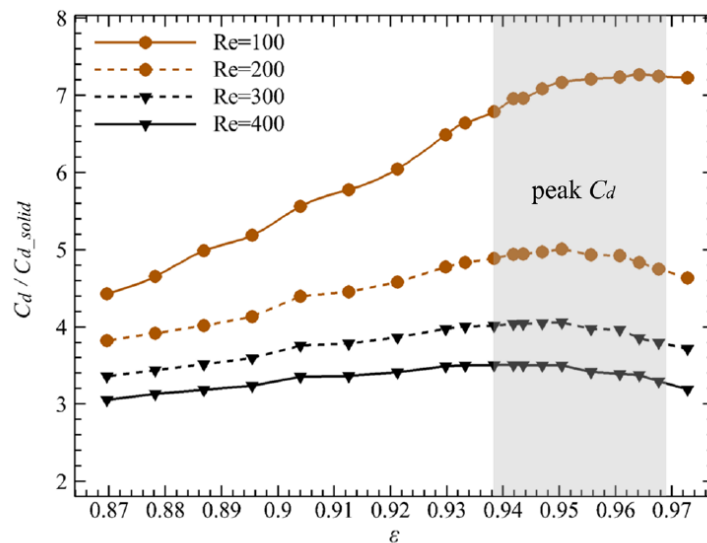


Figura 2.28. Relación coeficientes de arrastre del disco poroso (C_d) con disco sólido (C_{d_solid}) respecto ϵ en $Re = 100, 200, 300$ y 400 (Dong et al 2021)

Mientras en la figura 2.29. tenemos la representación del coeficiente de arrastre respecto al número de Reynolds para semillas de diente de león y discos sólidos. Las relaciones del diámetro del disco equivalente (D_{disk}) y el área (A_{disk}) al diámetro del papus (D) y el área (A), respectivamente, indican que el disco equivalente siempre es más pequeño, pero tiene un área proyectada significativamente mayor que el pappus (Figura 2.29.b)

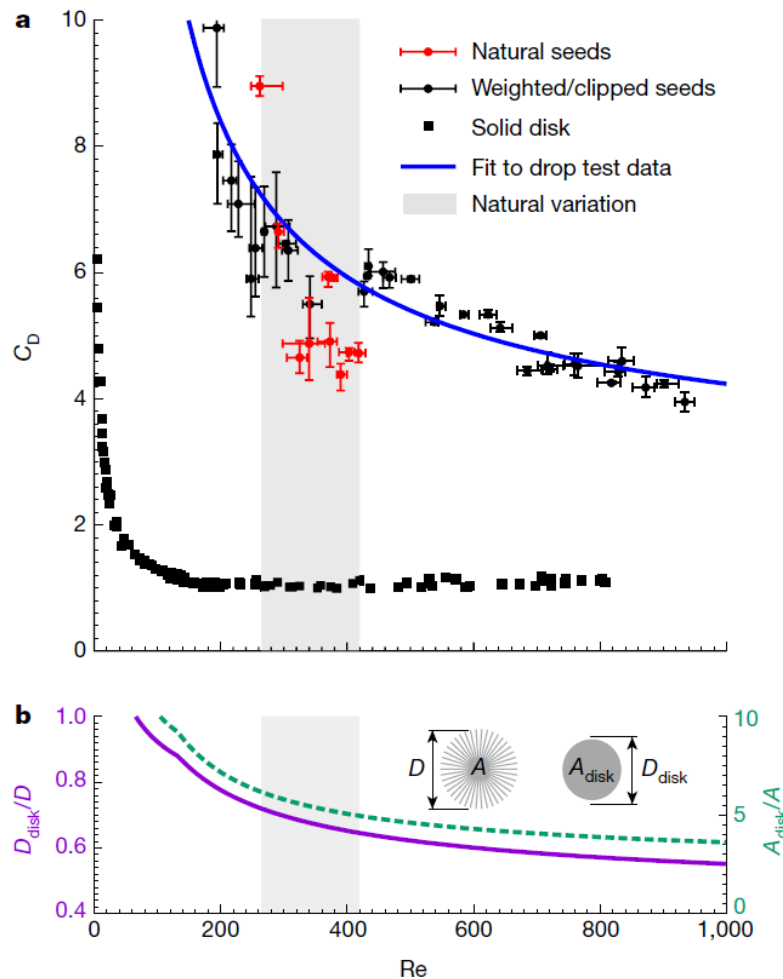


Figura 2.29. a) El coeficiente de arrastre para semillas de diente de león naturales y ponderadas artificialmente en función de Re . La curva azul indica el ajuste a todos los datos de la prueba de caída. También se muestra el C_D para un disco sólido de experimentos anteriores (cuadrado relleno) b) Las relaciones del diámetro del disco

equivalente al diámetro del vilano D_{disk}/D (curva magenta continua) y el área del disco equivalente al área del vilano A_{disk}/A (curva verde discontinua).

2.2.6 *Brachypodium*

Brachypodium es un género de plantas herbáceas perteneciente a la familia de las poáceas o gramíneas. Su distribución es muy amplia, apareciendo en África, Asia, América y Europa.

Utilizaremos dos tipos de especies de este género, *Brachypodium distachyon* y *Brachypodium stacei*, ambas semillas con morfologías prácticamente iguales, cariósides alargadas de vaina abierta muy resistentes a la rotura. Son plantas pequeñas que normalmente alcanzan los 15-40 cm de altura.

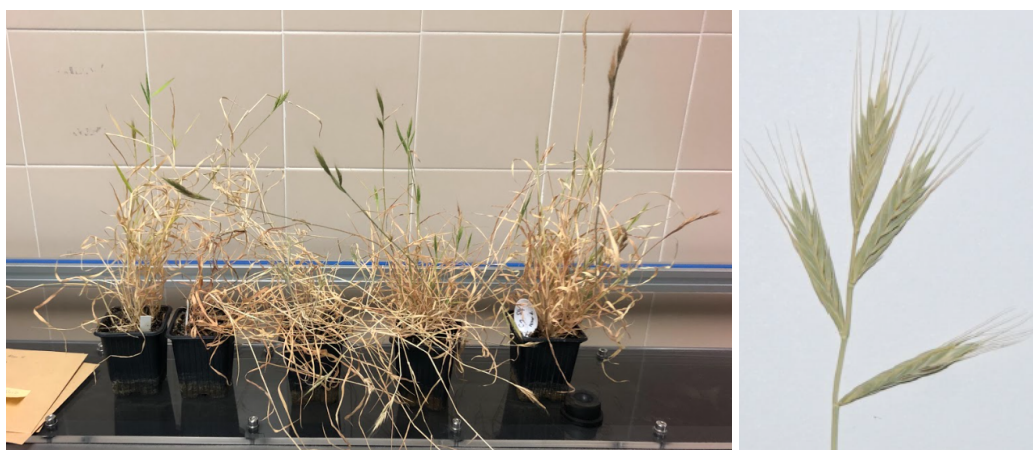


Figura 2.30. Plantas *Brachypodium stacei* y *distachyon* a la izquierda. Detalle de la espiga de una *Brachypodium distachyon* a la derecha.

El Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, en Características de la Gramínea *Brachypodium distachyon* como Cubierta Vegetal en 2016 obtuvo pesos entre 4,5 y 6,5 g/1000 semillas. Siendo nuestro peso medio de ambas especies bastante aproximado al intervalo. 4,014 y 4,46 mg.

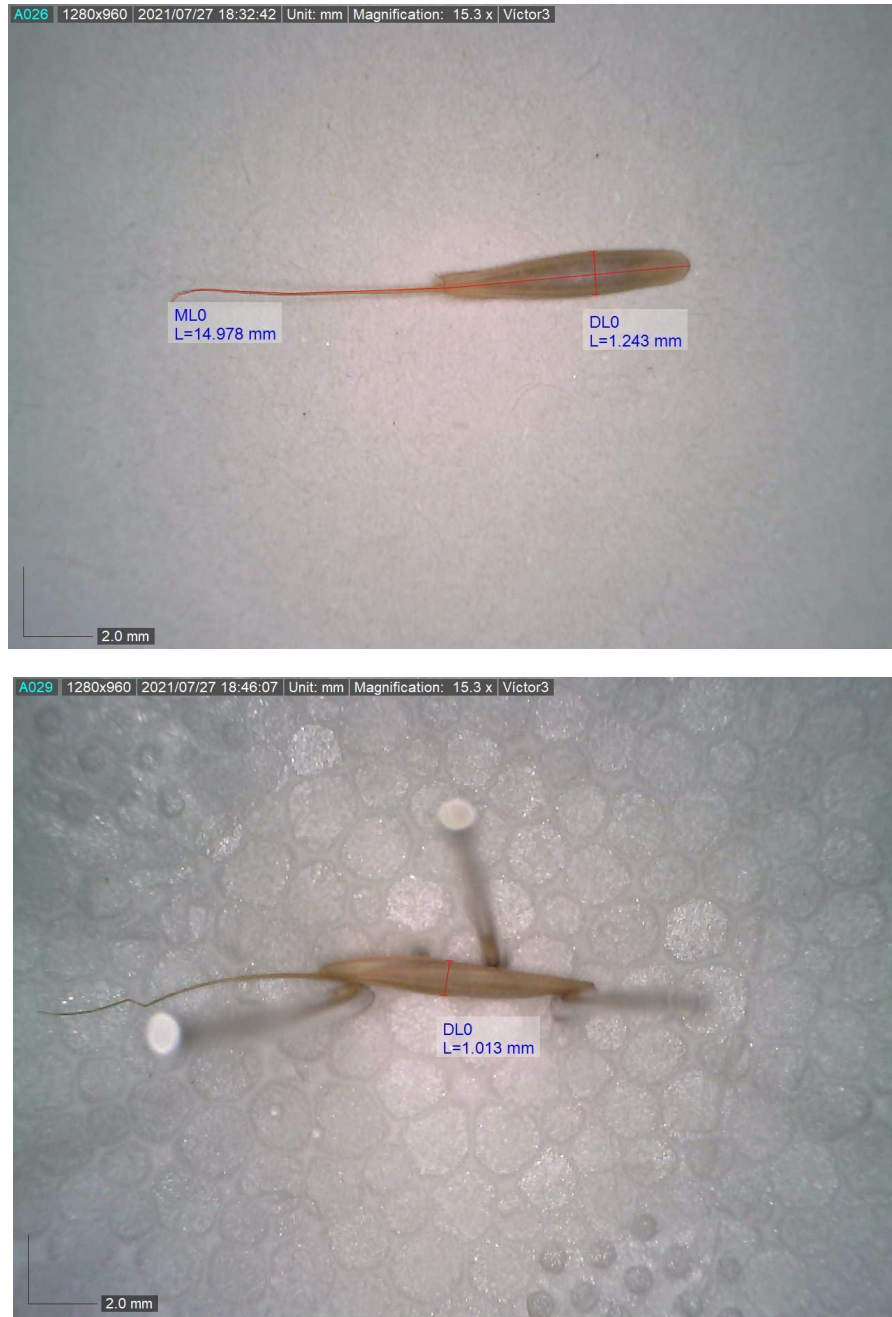


Figura 2.31. Caracterización n°1 *Brachypodium distachyon*. Imagen superior *ML0* y *DL0*, diámetro máximo del conjunto (semilla y estructura de vuelo) y diámetro menor de la semilla respectivamente. Imagen inferior *DL0*, altura

Brachypodium stacei	Número de ensayos					Media	σ
	1	2	3	4	5		
Dmax (mm)	12	16	15	15	15	15	1
Ds (mm)	8,0	7,4	7,6	8,2	8,1	7,9	0,4
ds (mm)	1,37	1,52	1,60	1,52	1,52	1,51	0,08
hs (mm)	1,32	1,21	1,24	1,08	1,24	1,22	0,09
ds/Ds	0,17	0,21	0,21	0,18	0,19	0,19	0,02
ds/Dmax	0,110	0,097	0,105	0,103	0,099	0,103	0,005
hs/Ds	0,165	0,164	0,162	0,131	0,153	0,155	0,014
dEV(mm)	0,13	0,12	0,05	0,09	0,07	0,09	0,03
hEV (mm)	4	8	8	7	7	7	2

Brachypodium dystachion	Número de ensayos					Media	σ
	1	2	3	4	5		
Dmax (mm)	15	14	15	18	15	15	1
Ds (mm)	7,0	7,8	7,8	8,2	8,2	7,8	0,5
ds (mm)	1,24	1,40	1,42	1,49	1,57	1,42	0,12
hs (mm)	1,01	1,20	1,20	1,36	1,37	1,23	0,15
ds/Ds	0,177	0,181	0,182	0,182	0,192	0,183	0,006
ds/Dmax	0,083	0,102	0,092	0,084	0,101	0,092	0,009
hs/Ds	0,144	0,155	0,154	0,167	0,167	0,158	0,010
dEV(mm)	0,01	0,08	0,08	0,11	0,06	0,07	0,04
hEV (mm)	8	6	8	10	7	8	1

Tabla 2.10. Caracterización geométrica Brachypodium stacei y distachyon

2.3 Descripción y puesta a punto de la instalación: Banco de ensayos

Es utilizado un túnel de viento horizontal abierto disponible en el laboratorio de Mecánica de Fluidos usado para la caracterización de una turbina eólica, por lo que se requiere un acondicionamiento y puesta a punto para los ensayos precisados en este proyecto.

El equipo Computer Controlled Wind Energy Unit “EEEC” consta del túnel de viento abierto de acero inoxidable de cinco metros de longitud con área transversal dodecagonal irregular cuyas dimensiones se pueden consultar en la Figura 2.35, un aerogenerador, a escala de laboratorio y un ventilador axial de velocidad variable (controlado por ordenador). Un rotor y un generador son los elementos centrales del

aerogenerador. El generador convierte la energía cinética del rotor en energía eléctrica. Para el acondicionamiento del flujo consta de unos tubos de PVC para dirigir el flujo más una malla metálica.

2.3.1 Acondicionamiento y caracterización del túnel de viento

Como el flujo que recorre el túnel de viento es expulsado al laboratorio, un depósito en reposo que hace que el viento sufra una gran desaceleración, no se puede saber con exactitud el valor de la velocidad en el extremo abierto, por lo que se decide dejar la planta dentro del túnel. Para ello es necesaria la prolongación del túnel, de manera que no modifique de ninguna manera el flujo, con este fin se añadirán unos paneles de PVC de 1 metro de longitud con el mismo área transversal y transparentes para poder realizar la grabación a través de ellos.

Esta modificación supone pérdidas de velocidad e incluso de una posible uniformidad del flujo de aire. Como se comentó en el apartado 1.4.2. una instalación de un túnel de viento de calidad debe proporcionar un rango de Re razonable, uniformidad de flujo e intensidades de turbulencia bajas, las cuales medimos para asegurarnos que nuestro túnel cumple con estos requisitos. La calidad de estas mediciones depende en gran medida de la utilización adecuada de los instrumentos utilizados para obtener dichas medidas.

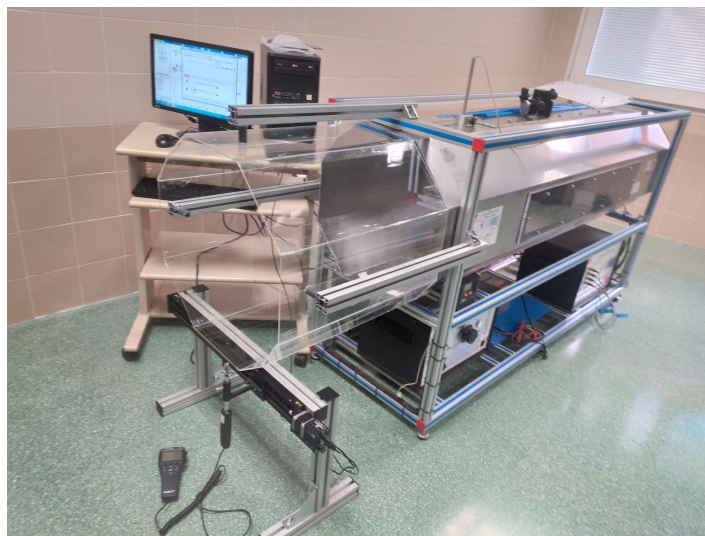


Figura 2.32. Túnel de viento usado en los experimentos (vista perspectiva).

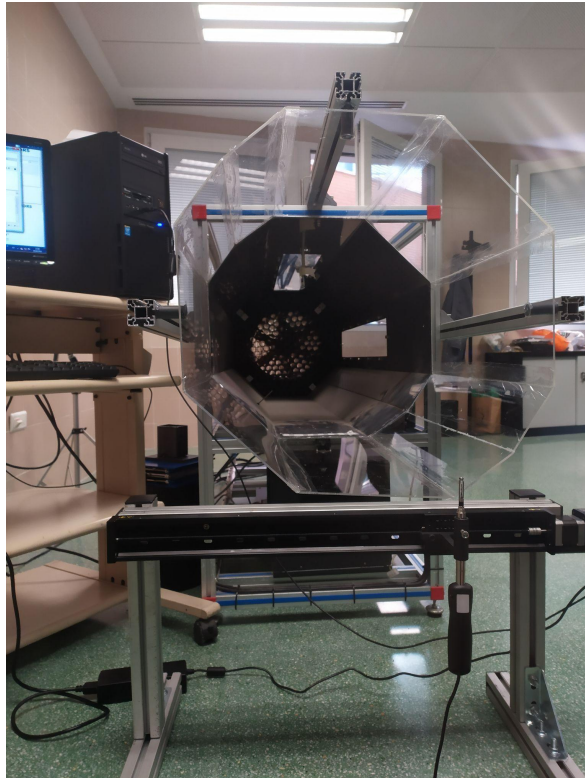


Figura 2.33. Túnel de viento usado en los experimentos (vista perfil).

- Uniformidad de flujo

La uniformidad del flujo generalmente se caracteriza como una desviación mín-máx o rms de la velocidad media en el flujo de la sección de prueba. Hay una gran cantidad de técnicas experimentales disponibles para medir el perfil de velocidad media, incluido el paso de una sonda Pitot a través de la sección de prueba. Esta es una técnica comprobada, económica, pero que requiere mucho tiempo (Cattafesta et al. 2010). También se pueden utilizar hilos calientes únicos o múltiples configurados para anemometría de temperatura constante (CTA), velocimetría de imágenes de partículas (PIV) y velocimetría láser Doppler (LDV).

Para conocer la uniformidad del flujo se estudia en el área de salida del túnel con un hilo caliente. El objetivo es comprobar que el túnel es funcional y se cumple que es en el centro del área transversal donde se halla la velocidad máxima.

El estudio de uniformidad de flujo se lleva a cabo instalando el anemómetro en una guía móvil horizontal controlada mediante software (Ver Figuras 2.32 y 2.33, parte inferior derecha del túnel). Así se puede realizar un mapa de velocidades en planos perpendiculares a la dirección del flujo mediante una matriz de puntos en dicha sección. Debido al fácil manejo del anemómetro de hilo caliente es posible realizar el estudio completo de la sección.

La anemometría de hilo caliente es una técnica ampliamente utilizada para investigar flujos turbulentos cuando las velocidades fluctuantes ocurren solas o con otros parámetros fluctuantes del fluido.

Existen 3 posibles tipos de anemómetros según el sistema electrónico en el que se incluya el sensor. Por un lado, está el anemómetro de corriente constante (CCA) de bucle abierto, es el más simple. Por otro lado, el anemómetro de voltaje constante (CVA). Y, por otro lado, el anemómetro de temperatura constante (CTA) que retroalimenta al bucle, son los más usados en el campo del análisis experimental de la velocidad de los fluidos (Johnson, R. 1998) Este último es utilizado para nuestras mediciones, en concreto un AIRFLOW TA430.



Figura 2.34. Anemómetro AIRFLOW TA430 utilizado en los ensayos

Consiste en un filamento calentado que queda expuesto de manera perpendicular al flujo del viento. Este filamento está conectado a un circuito eléctrico que monitoriza las variaciones de resistencia eléctrica por la acción del flujo. Debido

a esto, se puede establecer una relación entre la velocidad del flujo y la resistencia en el filamento calentado.

El principio físico mediante el cual funcionan estos instrumentos está basado en la transferencia de calor por convección entre el hilo caliente y el flujo de aire que pasa a su alrededor. El sensor es calentado por una corriente eléctrica y enfriado por el aire que incide perpendicularmente a este sensor. Este enfriamiento se producirá proporcionalmente al componente perpendicular de la velocidad del aire, por lo que gracias a esto podemos calcular dicha velocidad.

La relación entre la velocidad del flujo y la tensión de salida es deducida mediante las ecuaciones de transferencia de calor, tomando por referencia la potencia generada por la corriente eléctrica (efecto Joule) que pasa por el hilo.

En la práctica el sensor del anemómetro se coloca en el punto donde queramos medir la velocidad y el aparato nos muestra la velocidad que hay en ese punto. Debido a su gran sencillez para la medición de la velocidad en cualquier punto de la sección del túnel de viento, podemos realizar con exactitud un mapa de velocidades que mostrará la uniformidad del flujo y las pérdidas de velocidad debido al acoplamiento de las láminas de PVC.

Usando el anemómetro de hilo caliente para la calibración del túnel (ver Figura 2.32, 2.33 y 2.35) se obtiene el siguiente el rango de velocidades con el que se puede trabajar (Tabla 2.9)

Potencia del ventilador (%)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
Velocidad medida sin malla metálica (m/s)	6,2	5,6	5,2	4,6 *	3,88	3,3	2,7	2,05	1,4	0,8
>*empieza a haber mucha oscilación										

Tabla 2.9. Mediciones velocidad de viento (m/s) con anemómetro de hilo caliente.

El mapa de velocidades es realizado en la sección de salida del túnel, a plena carga, al máximo de velocidad de viento posible. Para ello se usa una matriz de puntos, repartidos de manera simétrica y ocupando toda la superficie posible para

que los resultados sean lo más representativos posibles, a cada cual le corresponde una velocidad medida con el anemómetro. Las medidas son tomadas en intervalos de 2 cm en la dirección horizontal y de 4 cm en la vertical. Siendo el área total de la sección 23,583 dm² (Figura 2.35)

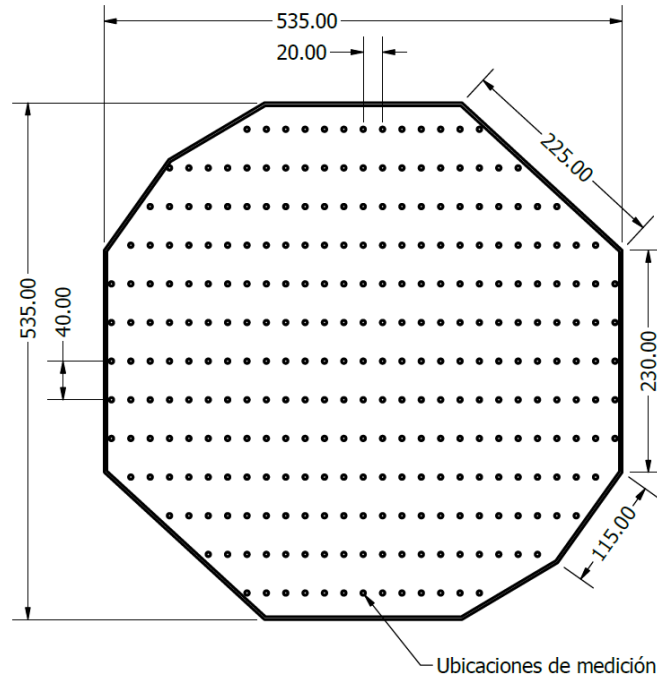


Figura 2.35. Área transversal de salida del túnel de viento y distribución de los puntos de medida. Unidades en milímetros.

A la hora de realizar la medición es de suma importancia colocar el anemómetro perpendicular al flujo de viento y esperar a que el resultado mostrado en pantalla se estabilice. Esta operación es repetida para cada punto de la matriz. Con los resultados obtenidos se realiza el mapa de velocidades de la sección. Utilizando el software Matlab es posible graficar las mediciones de los distintos valores de velocidad (Anexo I) (Figura 2.36).

Esta gráfica muestra que el flujo es uniforme en una zona relativamente grande, correspondiente al 21% del área total, encontrando sus máximas velocidades conforme aumenta la distancia a las paredes. Este valor máximo coincide con el medido por el anemómetro de hilo caliente que aparece en la Tabla 2.9. Con esto nos aseguramos que al situar las semillas a estudiar en la zona central se tiene la velocidad de calibración.

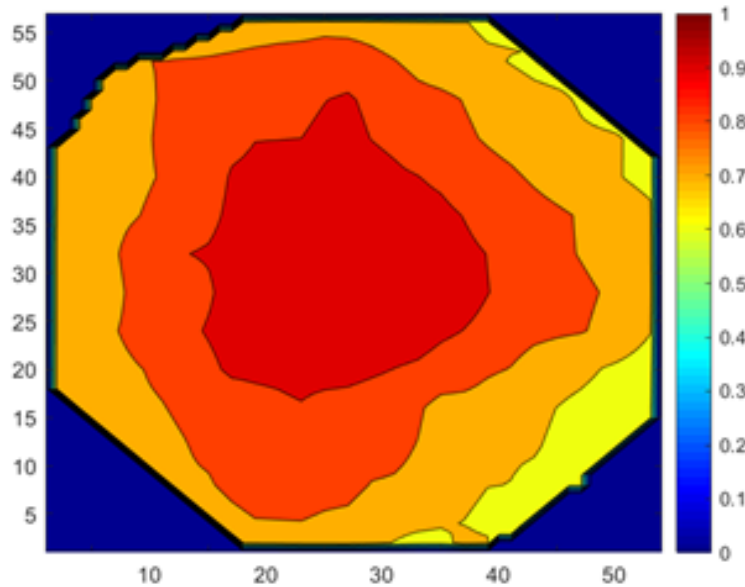


Figura 2.36. Gráfica adimensional de velocidad a la salida del túnel con una potencia del ventilador del 100% (sin malla metálica en el acondicionador de flujo). Ejes x-y medida de la sección transversal del túnel en cm. La escala de color representa el cociente entre la velocidad medida en ese punto y la velocidad máxima.

- Caracterización de la turbulencia

Las pruebas de túnel de viento a menudo buscan aislar los efectos de la turbulencia entrante de corriente libre. Por ejemplo, en los estudios de transición de la capa límite, niveles significativos de turbulencia entrante pueden alterar el comportamiento de la ubicación de la transición de la capa límite.

Un solo hilo caliente resuelve una magnitud de velocidad perpendicular a la línea del hilo, mientras rechaza las fluctuaciones de velocidad a lo largo del eje del hilo. Se debe tener en cuenta que, en la mayoría de los túneles de viento, la turbulencia de la sección de prueba es anisotrópica (Bradshaw y Mehta, 2003), lo que significa que las fluctuaciones axiales y laterales pueden ser drásticamente diferentes. Como tal, se debe usar un esquema de medición para resolver estos dos componentes de velocidad diferentes.

Por otro lado, aunque las pruebas de túnel de viento a menudo buscan aislar los efectos de la turbulencia, en nuestro caso, al querer simular las condiciones del medio ambiente reales, es de interés que exista una intensidad turbulencia controlada. Las subidas y bajadas bruscas de velocidad podrían ser un aliciente para un despegue más rápido de la diáspora, ya que los remolinos y rachas de viento aumentan las fuerzas de sustentación de esta, en especial, en especies con estructura de vuelo.

En un primer momento partimos de un túnel de viento con un acondicionador de flujo formado por tubos de PVC y una malla metálica. Este acondicionador hace que tengamos un flujo uniforme con menor velocidad, cómo no es de nuestro interés eliminar la turbulencia las medidas del flujo de viento se realizan sin parte de este acondicionador de flujo, eliminando la malla metálica, siendo un flujo menos uniforme, pero con mayor velocidad.

La intensidad turbulenta (TI) es la magnitud que caracteriza la turbulencia y se calcula como indica la ecuación 1.5. Se mide la velocidad del viento a tiempo real usando el anemómetro Dostmann TA 888 (Figura 2.37), capaz de obtener la fluctuación de velocidad por segundo. Siendo los datos obtenidos leídos y exportados por el software Meeter en un archivo de texto y un gráfico (ver Anexo II, Figura 6.5).



Figura 2.37. Anemómetro Dostmann TA 888 utilizado para la medición de la intensidad turbulenta

(<https://dostmann-electronic.de/product/ta-888-hot-wire-anemometer.html>)

La intensidad turbulenta es representada por las fluctuaciones de velocidad (en m/s) respecto a la media de la velocidad de viento incidente. Mediante la programación del código Matlab, obtenemos los valores de esta fluctuación media, u' , así como de la velocidad media, V , para cada velocidad requerida, de ahí, se calcula directamente la intensidad turbulenta. Además, se obtiene una gráfica de la intensidad turbulenta para cada velocidad medida en el túnel de viento. Las mediciones para cada velocidad son llevadas a cabo tres veces durante un minuto y medio, de donde se obtiene la media (ver Anexo II)

Observamos que la intensidad turbulenta oscila entre valores de 0.381 hasta 0.938 para el intervalo de velocidades de 3.3m/s a 6.2m/s. El mínimo ocurre a la velocidad máxima, así como el máximo para las velocidades cercanas a esta velocidad máxima (5.2 y 5.6 m/s). Exceptuando este mínimo de 0.381 todos los demás valores son mayores a 0.609. Observando una clara influencia de las fluctuaciones de velocidades (ver Tabla 2.10)

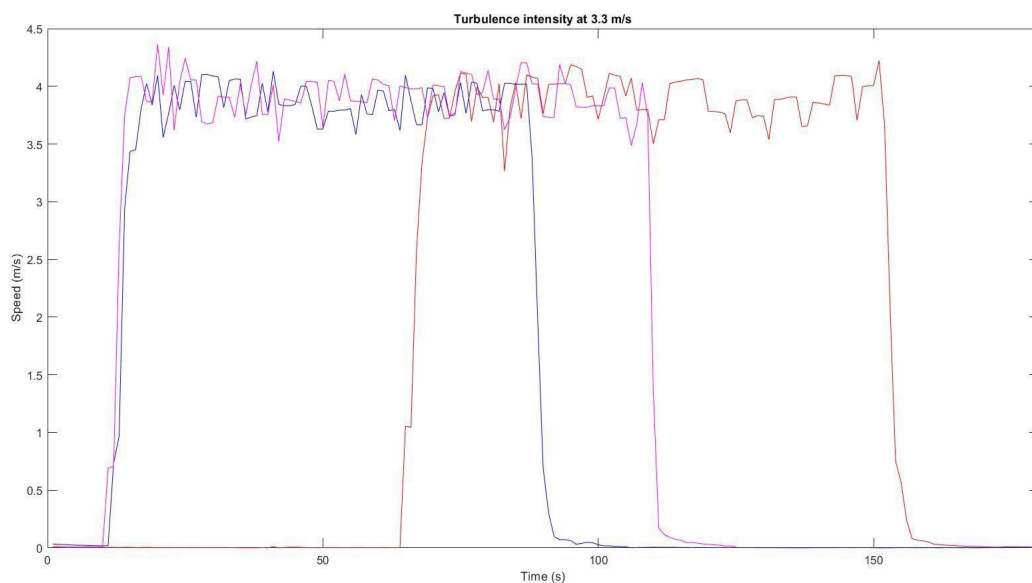


Figura 2.38. Gráfica de evolución temporal de la velocidad instantánea para la velocidad media de 3.3 m/s. Podemos comprobar como la velocidad fluctúa alrededor del valor predeterminado, dando lugar a un flujo turbulento.

Potencia del ventilador (%)	50	60	70	75	80	90	100
Velocidad ventilador (m/s)	3,3	3,88	4,6	4,9	5,2	5,6	6,2
Velocidad media (m/s)	1,933	3,289	3,373	3,24	3,036	3,437	5,751
Desviación típica - 1	2,247	1,948	2,298	2,709	2,9024	3,21	2,04
Desviación típica - 2	1,21	2,111	2,479	2,723	2,813	3,057	2,227
Desviación típica - 3	1,599	1,952	2,51	2,597	2,824	3,184	2,313
Media de la desviación	1,685	2,004	2,429	2,676	2,846	3,151	2,194
Intensidad turbulenta	0,872	0,609	0,72	0,826	0,938	0,917	0,381

Tabla 2.10. Resumen mediciones velocidad media, desviación típica y cálculo intensidad turbulenta según la ecuación 1.5

- Software túnel de viento

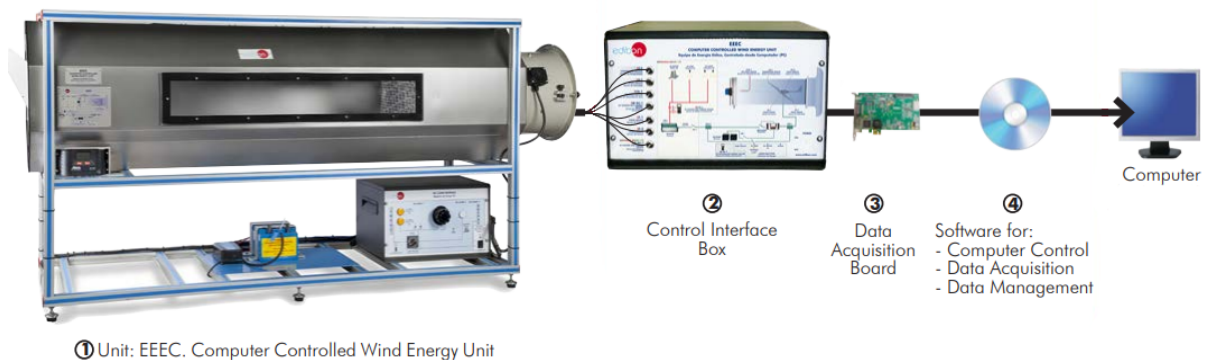


Figura 2.39. Esquema instalación túnel de viento (Computer Controlled Wind Energy Unit, with SCADA. Edibon)

La velocidad del aire se varía mediante el software cambiando la velocidad de rotación del ventilador axial. La Figura 2.41.III muestra el control de la velocidad de rotación del ventilador axial expresada en %, siendo el 100% plena carga.

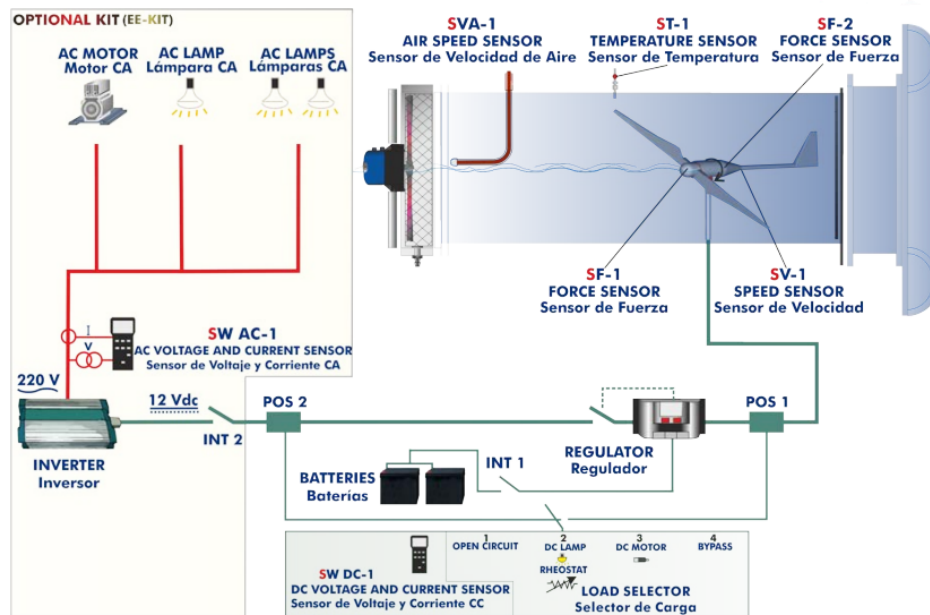


Figura 2.40. Diagrama de proceso (Panel de control)

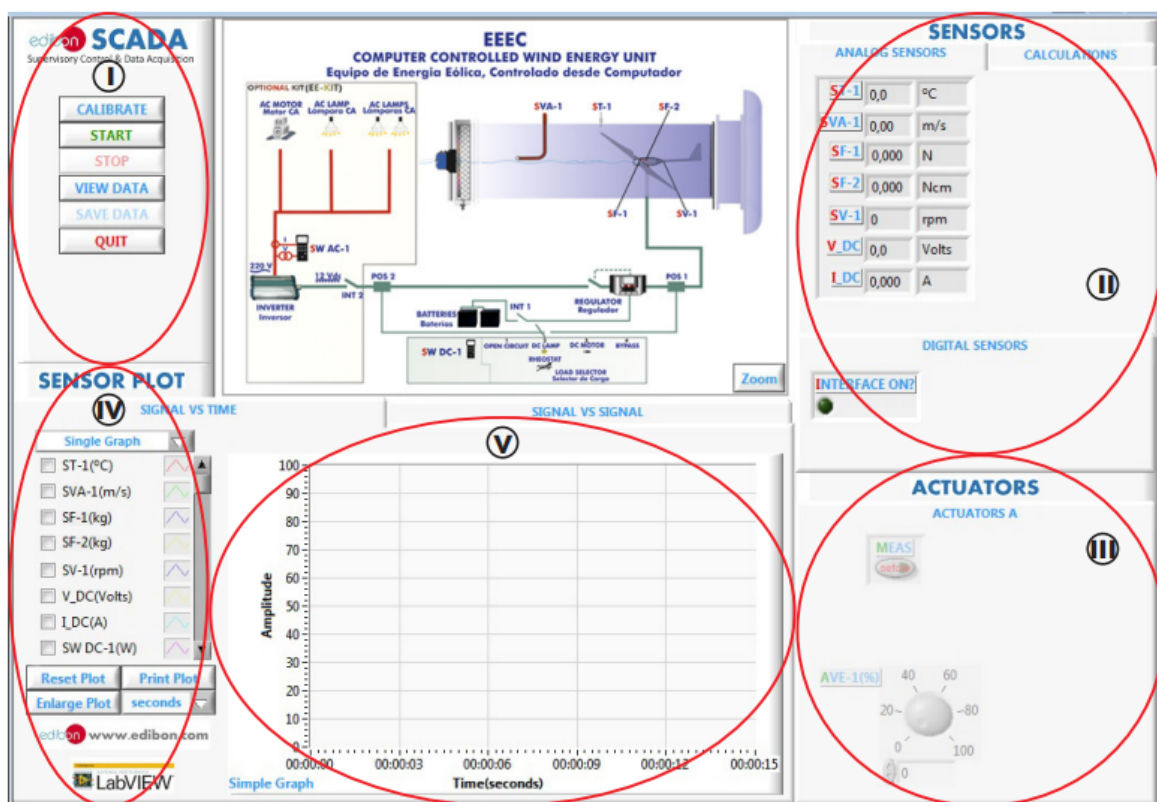


Figura 2.41. Pantalla principal del software SCADA para controlar el túnel de viento

- I. Principales posibilidades de funcionamiento del software
- II. Pantallas de sensores, valores en tiempo real y parámetros de salida adicionales
- III. Control de actuadores. AVE = Ventilador
- IV. Selección de canal y otros parámetros de trazado
- V. Visualizaciones de gráficos en tiempo real.

Los parámetros medidos son: temperatura del aire, velocidad del aire, velocidad del rotor, voltaje y corriente (Figura 2.41.II). Hay un sensor de temperatura antes del rotor del aerogenerador. La velocidad del aire se mide con un sensor colocado en el túnel y también se determina la velocidad de rotación del aerogenerador (rpm). Un sensor de voltaje y corriente permite medir el voltaje y la corriente para determinar la potencia.

De esta manera se indica la potencia de carga del ventilador para regular la velocidad de salida del aire en el túnel. Además de poder ver la velocidad del aire en la sección del sensor situado en la mitad del túnel aproximadamente, aunque esta medida no será de importancia pues como veremos a continuación nuestra zona de interés es la salida, en la cual se producirán pérdidas de carga y escapes de aire.

2.3.2 Sistema de grabación con cámara de alta velocidad, selección de la óptica y diseño del sistema de iluminación.

Para la grabación de los videos es usada una cámara de alta velocidad PHOTRON FASTCAM SA1.1 model 675 K-M1. El sistema cuenta con un rendimiento básico superior con resolución de megapíxeles, sensor de imagen ultrasensible capaz de una grabación clara en poca luz, y un marco de velocidad ultra-alta. La tasa de imagen por segundo tiene un máximo de 120.000 fps. Los vídeos son grabados alrededor de 1000 imágenes por segundo (fps de aquí en adelante), por lo que nuestra cámara soporta estos requisitos sobradamente.

Se utiliza un trípode para la sujeción de la cámara, mediante el cual podemos ajustar la altura e inclinación de la misma. Además, para poder adecuar la grabación a las condiciones de nuestro vídeo, tenemos a nuestra disposición diversos tipos de objetivos y filtros.

La cámara de alta velocidad requiere el uso de un ordenador para poder operar con ella. El software usado para trabajar con la videocámara es PFV4 (Photron FASTCAM Viewer) desde el cual se eligen las opciones de grabado adecuadas (Figura 2.42)

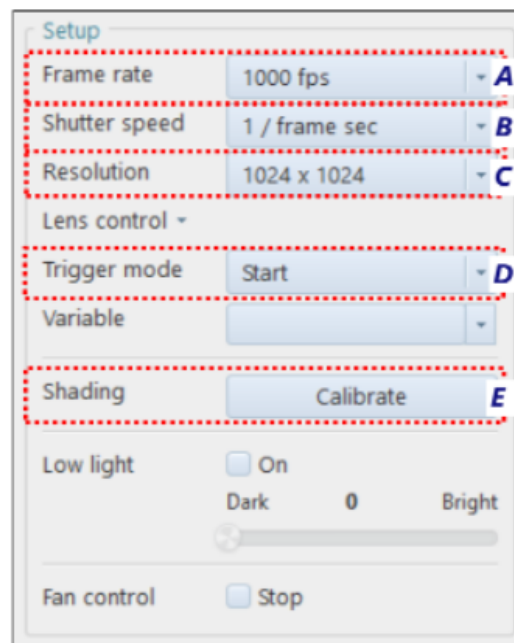


Figura 2.42. Configuración de las condiciones de grabación

Para maximizar la alta calidad de imagen del sistema, es necesario corregir la falta de uniformidad en cada píxel que es inherente al sensor de imagen mediante la opción de calibración (Figura 2.42.E) para poner a cero la señal oscura para todos los píxeles, y hacer posible una salida de imagen fiel para el nivel de luz de entrada. Por eso se calibra con la tapa de la cámara puesta.

Para nuestras grabaciones los valores más adecuados son:

A - Frame rate: Velocidad de fotogramas entre 1500 fps y 500 fps.

B - Shutter speed: Entre 1/2000 sec y 1/9000 sec. Es la velocidad de obturación, que dependerá de la luz.

C - Resolution: 1024 x 1024

D - Trigger mode: Start. Modo de disparo en el que la grabación comienza en el instante en que se inicia el disparo, la escena se graba hasta que la memoria está llena y luego finaliza la grabación. Es apropiado para tomar imágenes de fenómenos de alta velocidad cuando se sabe de antemano lo que sucederá y cuándo sucederá.

Cuanto más se aumenta la velocidad de fotogramas (fps) o la velocidad de obturación de la cámara, más disminuye la cantidad de luz que entra en la cámara, lo que oscurece la imagen que se muestra, por lo que se necesita un sistema de iluminación. En concreto, en este trabajo se usa la técnica de “Backlighting”, es decir, se coloca una fuente luminosa enfrentada a la cámara, quedando el objeto de interés entre ambos. Para ello, se usó un panel de LEDs, de forma que no se emite calor al experimento (ver Figura 2.43). Dicho panel se dispuso en un trípode para así poder situar la luz a la altura deseada. Además, mediante un potenciómetro, es posible aumentar o disminuir la intensidad de la luz según nuestras necesidades.

Para que la luz del foco se distribuya homogéneamente en toda la superficie de grabación disponemos de un difusor, una lámina de papel translúcida colocada en la pared exterior del túnel de viento, junto a la zona donde se colocará la plataforma con las semillas. Esto ayudará a que el fondo de las imágenes sea uniforme.

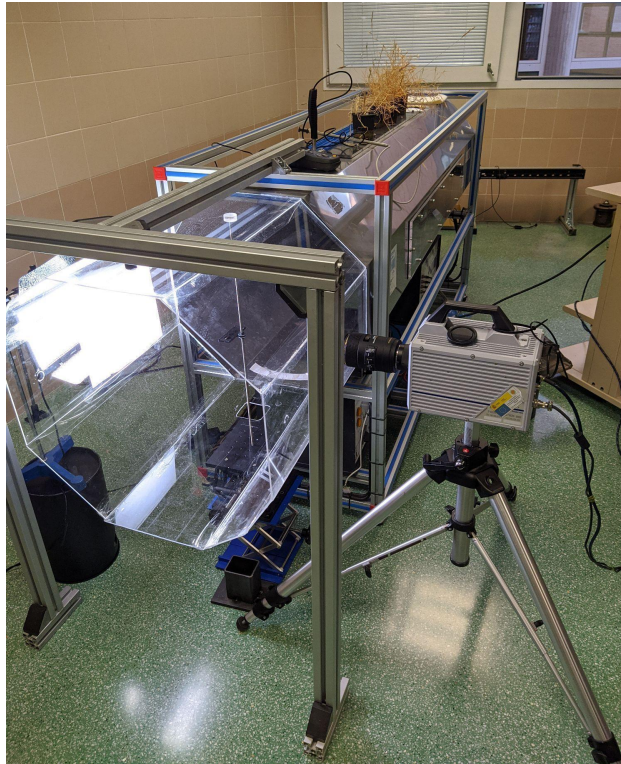


Figura 2.43. Sistema final de grabación del túnel de viento

Para tener una definición de distancia en las imágenes se coloca una regla en el punto de enfoque y de forma paralela a la plataforma (Figura 2.44)



Figura 2.44. Foto tomada con la cámara de alta velocidad de la plataforma en el túnel de viento con una semilla de Brachypodium y en la que se aprecia la escala de medida.

2.4 Generación de las superficies que emulan el sustrato

Para la variación de rugosidad de la superficie del suelo de la semilla son creadas plataformas con distintas geometrías mediante impresión 3D de plástico, así como un soporte de sujeción de las distintas plataformas (figura 2.45) La hendidura del soporte es de 25 x 75 x 1 mm, por lo que las plataformas constan de estas dimensiones. Todas impresas con altura de capa 0.2 mm.

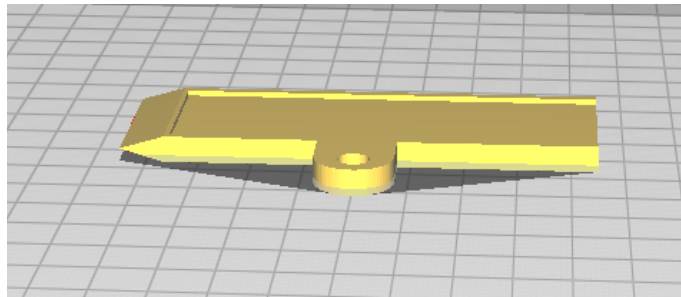


Figura 2.45. Previsualización en el software Ultimaker Cura del soporte para las plataformas.

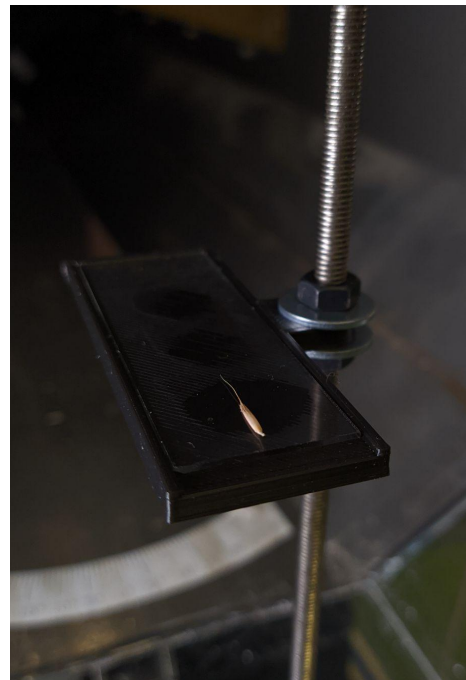
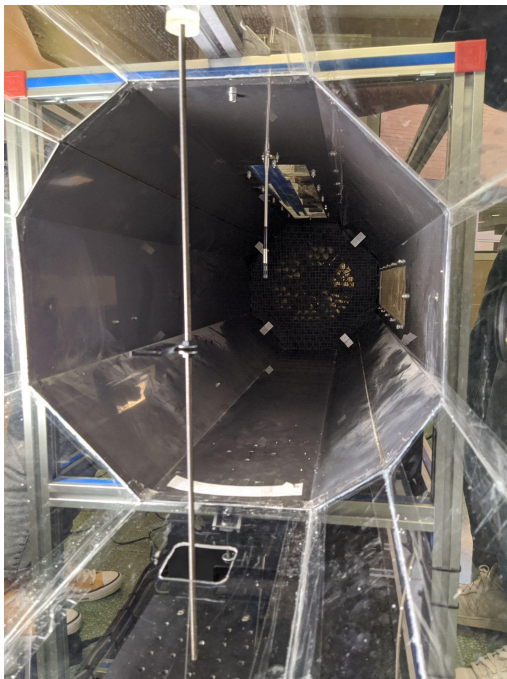


Figura 2.46. A la izquierda sistema sujeción plataforma en el túnel de viento. A la derecha zoom del soporte usando un cristal (superficie lisa) como plataforma.

En un primer intento, utilizamos la geometría de un rectángulo de estas dimensiones variando la cantidad y tipo de relleno: relleno del 80% en zigzag (Placa A) relleno del 60% en zigzag (Placa C), y relleno del 40% rectilíneo (Placa B) (figura 2.47) Pero tras la realización de experimentos nos damos cuenta que este tipo de plataformas no constan de gran diferencia en cuanto a rugosidad.

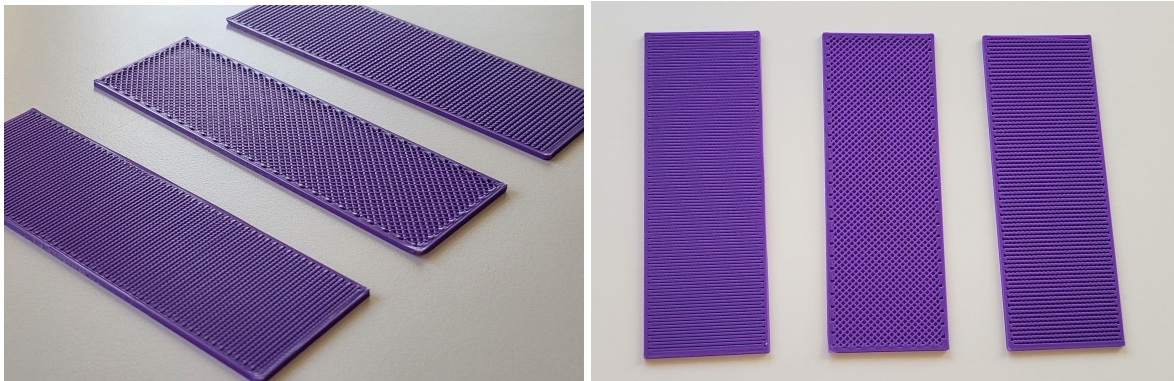


Figura 2.47. Placas A, B y C.

Con lo cual decidimos variar la geometría de las placas directamente y mantener constantes los parámetros de impresión por la falta de control del propio proceso, usando un relleno rectilíneo del 70% (figura 2.48). Las dimensiones de altura y ancho de la rugosidad de estas placas pueden observarse en la figura 2.52.

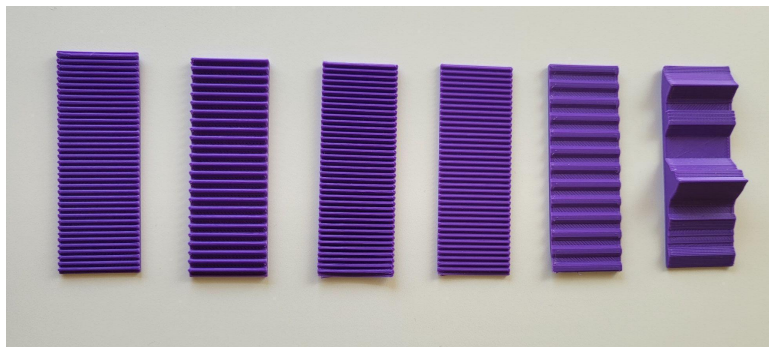


Figura 2.48. Placas 1-6 con variación de geometrías.

La rugosidad de una superficie es una característica mensurable, con base en las desviaciones de la rugosidad. La medida que se emplea más comúnmente para la textura de una superficie es la rugosidad. Por lo general, la rugosidad superficial se describe mediante dos métodos. El valor medio aritmético (R_a) se basa en el

esquema de una superficie rugosa, como se muestra en la figura 2.49. Se define como:

$$R_a = \frac{a + b + c + d + \dots}{n}$$

Ecuación 2.2. Valor medio aritmético (R_a) (Kalpakjian, S. y Schmid, S. 2008).

en donde todas las ordenadas $a, b, c, \dots$, son valores absolutos y n es la cantidad de lecturas.

Una alternativa, que en ocasiones se utiliza en Estados Unidos, es el promedio según la raíz media cuadrática (RMS), que es la raíz cuadrada de la media de las desviaciones elevadas al cuadrado sobre la longitud de medición, ecuación 2.3.

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}{n}}$$

Ecuación 2.3. Raíz media cuadrática (RMS) (Kalpakjian, S. y Schmid, S. 2008).

También se puede utilizar la altura máxima de rugosidad (R_t), que se define como la altura de la depresión más profunda hasta la cresta más elevada.

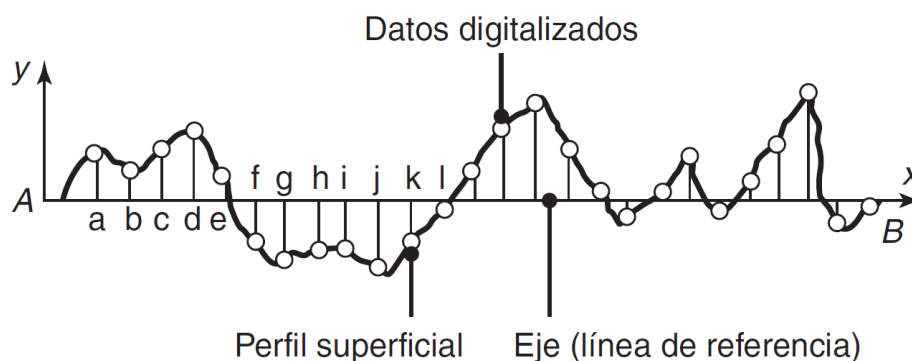


Figura 2.49. Coordenadas utilizadas para medir la rugosidad superficial empleando las ecuaciones 2.2 y 2.3. (Kalpakjian, S. y Schmid, S. 2008)

Debido a su simplicidad, el valor medio aritmético (R_a) se adoptó internacionalmente a mediados de la década de 1950 y su uso es amplio en la práctica de ingeniería. En general, una superficie no se puede describir sólo por su valor R_a o RMS, ya que estos valores son promedios. Dos superficies pueden tener el mismo valor de rugosidad, pero contar con una topografía real muy diferente.

La rugosidad de la superficie tiene la misma clase de deficiencias que cualquier medida que se use para evaluar un atributo físico complejo. Por ejemplo, falla para tomar en cuenta las orientaciones del patrón superficial; así, la rugosidad de superficie varía en forma significativa, en función de la dirección en la que se mida.

Usualmente, se utilizan instrumentos conocidos como rugosímetros superficiales para medir y registrar la rugosidad superficial. Normalmente, las unidades utilizadas para la rugosidad superficial son μm (micras). Se utiliza en nuestro caso un rugosímetro Mituyoyo SJ-210 (figura 2.51) de medición por contacto. Usando un bloque “v”, una pieza de amarre, y un patrón de calibración de rugosidad. Sin embargo, las pruebas no son concluyentes, con lo cual se omiten los resultados obtenidos y nos centramos en los valores de altura y ancho de rugosidad.

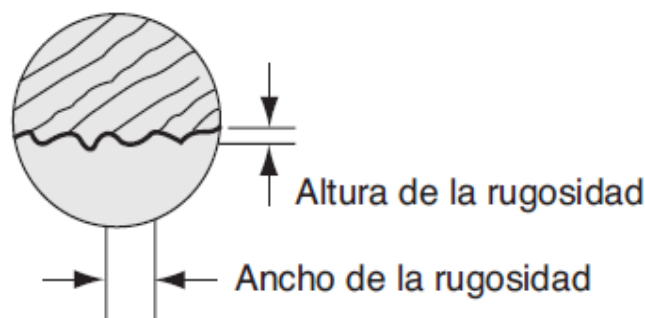


Figura 2.50. Boceto de la altura y el ancho de rugosidad de una superficie.

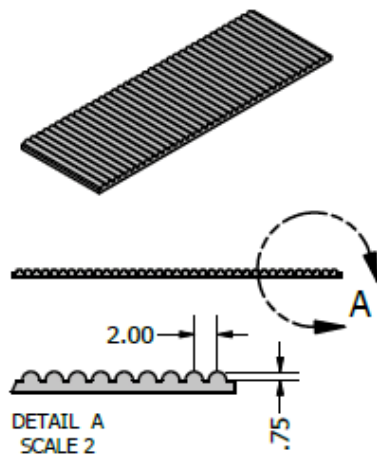


Figura 2.51. Rugosímetro Mituyoyo.

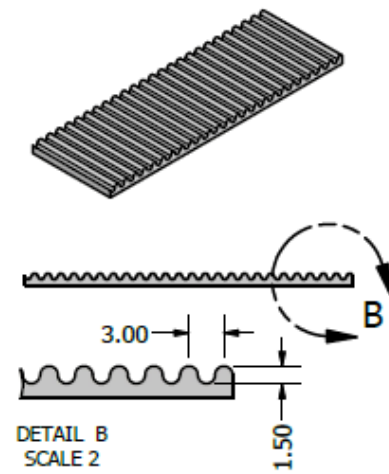
Superficie	Abrev.	Altura rugosidad (ϵ , mm)	Ancho rugosidad (L, mm)	Ancho/Altura
Superficie lisa	S0	0	0	0
Placa A,B y C	SA, SB, SC	~ 0	~ 0	0
Placa 1	S1	0.75	2	2.66
Placa 2	S2	1.5	3	2
Placa 3	S3	1	6	6
Placa 4	S4	1	2	2
Placa 5	S5	2	2	1
Placa 6*	S6	9.08	12.98	1.43

Tabla 2.11. Datos de altura y ancho de la rugosidad de las diferentes placas utilizadas, así como su relación.

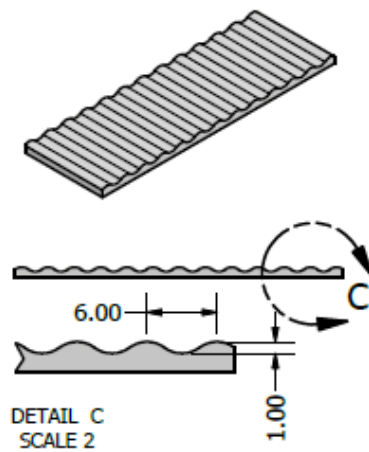
Placa 1:



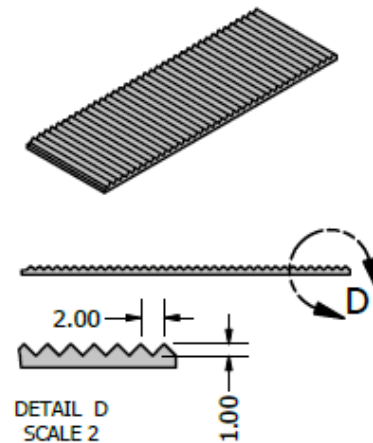
Placa 2:



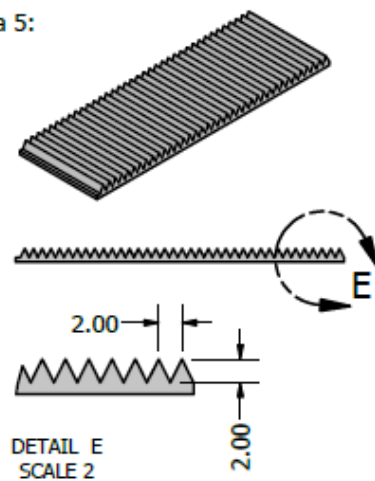
Placa 3:



Placa 4:



Placa 5:



Placa 6:

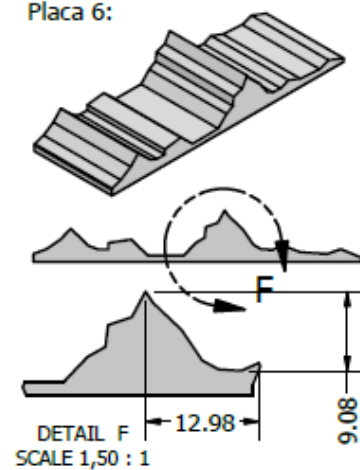


Figura 2.52. Planos de las placas 1 a 6. Indicadas la altura y el ancho de la rugosidad en mm.

Como se vio en el apartado 1.3. Vogel, S. 1994 establece 3 configuraciones de vorticidad diferentes dependiendo de la geometría de las ranuras de la superficie (Figura 1.10 Diferentes geometrías de paredes ranuradas) Cuando los números de Reynolds son bajos, la rugosidad tiene poca importancia. Sin embargo, cuando tenemos números altos nos encontramos con diversos casos. Con los datos de la Tabla 2.11. ancho y altura de profundidad es posible establecer esta división en nuestras superficies:

1) Flujo independiente: Si los bultos individuales están bien espaciados, sus alturas son mucho menores que las distancias entre ellos, entonces cada uno actúa independientemente. Se crean vórtices de recirculación estables que aíslan el flujo exterior de la rugosidad.

Es decir, cuando el ancho de la rugosidad es mucho mayor que el alto: **S3**.

2) Flujo interactivo: las paredes con ranuras más anchas, con un espacio ligeramente mayor que su altura, se crean burbujas de recirculación que se vuelven a unir antes de la siguiente ranura, exponiéndola al flujo exterior.

Cuando el ancho de la rugosidad es mayor que el alto: **S1, S2 y S4**. Ordenadas de mayor a menor diferencia.

S6 podría incluirse en este grupo a pesar de ser asimétrica.

3) Skimming flow: flujo reptante. Cuando se cubre más de una doceava parte de la superficie, los remolinos no penetran bien y se obtiene lo que se denomina “skimming flow” con vórtices estables en los intersticios (Jumars y Nowell 1984)

Ancho de la rugosidad $\approx$ altura de la rugosidad: **S5**.

3. RESULTADOS

3.1 Velocidad crítica y distancia de dispersión

Denominamos velocidad crítica v_c , a la velocidad mínima del viento necesaria para el despegue de las semillas. En la primera parte de los ensayos en el túnel de viento, se realizan experimentos para analizar con detalle la velocidad mínima del viento necesaria para el despegue de las semillas, así como en el caso afirmativo de despegue su distancia asociada de dispersión. Además, se calculan los números adimensionales relacionados con esta velocidad: Reynolds y Froude, y los relacionados con las superficies que emulan el sustrato: rugosidades relativas. Se agrupan los resultados dependiendo si la semilla consta o no de estructura de vuelo.

En un principio se hacen mediciones con y sin malla metálica en el acondicionador de flujo para ver qué condiciones de turbulencia son las más adecuadas para el despegue. Obteniendo que sin malla metálica al tener más turbulencia obtendremos que despegarán más semillas, objeto de atención, con lo cual todos los experimentos serán realizados sin malla metálica.

3.1.1 Semillas sin estructura de vuelo: *Arabidopsis thaliana*, *Ononix natrix* y *Urtica dioica*.

Para las semillas sin estructura de vuelo encontramos resultados bastante similares:

- ***Arabidopsis thaliana***

En el apartado 2.2.1 hemos visto como las semillas de *Arabidopsis* constan de una estructura bastante simple, por eso suelen germinar cerca de la planta de origen ya que no tienen sistemas sofisticados de dispersión.

En nuestros experimentos hemos obtenido que las pocas veces que consigue volar es cuando no hay malla metálica, con lo cual hay más turbulencia. Asimismo, cuando se le aplican rachas de viento, es decir, un aumento brusco del viento con

respecto a su velocidad media tomada en un cierto intervalo de tiempo, que va seguida de un descenso en el viento. Siendo el Reynolds crítico de 209 ± 15 y el Froude crítico 83 ± 6 .

- **Ononix natrux**

Esta semilla no vuela, indiferentemente de las condiciones usadas. Tiene sentido pues como vimos en el apartado 2.2.2. su dispersión se basa en insectos polinizadores gracias a su olor.

- **Urtica dioica**

De las 3 especies de semillas sin estructura de vuelo es la única que consigue despegar. Aun así, este tipo de semillas no están hechas para volar. Las especies que peor se adaptan al cambio climático buscan desarrollar un mecanismo para mudarse de clima, es por eso que las ortigas comunes que se encuentran en el campo al no sufrir, con un simple golpe las semillas caen al suelo.

Para los experimentos en superficie lisa de 10 mediciones (ver Anexo III) 6 no consigue volar y 4 sí, con valores entre 3,15 - 4,32 m/s. Sin embargo, para el resto de superficies no logra despegar, exceptuando la placa 6 donde tuvo una velocidad crítica media de 5,75 m/s.

Aquí se puede ver el primer ejemplo donde a mayor rugosidad, más tiempo permanecerá la semilla en la superficie y por tanto más tarde sucederá el despegue, obteniendo una velocidad crítica mayor: aumenta de 3,7 m/s en superficie lisa a 5,8 m/s en superficie 6.

La placa 6 imita un suelo rugoso, con distintas pendientes y alturas, completamente asimétrica y diferente al resto de placas. Con el análisis llevado a cabo en el apartado 2.4. vimos cómo existen 3 configuraciones de vorticidad diferentes dependiendo de la geometría de las ranuras de la superficie. En el caso de la placa 6, se podría considerar dentro del grupo de flujo interactivo, al ser el ancho de rugosidad mayor que el alto en la mayoría de la placa, con lo cual se

deben de crear burbujas de recirculación que se vuelven a unir antes de la siguiente ranura, exponiéndola al flujo exterior. Nos dimos cuenta de que se crean vórtices cerca del suelo que ayudan a la semilla a alzar el vuelo.

Conseguimos grabar el despegue de la *Urtica dioica* en superficie lisa cuando despegó a 4,28 y 4,32 m/s (Figura 3.2 y 3.3 respectivamente) Así como en la placa 6 cuando despegó a 4,6 y 6,2 m/s (Figura 3.4 y 3.5 respectivamente). Para el despegue de *Urtica dioica* con su mayor velocidad crítica de 6,2 m/s en la placa 6, la semilla alcanzó una distancia de 75 cm. A diferencia del siguiente ensayo a 6,2 m/s donde la semilla alcanzó una distancia de 85 cm. Esto se debe a que quedó más tiempo rodando sobre sí misma en la placa, con lo cual cuando decide despegar logró una mayor distancia.

Obteniendo Reynolds y Froude de 471 ± 82 y 28 ± 5 en superficie lisa, respectivamente. Mientras en la placa 6 aumentan a 732 ± 101 y 43 ± 6 , respectivamente.

Especie	D (mm)	Superficie	ε/D	L/D	vc (m/s)	Re crítico	Fr crítico
Arabidopsis thaliana	0,51 ± 0,03	S0, SA	<<1	<<1	5,9 ± 0,3	209±15	83±6
Ononix natrix	1,47 ± 0,02	S0	<<1	<<1	NA	NA	NA
		SA,SB,SC,S1,S2,S3,S4,S5,S6	NA	NA	NA		
Urtica dioica	1,8 ± 0,1	S0	<<1	<<1	3,7 ± 0,7	471±82	28±5
		SA,SB,SC,S1,S2,S3,S4,S5	NA	NA	NA	NA	NA
		S6	4,98	7,12	5,8 ± 0,8	732±101	43±6
*NA. Para las que no vuelan significa que al 100% de la potencia del ventilador no han conseguido despegar.							

Tabla 3.1. Resultados de la velocidad crítica y números adimensionales de las especies *Arabidopsis thaliana*, *Ononix natrix* y *Urtica dioica* (Ver Anexo III para más detalle).

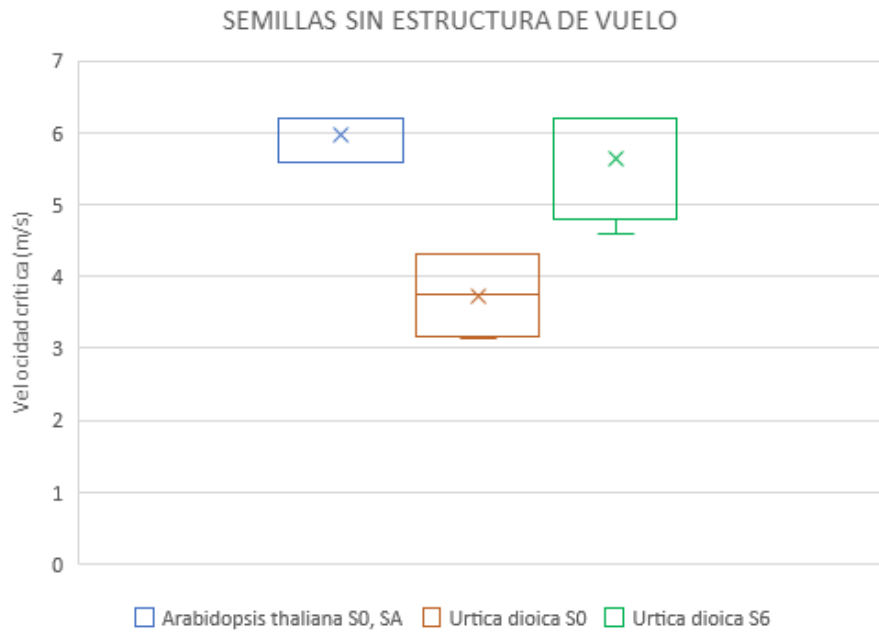


Figura 3.1. Diagrama de cajas y bigotes para las semillas sin estructura de vuelo que consiguen abandonar la plataforma. Velocidad crítica (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).

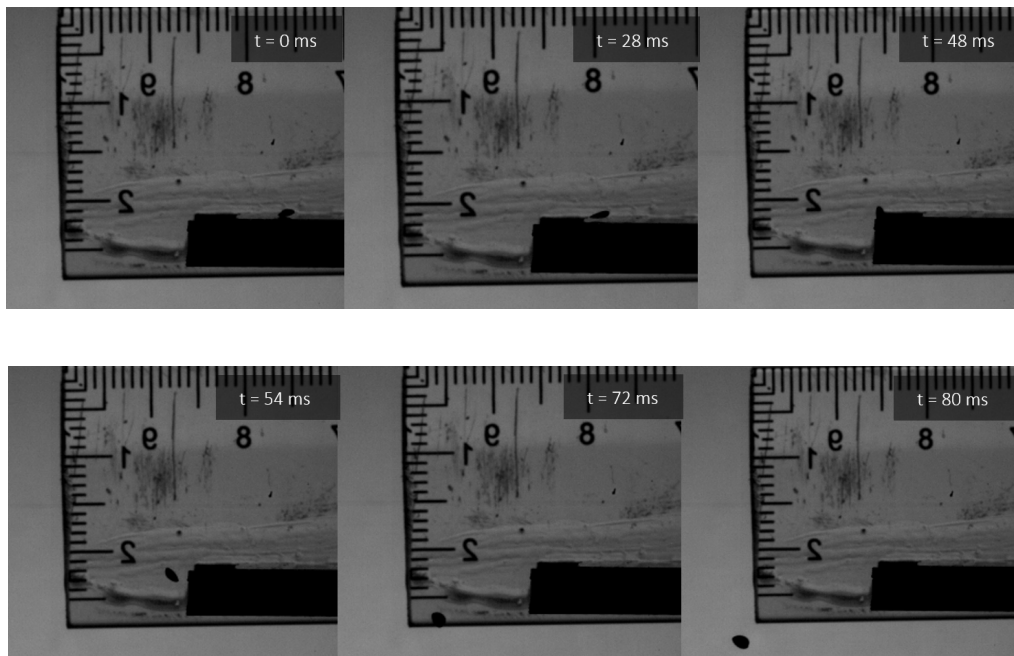


Figura 3.2. Despegue *Urtica dioica* a 4,28 m/s en superficie lisa. Se observa como la semilla rueda hasta el final de la plataforma, incluso una vez abandona la plataforma sigue girando en el aire

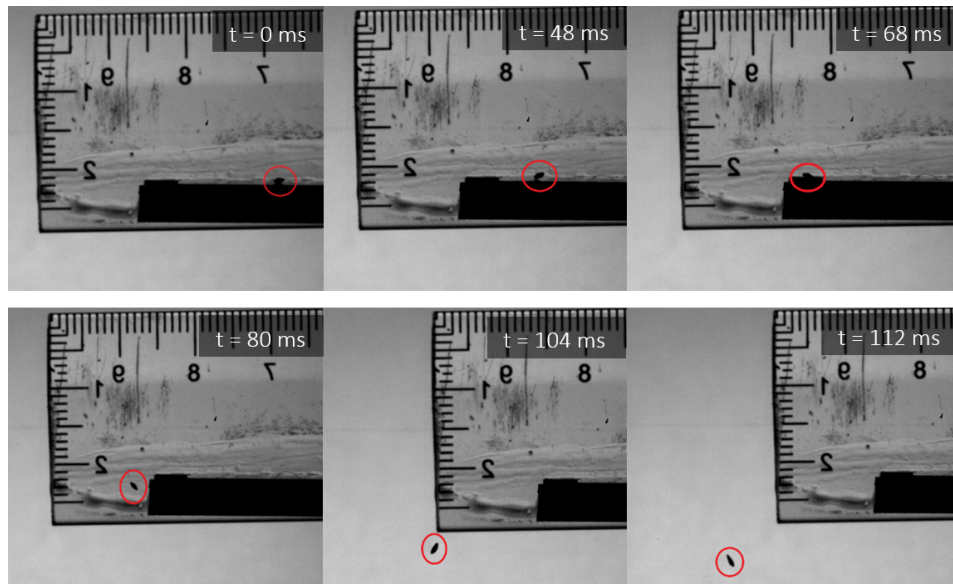


Figura 3.3. Despegue *Urtica dioica* a 4,32 m/s en superficie lisa. Se observa como la semilla rueda desde su posición inicial hasta el final de la placa.

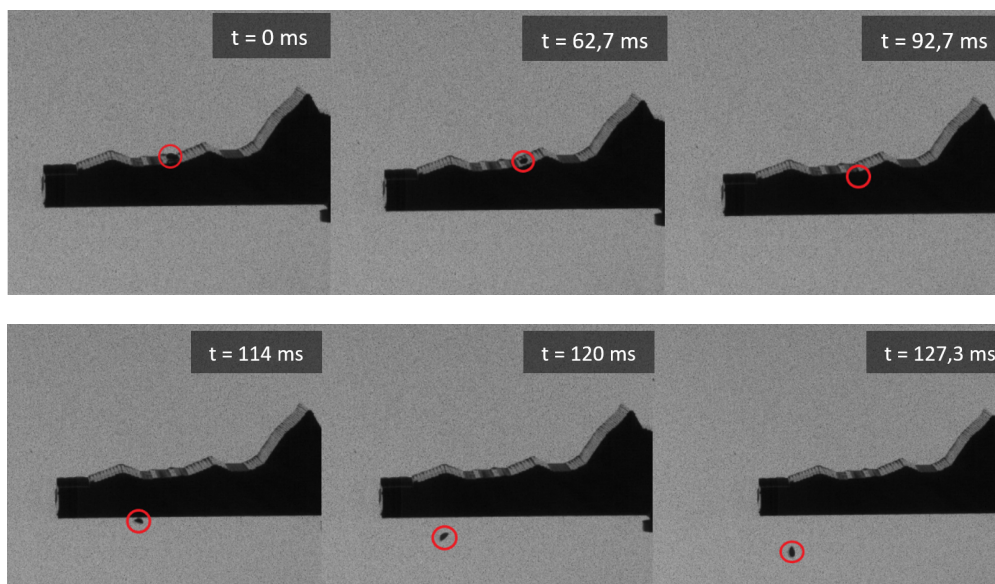


Figura 3.4. Despegue *Urtica dioica* a 4,6 m/s en placa 6 (En los 4 ensayos realizados para estas condiciones, la semilla se colocó en el mismo sitio, ya que al ser esta geometría tan asimétrica dependerá mucho de la posición el vuelo) La semilla rueda hacia atrás, hasta chocar con una de las pendientes e iniciar el despegue por uno de los laterales de la plataforma.

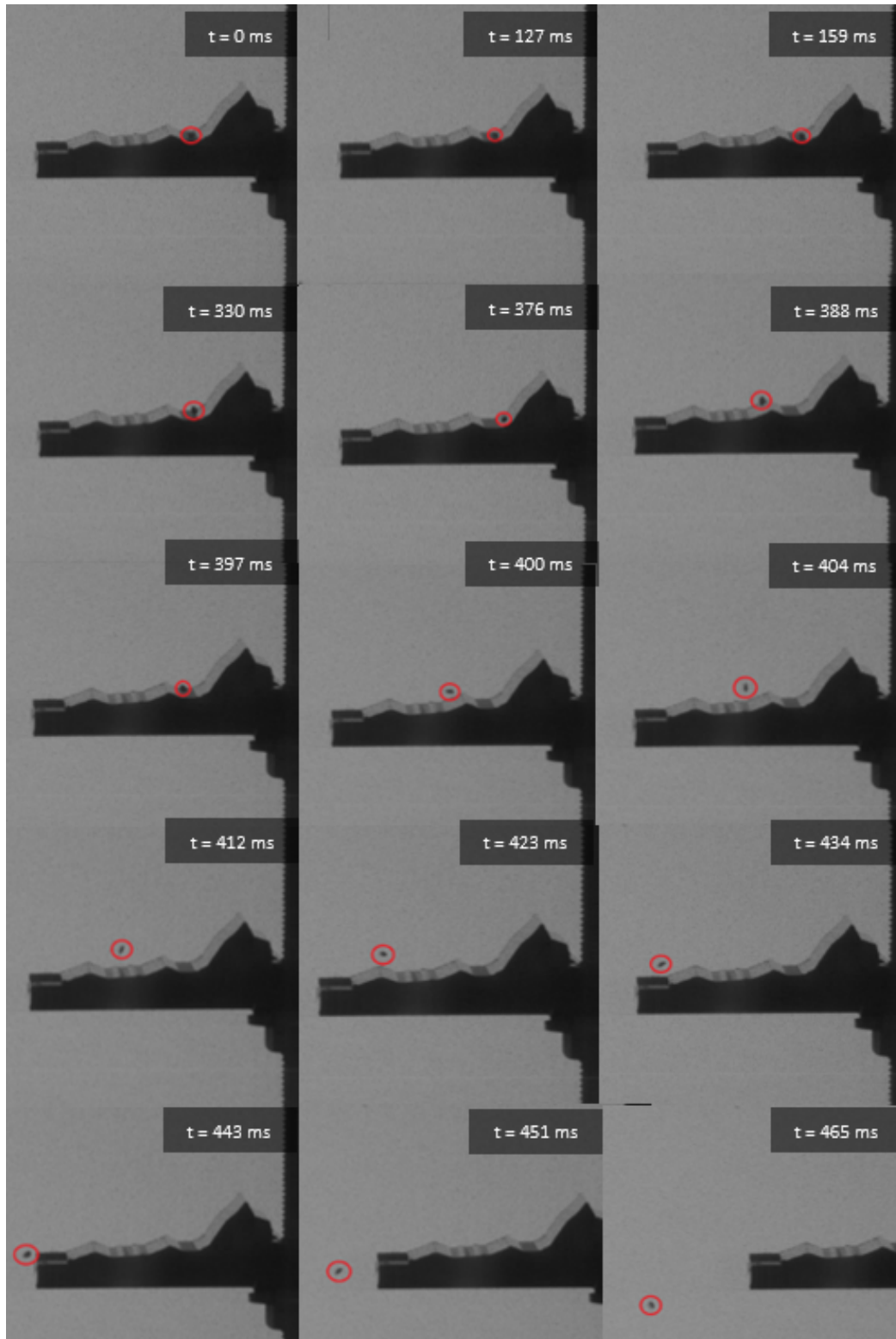


Figura 3.5. Despegue *Urtica dioica* con 6,2 m/s en placa 6, distancia recorrida 85 cm.

3.1.2. Semillas con estructura de vuelo: *Thymus vulgaris*, *Taraxacum officinale*, *Brachypodium distachyon* y *Brachypodium stacei*.

Para las semillas con estructura de vuelo encontramos resultados bastante diversos, probablemente debido a la gran variedad de morfologías de la propia semilla, así como de su estructura de vuelo.

- *Thymus vulgaris*

Es un caso intermedio de semilla con estructura de vuelo. Aunque consta de estructura de vuelo no llega a reorientarse como lo harán las demás semillas, probablemente al constar siempre de 5 filamentos, y estar distribuidos de una manera bastante equilibrada. Los resultados de los ensayos individuales se pueden consultar en el Anexo III.

De la tabla 3.2. correspondiente a los resultados de los experimentos del *Thymus* se puede apreciar como en base a la media obtenida en cada superficie, se alcanzaron resultados de entre 62 - 80 cm para las distancias de dispersión y de entre 2,3 - 2,8 m/s para la velocidad crítica. Sin embargo, basándonos en todas las medidas realizadas, ver Anexo III, se obtuvo un rango de entre 40 - 120 cm para la distancia de dispersión y de entre 2 - 3,2 m/s para la velocidad crítica. Esta variación en los resultados se debe a los picos, es decir, valores fuera de la media. Por ejemplo, en el ensayo con superficie lisa hay dos picos en la medición número 8 y 10, donde la velocidad de despegue es más alta de lo normal 2,6 m/s y 2,7 m/s respectivamente, dando por tanto lugar a una distancia de dispersión más larga de lo normal, 80 y 100 respectivamente. Al igual el máximo de 120 cm para la distancia de dispersión se trata de otro pico en el ensayo usando la placa A, medición número 5, velocidad crítica 3,12 m/s, la más alta de las de todas las mediciones de esta rugosidad.

Estos mismos datos de la tabla 3.2 son representados en un diagrama de cajas y bigotes (figuras 3.6 y 3.7) para proporcionar un resumen visual de los datos, identificando rápidamente los valores medios, así como la dispersión del conjunto de datos, incluidos los signos de asimetría. Podemos observar cómo mientras más

tarda en despegar la semilla, más lejos aterrizará también. Obteniéndose las mayores velocidades medias, así como la distancia de dispersión en las superficies S4, SB y SA, y la menor velocidad crítica al igual que la distancia de dispersión en S0 como era de esperar.

Respecto a la rugosidad, vemos como a menor rugosidad a menor velocidad se realiza el vuelo, aunque también implica menor distancia recorrida por la semilla. En el caso de la placa S3 y S4, ambas con la misma altura de rugosidad, 1 mm, pero diferente ancho de rugosidad, 6 y 2 mm, respectivamente, vemos como los resultados difieren ligeramente. Este cambio de ancho hace que el flujo pase de ser independiente en la placa 3, a ser interactivo en la placa 4. En el flujo independiente se aísla el flujo exterior de la superficie mientras en el interactivo sí se expone. Obteniendo valores mayores de velocidad crítica en S4, en concreto el valor máximo de velocidad de todos los ensayos llevados a cabo para la especie.

Se obtienen números de Reynolds entre [317 - 379] y números de Froude entre [17 - 20] dependiendo de la rugosidad utilizada.

Especie: <i>Thymus vulgaris</i> D = Ds = 1,963 mm						
Superficie	ϵ/D	L/D	vc (m/s)	distancia dispersión (cm)	Re crítico	Fr crítico
S0	<<1	<<1	2,3 ± 0,2	62 ± 18	317 ± 28	17 ± 2
SA	<<1	<<1	2,7 ± 0,2	76 ± 22	364 ± 33	19 ± 2
SB	<<1	<<1	2,7 ± 0,7	80 ± 28	364 ± 96	19 ± 5
S3	0,51	3,06	2,5 ± 0,3	67 ± 16	334 ± 38	18 ± 2
S4	0,51	1,02	2,8 ± 0,1	75 ± 7	379 ± 17	20 ± 1

Tabla 3.2. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de la semilla *Thymus vulgaris*.

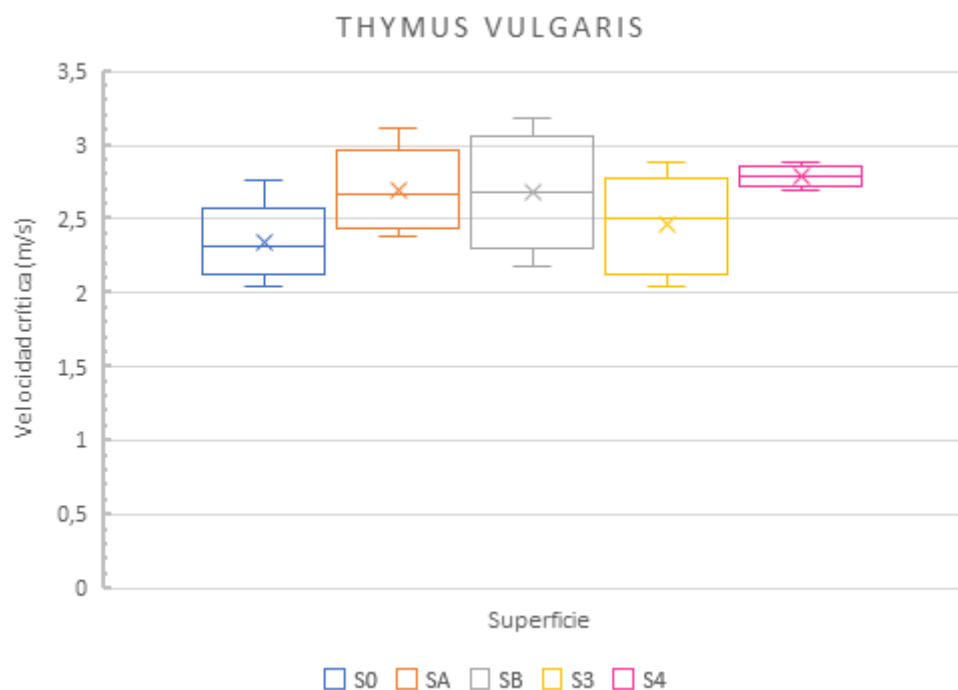


Figura 3.6. Diagrama de cajas y bigotes para Thymus vulgaris. Velocidad crítica (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).

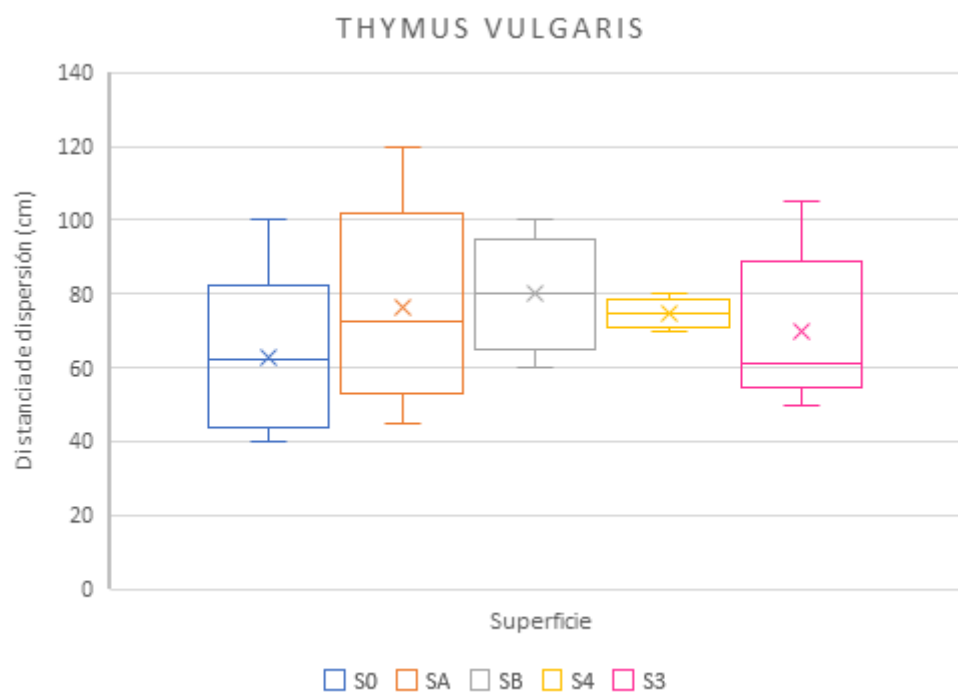


Figura 3.7. Diagrama de cajas y bigotes para Thymus vulgaris. Distancia de dispersión (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).

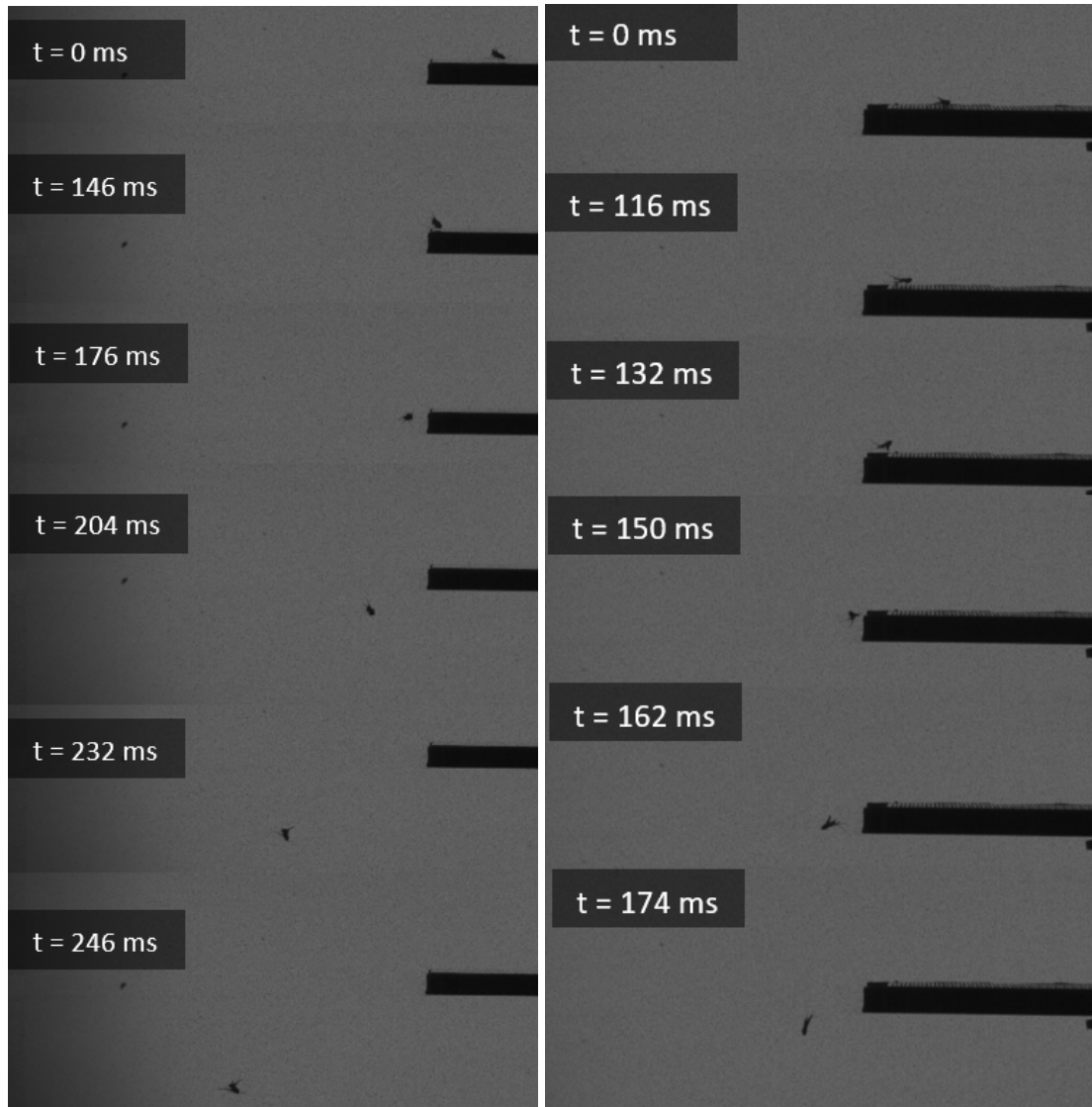


Figura 3.8. Despegue *Thymus vulgaris* en superficie lisa a la izquierda y en rugosidad A a la derecha. En ambos ensayos se observa como la semilla rueda desde su posición inicial hasta el final de la placa, siguiendo prácticamente la misma trayectoria.

La orientación de la semilla es incluida como una variable más en los experimentos de las especies *Taraxacum officinale* y *Brachypodium* que al constar de una estructura de vuelo y además no ser circulares, las semillas se reorientarán (ángulo de ataque definido en el apartado 1.5)

- *Taraxacum officinale*

De las primeras medidas realizadas en superficie lisa variando los ángulos de ataque, para $\beta = 180^\circ$ por lo general intenta ponerse con la orientación de $\beta = 0^\circ$ (figura 3.14) aunque hay un par de casos en los que la semilla no se reorienta (figura 3.15). Para los demás casos de $\beta = 45^\circ$, 135° y 90° , la semilla vuelve a reorientarse hasta $\beta = 0^\circ$ (figura 3.16).

Podemos observar en la tabla 3.3. como para el ángulo para el que tarda más en despegar (sin considerar $\beta = 0^\circ$) es $\beta = 45^\circ$, con una media de 1,49 m/s, mientras para los demás el despegue ocurre para velocidades menores, entre 1,1 - 1,24 m/s. Otra orientación con la que despegaba antes es la de $\beta = 135^\circ$ con 1,08 m/s de media. El ángulo de ataque de $\beta = 90^\circ$ es el más inestable de todos encontrando en sus ensayos el mínimo y máximo de velocidad mínima del viento para el despegue de todos los ensayos realizados. Ver figura 3.9. para su diagrama de caja y bigotes correspondiente.

Especie: <i>Taraxacum officinale</i> D EV (mm) = 12,316 D fil (mm) = 0,016 Turbulencia: Con malla metálica Superficie: S0							
Orientación	vc (m/s)			Re (DEV) crítico	Fr (D EV) crítico	Re (D fil) crítico	Fr (D fil) crítico
	media	min	max				
$\beta = 180^\circ$	$1,1 \pm 0,2$	0,9	1,46	945 ± 166	$0,10 \pm 0,02$	$1,3 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,5$
$\beta = 45^\circ$	$1,49 \pm 0,09$	1,42	1,59	1268 ± 76	$0,135 \pm 0,008$	$1,68 \pm 0,10$	$3,7 \pm 0,2$
$\beta = 135^\circ$	$1,08 \pm 0,12$	0,95	1,19	914 ± 103	$0,098 \pm 0,011$	$1,21 \pm 0,14$	$2,7 \pm 0,3$
$\beta = 90^\circ$	$1,2 \pm 0,2$	0,81	1,63	1040 ± 208	$0,11 \pm 0,02$	$1,4 \pm 0,3$	$3,1 \pm 0,6$
$\beta = 0^\circ$	$2,3 \pm 0,5$	1,8	2,8	1783 ± 208	$0,19 \pm 0,05$	$2,4 \pm 0,6$	5 ± 1

Tabla 3.3. Ensayos con *Taraxacum officinale* en superficie lisa variando la orientación de la semilla.

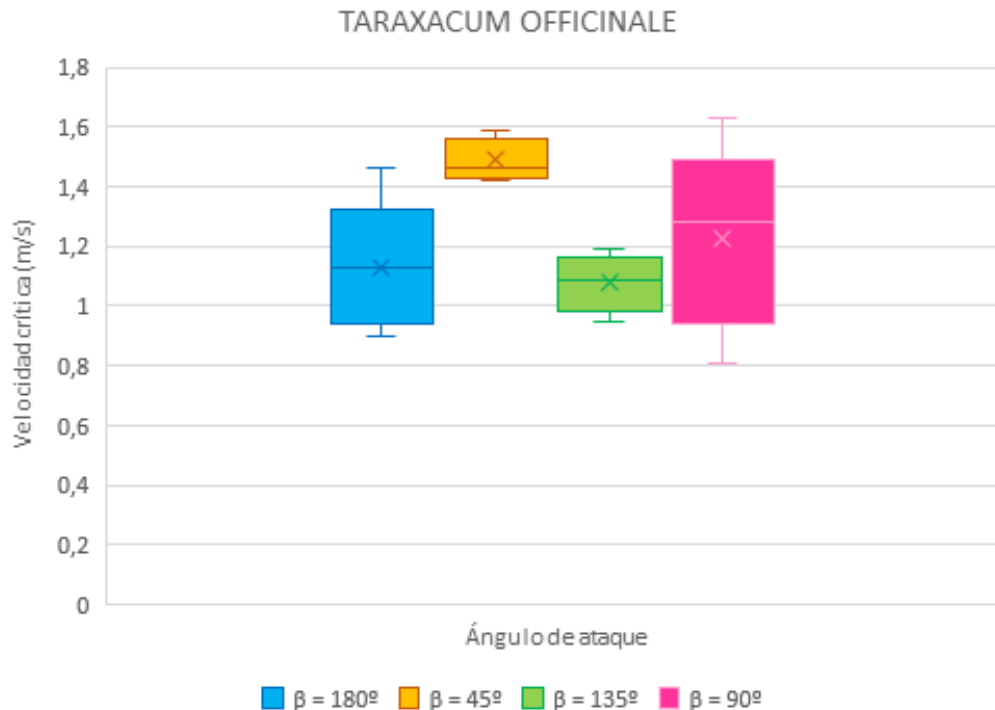


Figura 3.9. Diagrama de cajas y bigotes para *Taraxacum officinale* en superficie lisa. Ángulo de ataque en el eje x respecto velocidad crítica en el eje Y.

Se ha notado como alrededor de la velocidad de 0,9 m/s empieza a moverse la estructura de vuelo, y es sobre 1,8 m/s cuando suele despegar. En general, las semillas se alinearon con el viento a velocidades mucho más bajas que las requeridas para el despegue. Mientras más tarda en despegar más distancia recorre.

Debido a la general reorientación a $\beta = 0^\circ$ nos centraremos en esta posición, con la semilla enfrentando al viento vuela además mucho más lejos. Tiene sentido porque al tener menos superficie de contacto con el viento necesita más fuerza, pero una vez en vuelo la estructura de vuelo le ayuda a flotar con más facilidad.

Para placas con diferentes rugosidades por lo general la semilla tarda más en despegar, y, por lo tanto, alcanza distancias más largas (ver figura 3.17. ejemplo despegue *Taraxacum officinale* en placa A). Por ejemplo, en una de las mediciones de la placa A hay un pico bastante interesante en la distancia de dispersión que llega

a alcanzar 170 cm mientras la media es 102 cm. Esta distancia no está asociada con la mayor velocidad de despegue 4,5 m/s pero si con una de las mayores 4,2 m/s.

Basándonos en la media de todas las rugosidades, la placa A es la que obtiene los máximos resultados de 3,6 m/s y 102 cm. Afirmamos como los valores mínimos los obtenidos en la superficie lisa, 2,3 m/s y 82 cm (Figura 3.15 y 3.16).

Para esta especie se tienen en consideración dos diámetros característicos en cuenta para el cálculo de los números adimensionales, por un lado, el de la estructura de vuelo (D EV) y por otro el del filamento individual (D fil). En el primero se consideran las semillas como un esqueleto integral mientras que en el segundo se consideran las cerdas individualmente, se utiliza este número de Reynolds cuando se requiere analizar los efectos de baja resolución.

Con lo cual los números obtenidos para el diámetro de la estructura de vuelo, son un Reynolds de [1942 - 3061] y Froude de [7 - 10], mientras para el diámetro de un filamento individual Reynolds de [2,5 - 4] y Froude de [182 - 287]

Especie: Taraxacum officinale D EV (mm) = 12,316 D fil (mm) = 0,016 Orientación: $\beta = 0^\circ$								
Superficie	vc (m/s)			distancia dispersión (cm)	Re (DEV) crítico	Fr (D EV) crítico	Re (D fil) crítico	Fr (D fil) crítico
	media	min	max					
S0	2,3 ± 0,4	1,5	2,9	82 ± 24	1942 ± 375	7 ± 1	2,5 ± 0,5	182 ± 35
SA	3,6 ± 0,5	3,1	4,5	102 ± 33	3061 ± 422	10 ± 1	4,0 ± 0,5	287 ± 40
SB	3,3 ± 0,8	2,8	5,4	88 ± 18	2844 ± 673	10 ± 2	3,7 ± 0,9	266 ± 63
S2 *	3,2	3,2	3,2	90	2710	9	3,5	254
S3 *	3,5	3,5	3,5	85	2957	10	3,8	277
S6 *	3	3	3	70	2557	9	3,3	240

Tabla 3.4. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de la especie Taraxacum officinale para $\beta = 0^\circ$. *Resultados promedios.

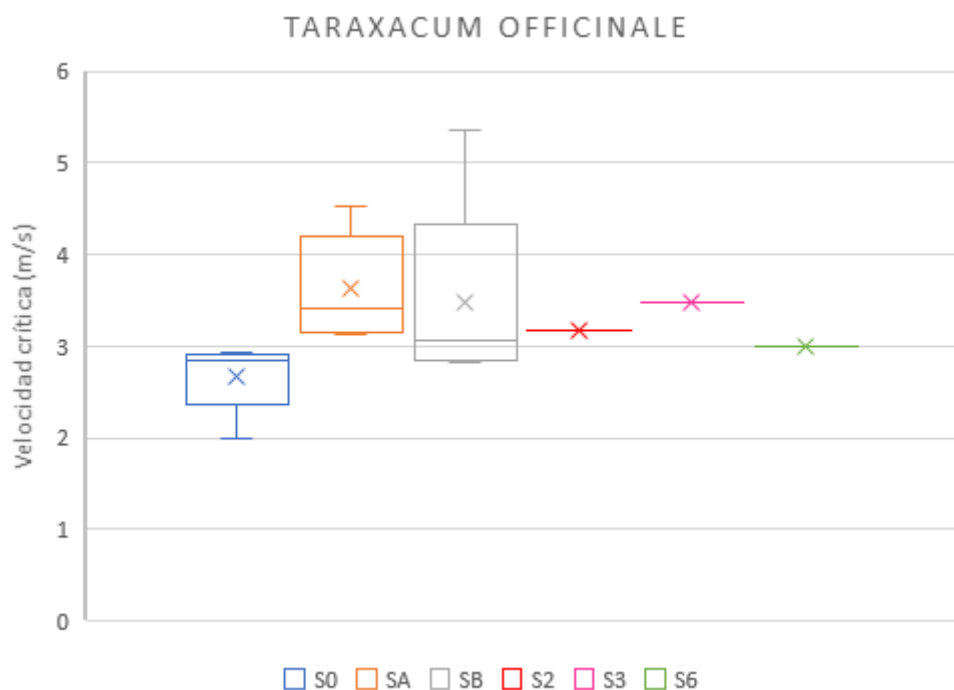


Figura 3.10. Diagrama de cajas y bigotes para Taraxacum officinale. Velocidad crítica (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).

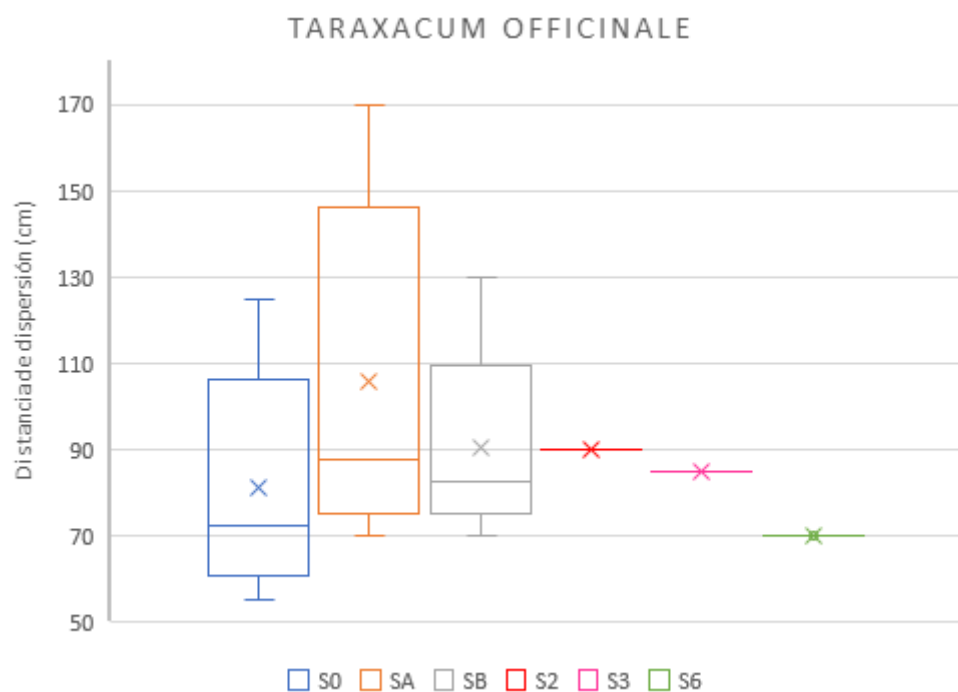


Figura 3.11. Diagrama de cajas y bigotes para Taraxacum officinale. Distancia de dispersión (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).

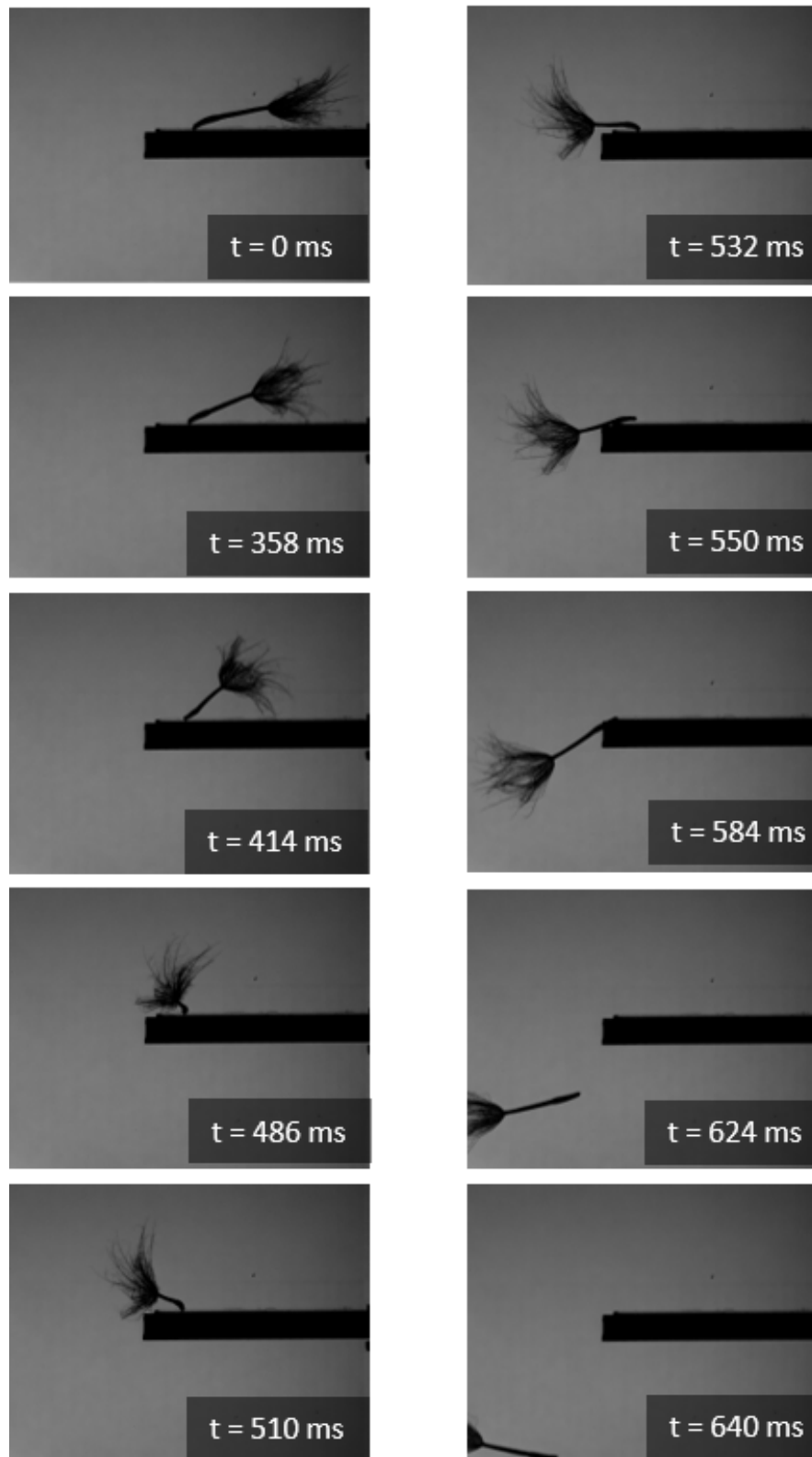


Figura 3.12. *Taraxacum officinale* $\beta = 180^\circ$ en superficie lisa. La semilla se reorienta a $\beta = 0^\circ$. Medición número 4. Velocidad crítica de 1,12 m/s (media de este tipo de ensayos).

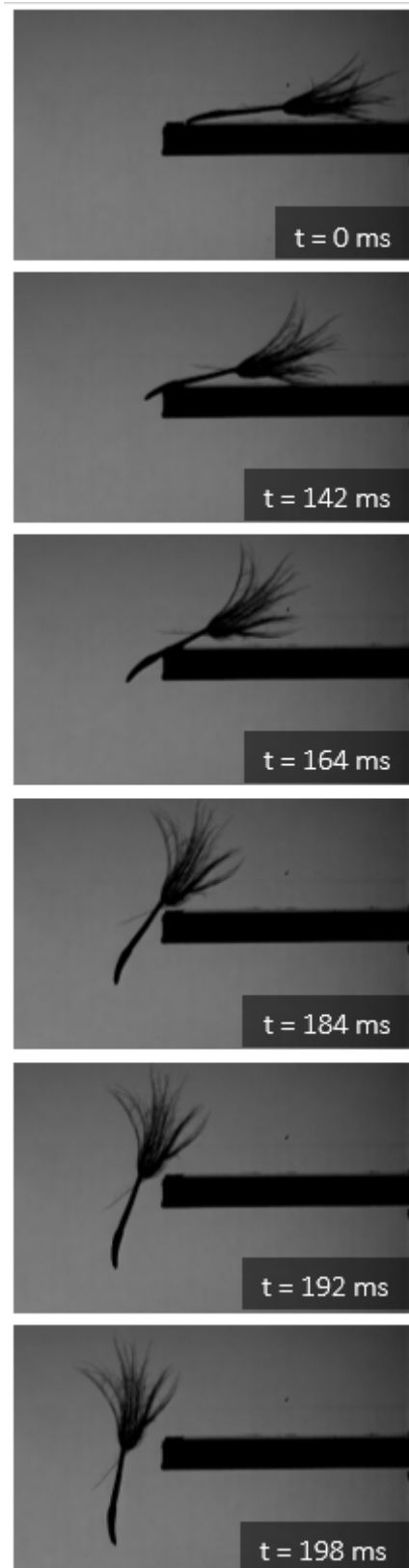


Figura 3.13. *Taraxacum officinale* $\beta = 180^\circ$ en superficie lisa. La semilla no se reorienta. Medición número 5. Velocidad crítica de 0,9 m/s (medición mínima de este tipo de ensayos).

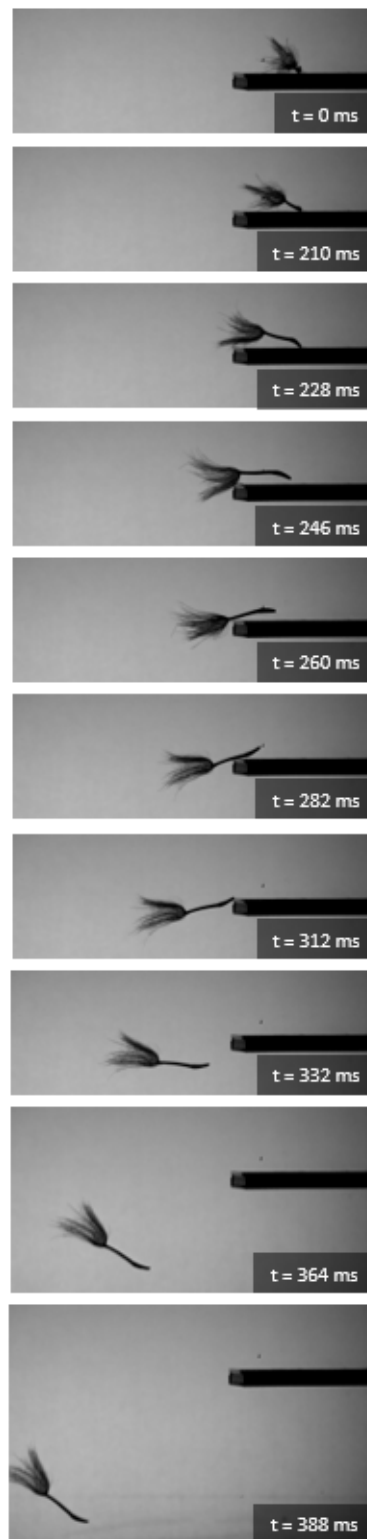


Figura 3.14. *Taraxacum officinale* $\beta = 90^\circ$ en superficie lisa. La semilla se reorienta a $\beta = 0^\circ$. Medición número 4. Velocidad crítica de 1,28 m/s.

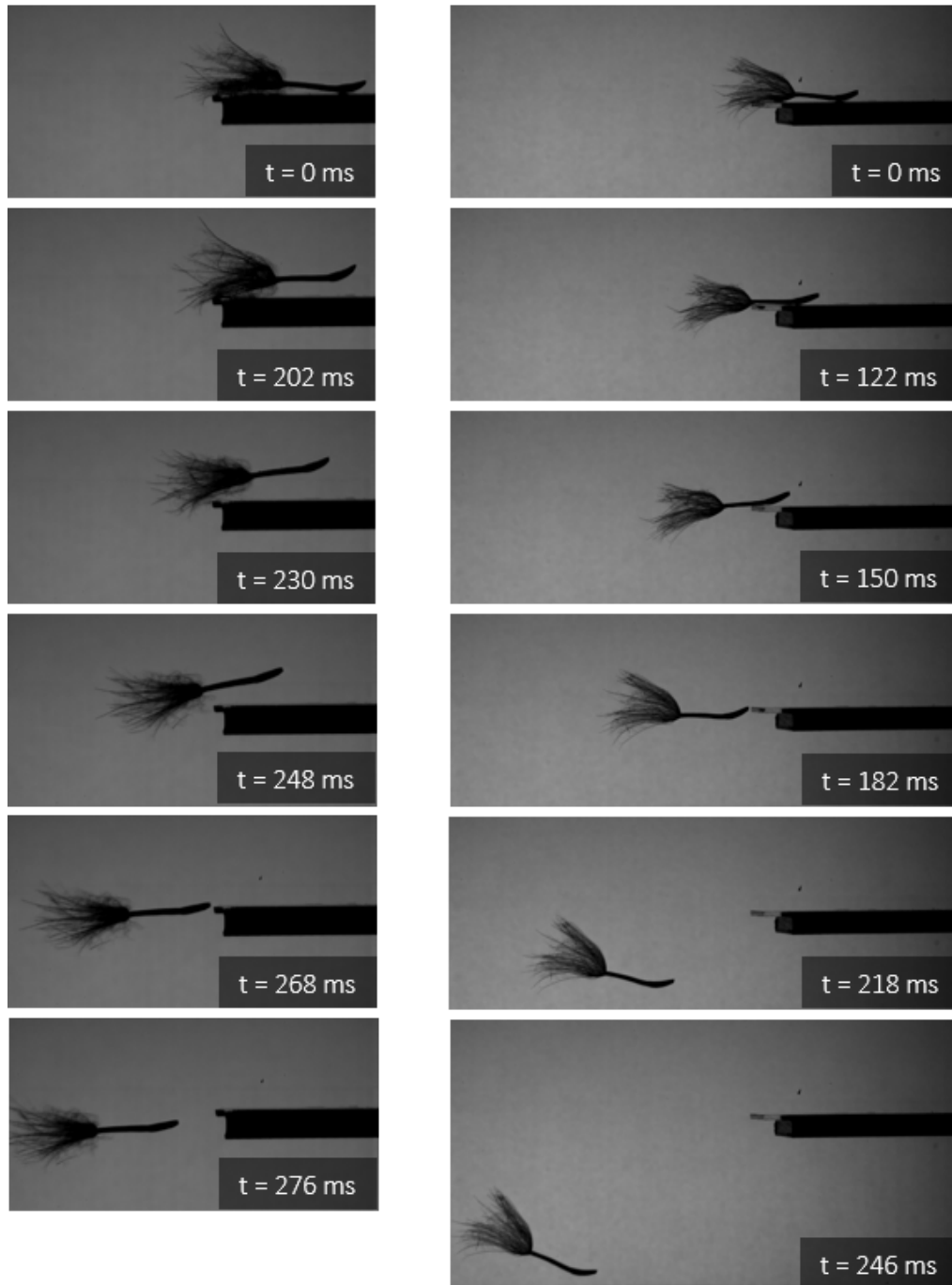


Figura 3.15. *Taraxacum officinale* $\beta = 0^\circ$ en superficie lisa. A la izquierda medición número 4 con velocidad crítica de 2,07 m/s. A la derecha medición número 6 con velocidad crítica de 1,55 m/s.

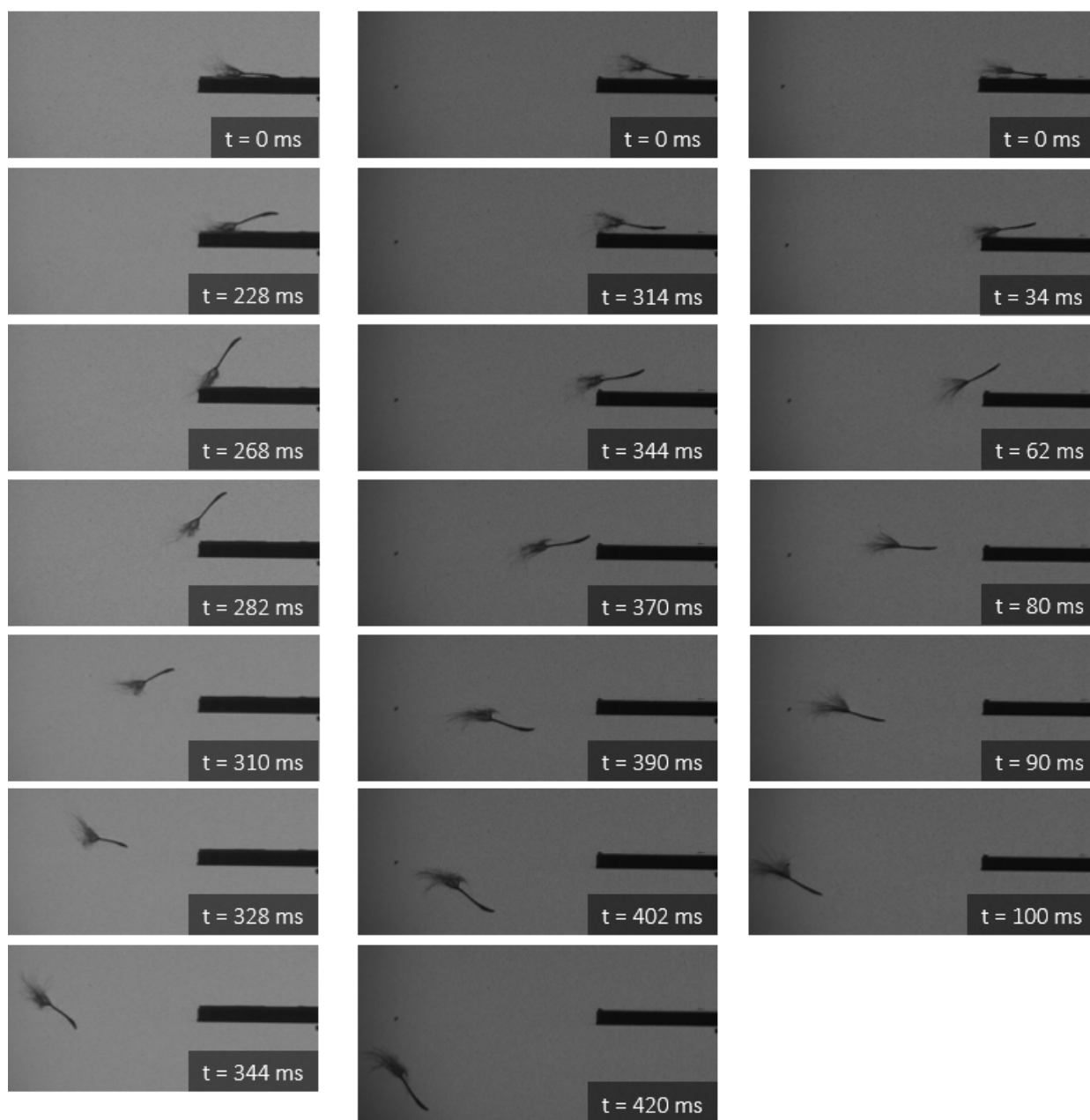


Figura 3.16. *Taraxacum officinale* $\beta = 0^\circ$ en superficie lisa. De izquierda a derecha:

- a) Medición nº 1. Velocidad crítica: 2,88 m/s. Distancia de dispersión 65 cm.
- b) Medición nº 5. Velocidad crítica: 2,88 m/s. Distancia de dispersión: 70 cm.
- c) Medición nº 9. Velocidad crítica: 2,76 m/s. Distancia de dispersión: 120 cm

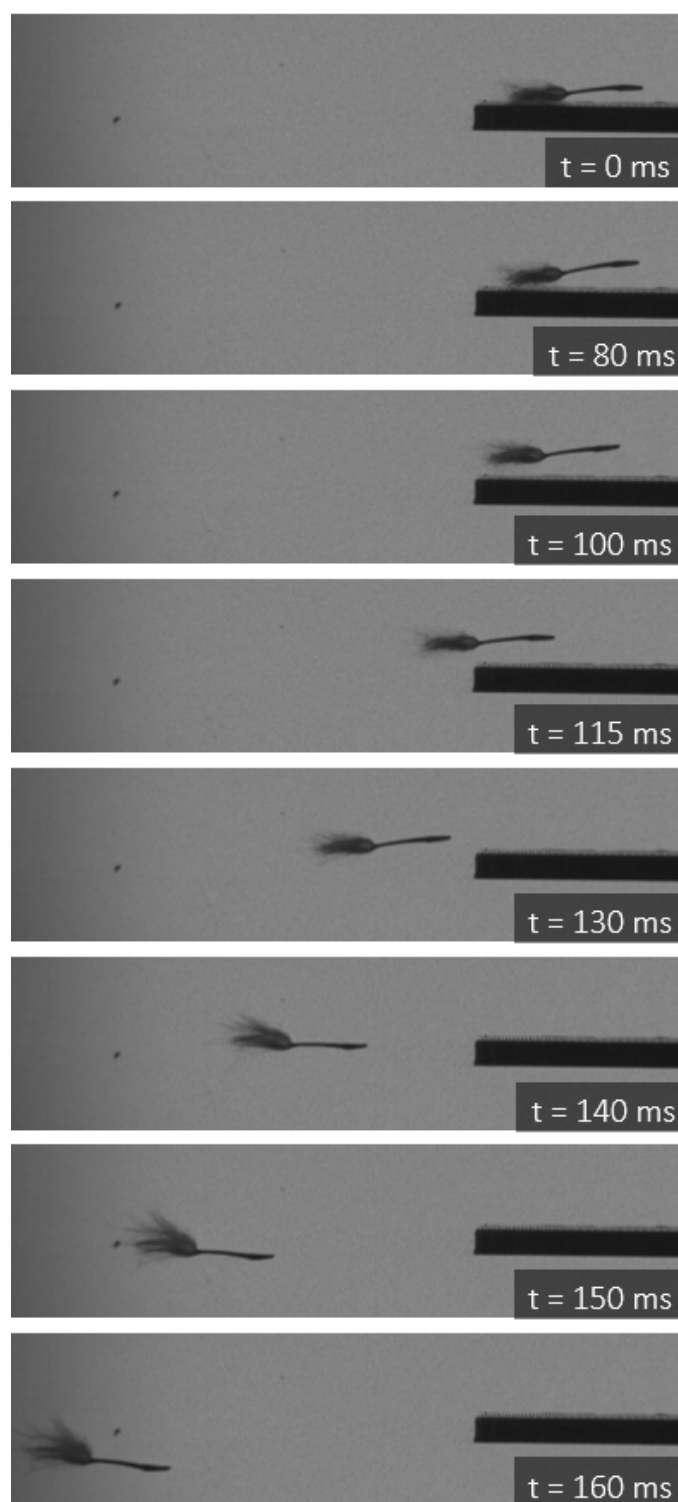


Figura 3.17. *Taraxacum officinale* $\beta = 0^\circ$ en placa A. Medición número 2. Velocidad crítica: 3,18 m/s. Distancia de dispersión: 70 cm.

- **Brachypodium distachyon y stacei**

Los primeros test de *Brachypodium stacei*, en superficie lisa, son realizados cambiando las orientaciones de la semilla, puesto que el *Taraxacum* tiende a reorientarse a 0° queremos ver cómo responde esta especie.

Para $\beta = 180^\circ$ se realizan varios vuelos, la primera semilla con racha da vueltas y cae por el lateral de la plataforma, mientras sin aplicar racha despegue con normalidad dirección paralela al viento. La segunda semilla se reorienta a $\beta = 0^\circ$, con 1,8 m/s gira hasta ponerse en posición frontal (figura 3.20.a) y a 3,78 m/s consigue volar (figura 3.20.b). En general, observamos que si se pone cóncava no le llega viento y a veces no consigue volar. Para los casos de $\beta = 45^\circ$, 135° y 90° la semilla se reorienta a $\beta = 0^\circ$, al igual que se observa en la especie *Taraxacum*, en general las semillas se alinean con el viento a velocidades mucho más bajas que las requeridas para el despegue. Además, en *Brachypodium* observamos que para $\beta = 45^\circ$ y 135° , aunque se reorienta ofrece más resistencia que a 90° (figura 3.21).

Una vez comprobado que la semilla se reorienta a $\beta = 0^\circ$, empezamos los ensayos usando esta orientación mientras se varían las rugosidades. Con esta orientación la semilla abandona la placa de forma paralela al flujo del aire, una vez en el aire empieza a rotar sobre sí misma. Las tres secuencias de imágenes mostradas en la figura 3.22 muestran el mismo patrón. Hay un par de excepciones, figura 3.23, en las cuales la semilla abandona la placa de forma lateral.

En la rugosidad A, la semilla necesita más velocidad para despegar, pero claramente la distancia de dispersión es mayor (figura 3.23). En la rugosidad B, hay veces en las que la semilla no se mueve de la posición inicial hasta que llega un momento en el que rueda hacia el lateral y se cae de la plataforma. Otras veces va avanzando poco a poco en pequeños saltos y consigue despegar de manera paralela a la corriente de aire (figura 3.24). En la rugosidad 3, da vueltas sobre sí misma hasta que se cae por el lateral (figura 3.25). En la rugosidad 5 da pequeños saltos avanzando hacia el final de la placa sin llegar a caerse, ahí se mantiene otro tiempo hasta que finalmente consigue volar (figura 3.25).

Las velocidades críticas más bajas suelen asociarse a semillas más ligeras y pequeñas; de modo contrario, mientras más pesada, cóncava y grande sea la semilla, necesita velocidades más altas para en despegar.

En base a la media obtenida en cada ensayo, se alcanzaron resultados de entre 35 - 123 cm para las distancias de dispersión y de entre 3,3 - 3,88 m/s para la velocidad crítica. Mientras basándonos en todas las medidas realizadas (Anexo III) se obtuvo un rango de entre 25 - 155 cm para la distancia de dispersión y de entre 2,51 - 4,6 m/s para la velocidad crítica. Esta variación en los resultados se debe a los picos, es decir, valores fuera de la media, por ejemplo, en el ensayo usando una superficie lisa hay tres picos (mediciones 3, 6 y 15) donde la velocidad crítica difiere mucho de la media, uno de estos picos es la mínima velocidad crítica obtenida de todos los ensayos 2,51 m/s y mientras otro es el máximo del 4,6 m/s.

Podemos observar cómo mientras más tarda en despegar la semilla, más lejos aterrizará también. Dándose la excepción en la placa 3, donde, aunque tarda un poco más en despegar que en el resto de placas, la distancia de dispersión es tan solo 35 cm, la distancia mínima.

Cabe destacar la rugosidad 5, donde se han obtenido unas velocidades bastante mayores que en el resto de rugosidades, la particularidad de esta placa es que es la única que pertenece al grupo de Skimming flow o flujo reptante (apartado 2.4) que ocurre cuando el ancho de la rugosidad $\approx$ altura de la rugosidad, obteniéndose un flujo con vórtices estables en los intersticios.

En esta especie se obtiene un número de Reynolds entre [1797 - 2732] y un número de Froude entre [12 - 18] dependiendo de la rugosidad utilizada. Asimismo, en *Brachypodium distachyon* se obtienen números similares de 2304 y 2137 para Reynolds, y 16 y 14,4 para Froude.

Especie: <i>Brachypodium stacei</i> $D = D_s = 7,865 \text{ mm}$ Orientación: $\beta = 0^\circ$								
Superficie	ϵ/D	L/D	vc (m/s)			distancia dispersión (cm)	Re crítico	Fr crítico
			media	min	max			
S0	$\ll 1$	$\ll 1$	$3,3 \pm 1,0$	2,5	6,2	87 ± 15	1797 ± 518	12 ± 3
SA	$\ll 1$	$\ll 1$	$3,5 \pm 0,6$	2,8	4,3	73 ± 34	1930 ± 305	13 ± 2
SB	$\ll 1$	$\ll 1$	$3,7 \pm 0,3$	3,3	4,2	63 ± 25	2004 ± 178	13 ± 1
S3	0,13	0,76	$3,88 \pm 0$	3,88	3,88	35 ± 0	2112 ± 0	14 ± 0
S5	0,25	0,25	$5,0 \pm 0,6$	4,6	5,4	123 ± 46	2732 ± 323	18 ± 2

Especie: <i>Brachypodium distachyon</i> D = Ds = 7,777 mm Orientación: β = 0°							
Superficie	ε/D	L/D	vc (m/s)			Re crítico	Fr crítico
			media	min	max		
SA	<<1	<<1	4,3 ± 0,5	3,2	4,8	2304 ± 267	16 ± 2
SB	<<1	<<1	4,0 ± 0,2	4,1	4,8	2137 ± 127	14,4 ± 0,9

Tabla 3.5. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de las especies *Brachypodium stacei* (tabla superior) y *Brachypodium distachyon* (tabla inferior).

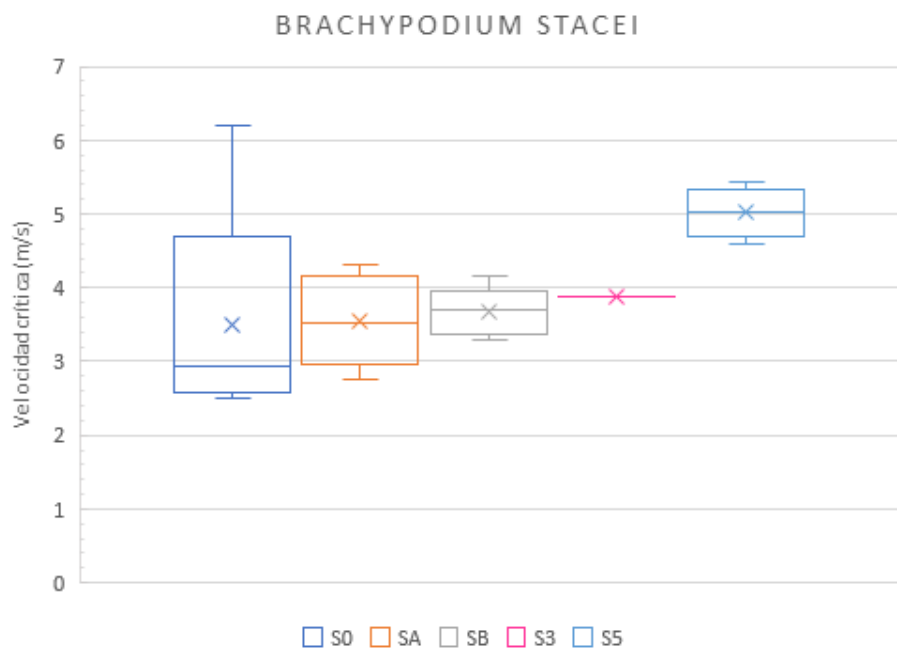


Figura 3.18. Diagrama de cajas y bigotes para *Brachypodium stacei*. Velocidad crítica (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).

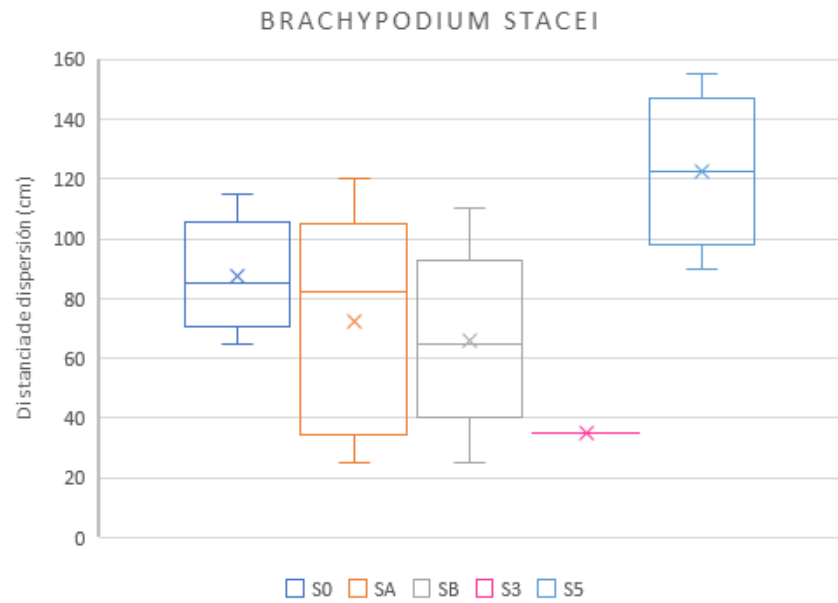


Figura 3.19. Diagrama de cajas y bigotes para *Brachypodium stacei*. Distancia de dispersión (eje y) en función del tipo de superficie (eje x).

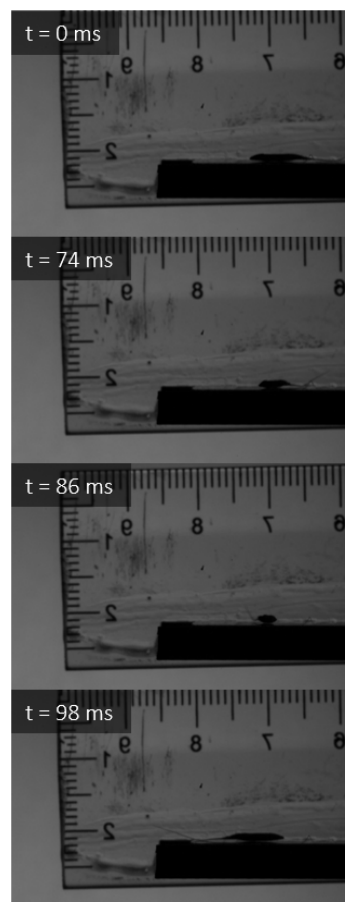


Figura 3. 20.a. *Brachypodium stacei* $\beta = 180^\circ$, reorientación a $\beta = 0^\circ$ a una velocidad del viento de 1,8 m/s.

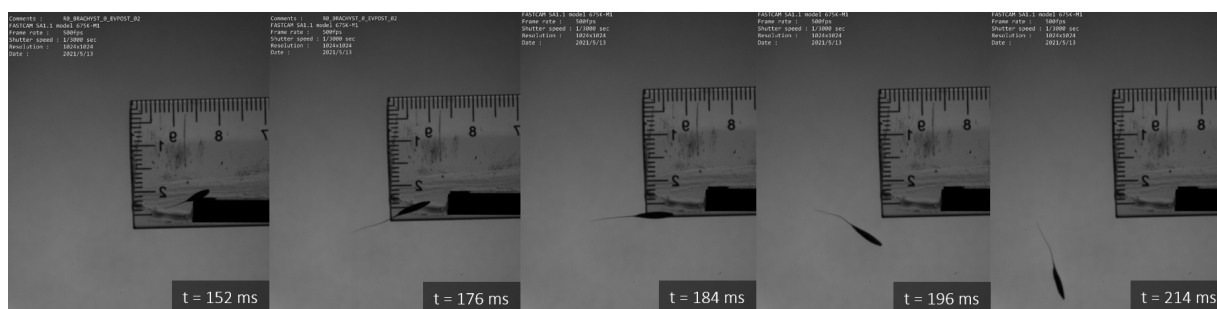


Figura 3.20.b. *Brachypodium stacei* $\beta = 180^\circ$, despegue semilla con una velocidad del viento de 3,78 m/s.



Figura 3.21. *Brachypodium stacei* con $\beta = 135^\circ$, la semilla se reorienta a $\beta = 0^\circ$. Vista superior de la plataforma. Entre las velocidades del viento de 1,6-1,8 m/s comienza a girar para ponerse en posición frontal y con 3,4 m/s consigue volar.

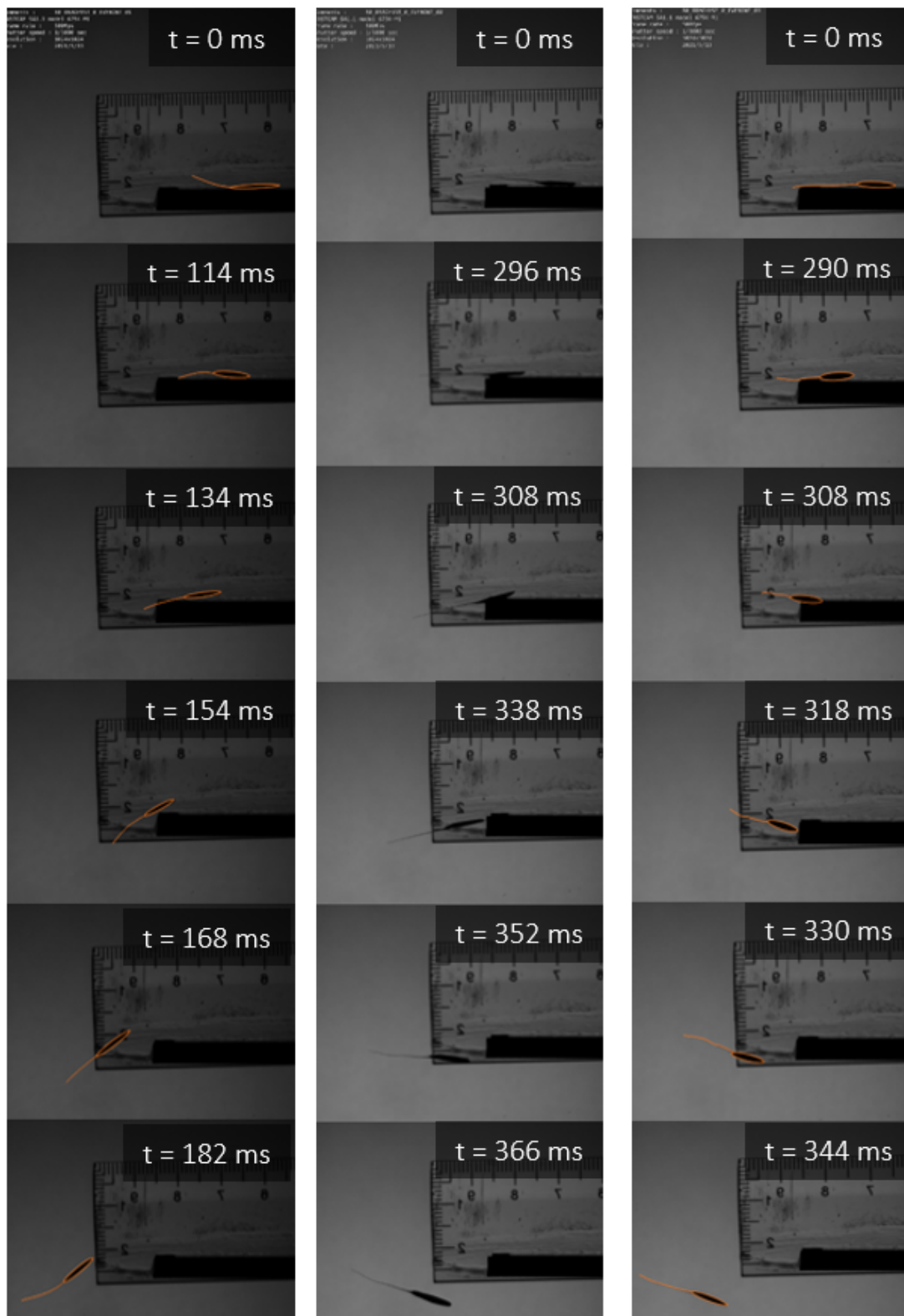


Figura 3.22. *Brachypodium stacei* $\beta = 0^\circ$ en superficie lisa. Velocidades críticas de 4,5 m/s, 3,93 m/s y 4,05 m/s de izquierda a derecha.

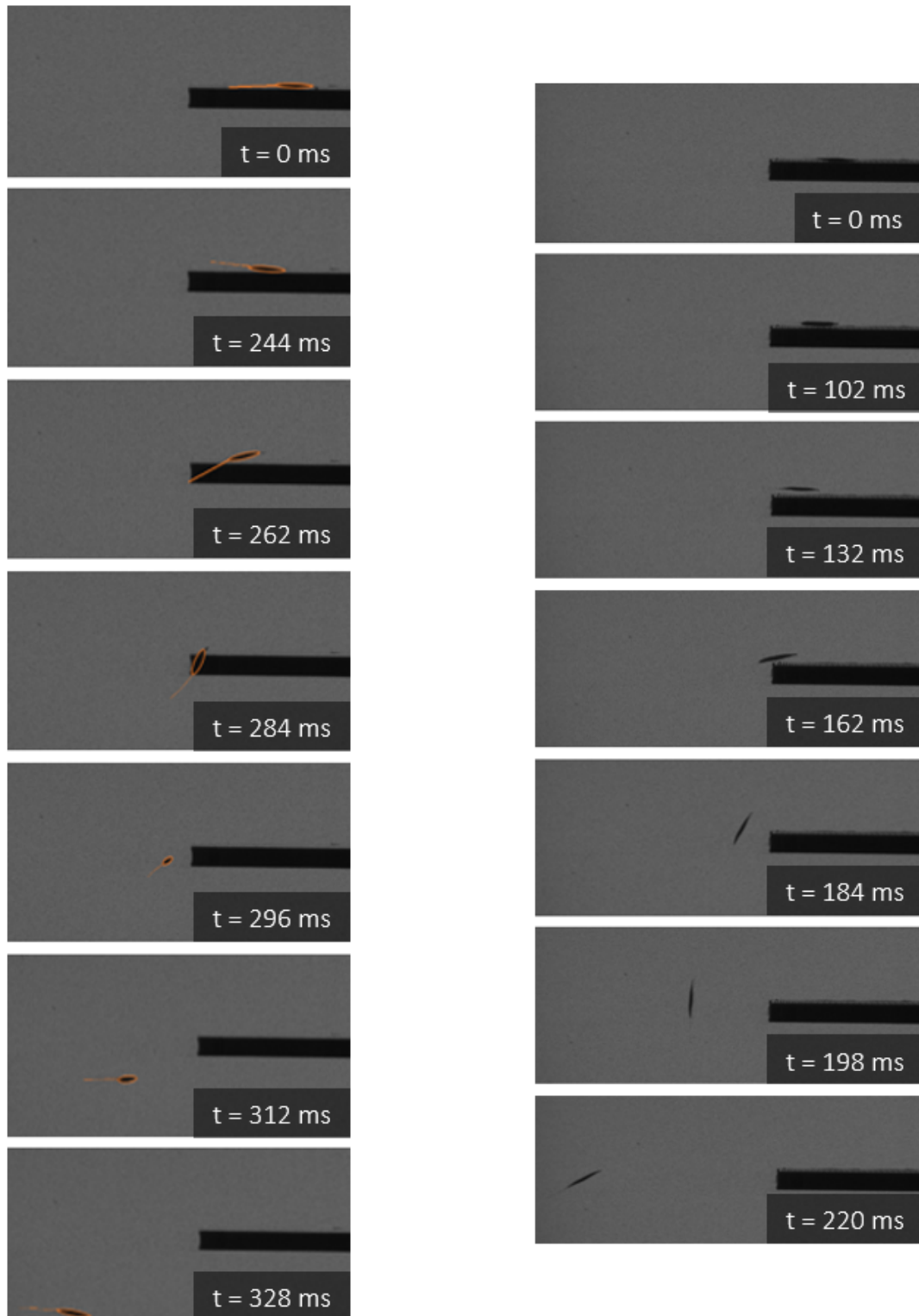


Figura 3.23. *Brachypodium stacei* $\beta = 0^\circ$ en superficie lisa a la izquierda y en placa A a la derecha.

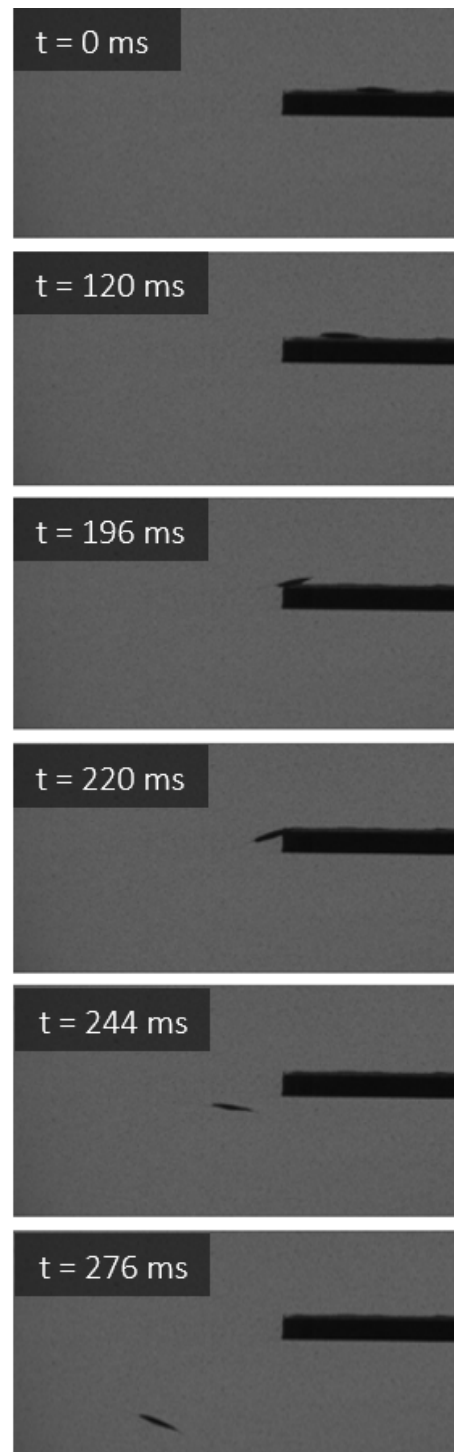
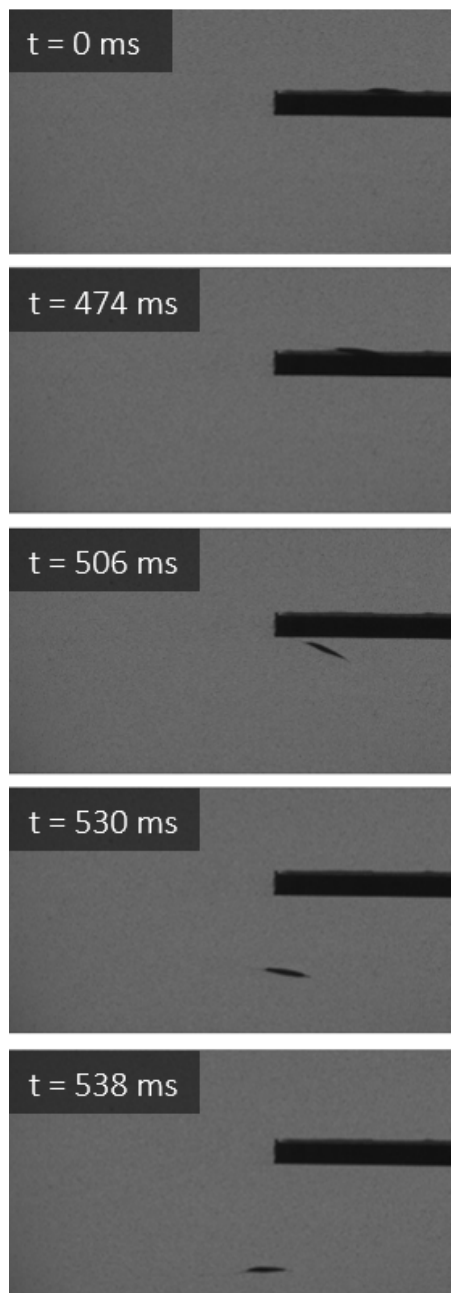


Figura 3.24. *Brachypodium stacei* $\beta = 0^\circ$ en placa B.

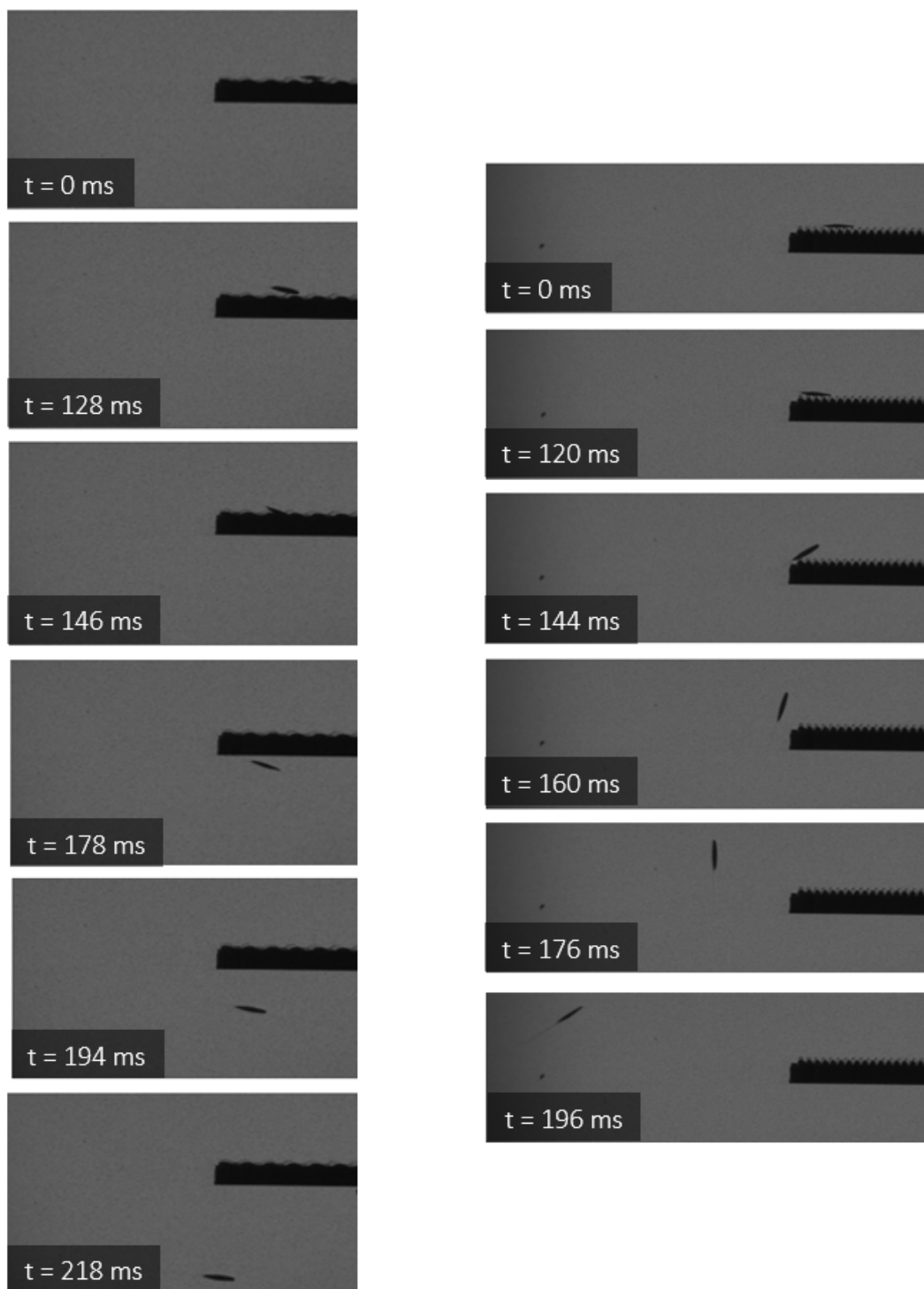


Figura 3.25. *Brachypodium stacei* $\beta = 0^\circ$ en placa 3 a la izquierda y en placa 5 a la derecha.

3.2 Velocidad de vuelo de la semilla

En esta parte del trabajo analizamos la velocidad de la diáspora una vez consigue despegar del sustrato o plataforma.

Para plasmar el ensayo fotográficamente, se prepara la cámara de alta velocidad para grabar entre 500 y 1500 fps dependiendo de la especie, y con una escala espacial mínima y máxima de 66,67 y 147,05 $\mu\text{m}/\text{pix}$ respectivamente. Se coloca la semilla en su plataforma, adecuada a la altura en la que incidirá la velocidad máxima y más uniforme. Mediante análisis de imágenes se detecta la semilla en cada fotograma y se va siguiendo en los siguientes. De esta forma se puede calcular el desplazamiento y, por tanto, la velocidad. La figura 3.26 muestra una imagen con las coordenadas y las componentes de la velocidad. Las imágenes usadas para el análisis de vuelo son las mostradas en el apartado 3.1.

Obtenemos en primer lugar una tabla que refleja las trayectorias de los distintos ensayos realizados, coordenadas (x, y) de las imágenes analizadas. Esto junto a los intervalos de tiempo hacen posible el cálculo de las velocidades horizontal y vertical para finalmente obtener la velocidad absoluta. Estas tablas pueden consultarse en el Anexo IV. El eje x es positivo en la dirección del viento y el eje y en el sentido opuesto a la gravedad. Además de esta tabla se representarán unas gráficas en la que se comparan las diferentes velocidades de vuelo medidas, en unos casos variando la rugosidad, en otros el ángulo de ataque y en otros la intensidad turbulenta.

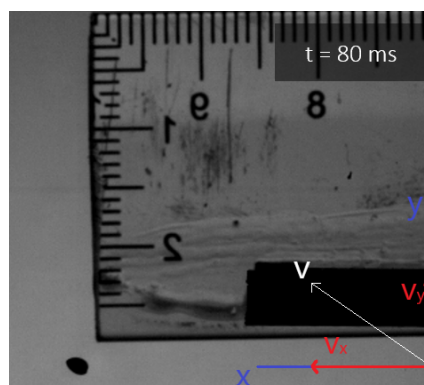


Figura 3.26. Descomposición en coordenadas cartesianas de la velocidad de una semilla.

3.2.1. Semillas sin estructura de vuelo

La única semilla sin estructura de vuelo que consigue despegar es *Urtica dioica* con una velocidad crítica entre 3,15 - 4,32 m/s en superficie lisa y 5,75 m/s en la placa 6 (Tabla 3.1). En los resultados obtenidos por análisis fotográfico la velocidad máxima que alcanza la semilla es de 1,07 m/s para la superficie lisa, y 1,39 m/s para la placa 6 (Figura 3.27, Tabla 3.6) Se sigue manteniendo la relación de que a mayor rugosidad mayor es la velocidad en ambos casos, pues la velocidad del viento incidente es mayor.

En la figura 3.27. se representan las velocidades de vuelo alcanzadas por la semilla en m/s a lo largo del tiempo en milisegundos para diferentes rugosidades, cada ensayo estará asociado a una velocidad crítica diferente, como se indica en la leyenda. También se indica en la leyenda con que imágenes del apartado 3.1. se corresponde cada ensayo.

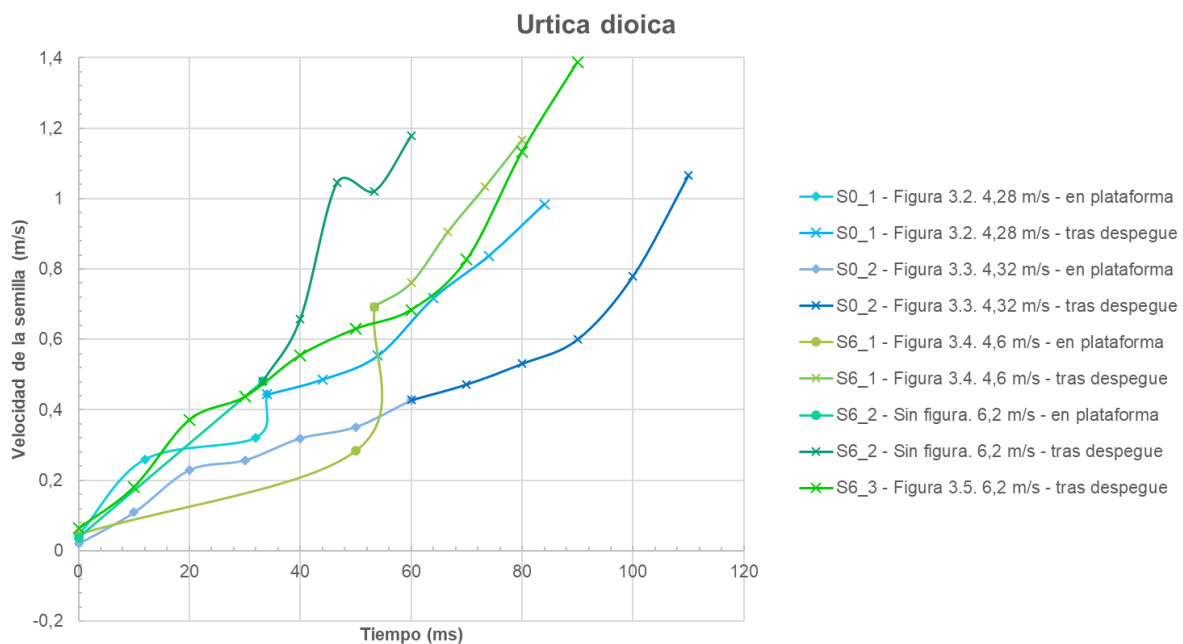


Figura 3.27. Gráfica de la velocidad de la semilla respecto al tiempo para la especie *Urtica dioica* en diferentes rugosidades.

Si se observan las componentes vertical y horizontal de la velocidad, figuras 3.28 y 3.29, la velocidad horizontal máxima que alcanza la semilla en el despegue es

de 0,95 m/s para la superficie lisa, y 1,24 m/s para la placa 6. Mientras la componente vertical es de -0,53 m/s para la superficie lisa y de -0,78 m/s para la placa 6.

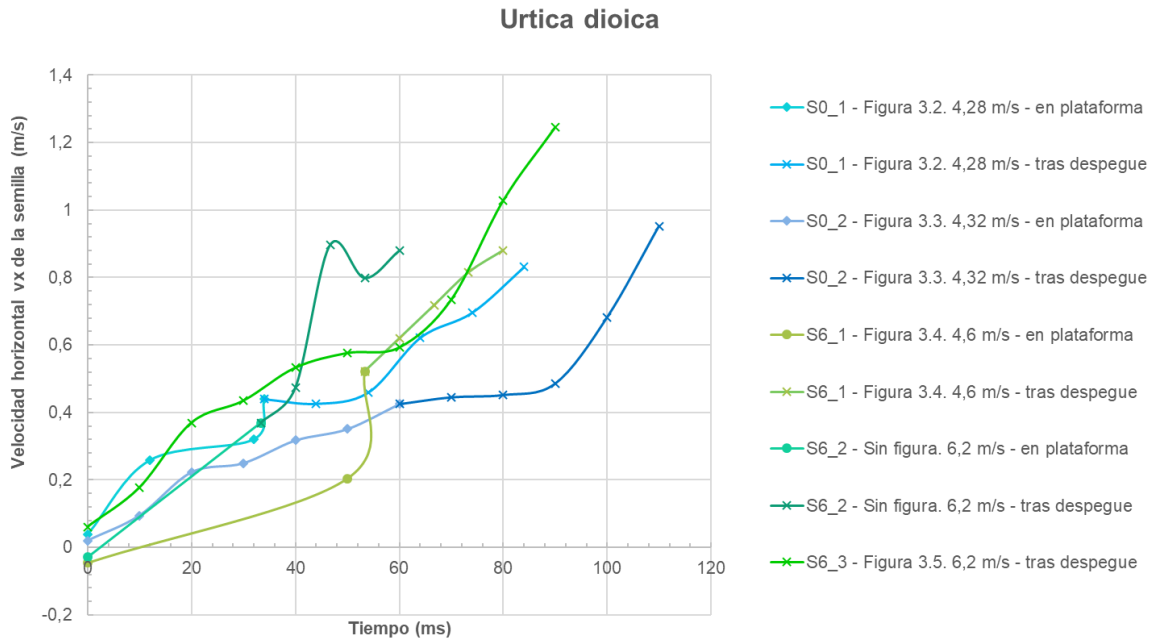


Figura 3.28. Gráfica velocidad horizontal de la semilla respecto al tiempo de Urtica dioica en diferentes rugosidades.

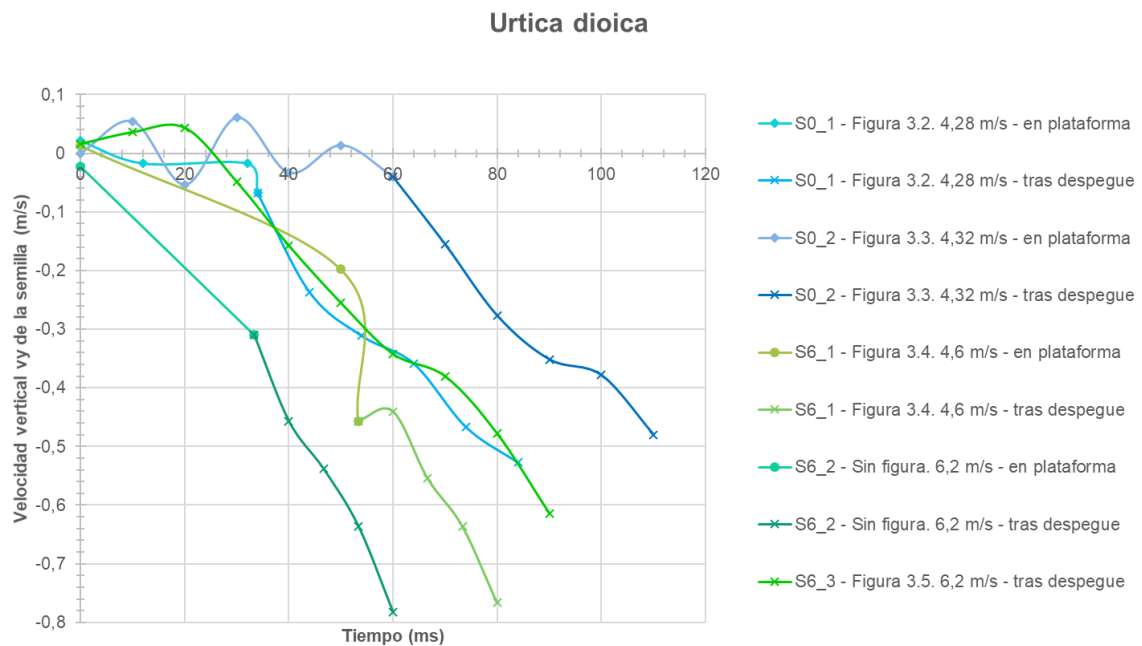


Figura 3.29. Gráfica velocidad vertical de la semilla respecto al tiempo de Urtica dioica en diferentes rugosidades.

Además, si se comparan los resultados de la velocidad de abscisión de la dispersión primaria, calculados por nuestra compañera de la universidad de Jaén en su TFG “Estudio experimental de la dispersión de semillas. Parte II: Caracterización del vuelo de las semillas” (Fernández, A, 2022) con los obtenidos en la dispersión secundaria se asemejan bastante entre sí. La diferencia principal radica en la velocidad vertical, en la dispersión primaria al estar la semilla aún en la planta y constar de cierta altura, esta velocidad será por tanto mayor.

Urtica dioica			
Dispersión	Primaria	Secundaria	
Rugosidad	-	Superficie lisa	Placa 6
v (m/s)	1,12326	1,06667	1,38784
vx (m/s)	1,02610	0,95270	1,24457
vy (m/s)	-0,93282	-0,52703	-0,78261

Tabla 3.6. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla *Urtica dioica* en los ensayos de dispersión primaria y secundaria.

3.2.2 Semillas con estructura de vuelo

- *Thymus vulgaris*

El *Thymus* a diferencia de las demás semillas con estructura de vuelo no tiene como variable el ángulo de ataque, por lo que el estudio se centra en la rugosidad. En los ensayos de la velocidad mínima del viento requerida para el despegue se obtienen valores de entre 2,3 - 2,8 m/s (tabla 3.2) Para esta especie, en los ensayos obtenidos en vídeo, la velocidad máxima que alcanza la semilla es de 1,13 m/s para la superficie lisa y 1,38 m/s para la placa A (figura 3.30, tabla 3.7) Se sigue manteniendo la relación de que a mayor rugosidad mayor es la velocidad de vuelo.

Si se observan las componentes vertical y horizontal de la velocidad, figuras 3.31 y 3.32, la velocidad horizontal máxima que alcanza la semilla aumenta considerablemente en la placa A. Mientras la componente vertical es mayor en la superficie lisa.

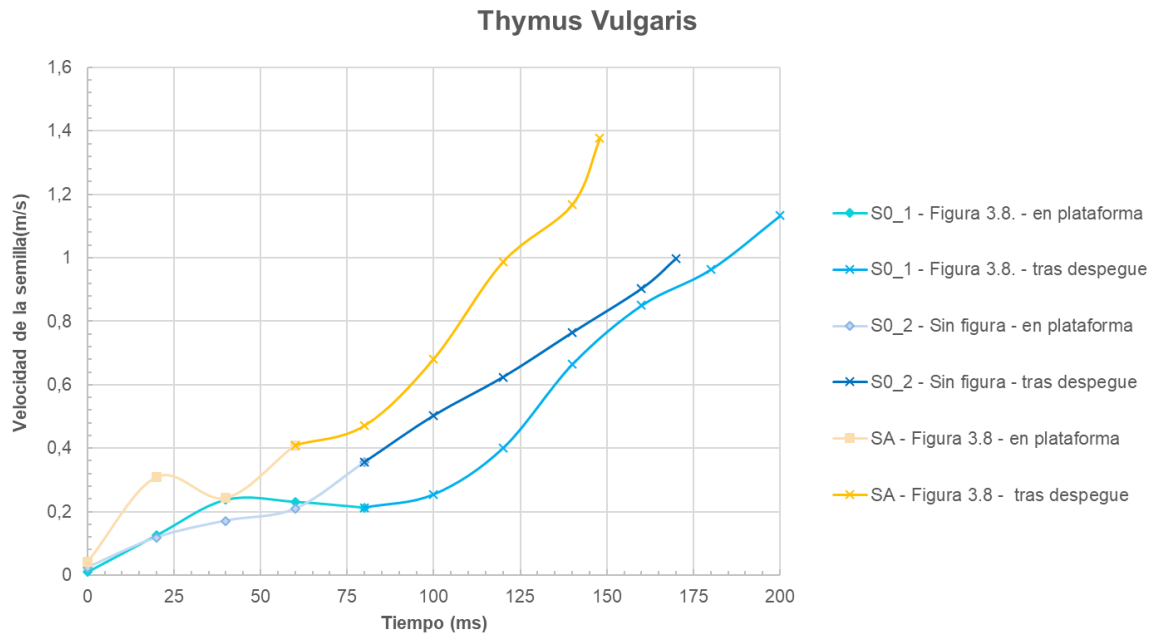


Figura 3.30. Gráfica velocidad de la semilla respecto al tiempo de Thymus Vulgaris en diferentes rugosidades.

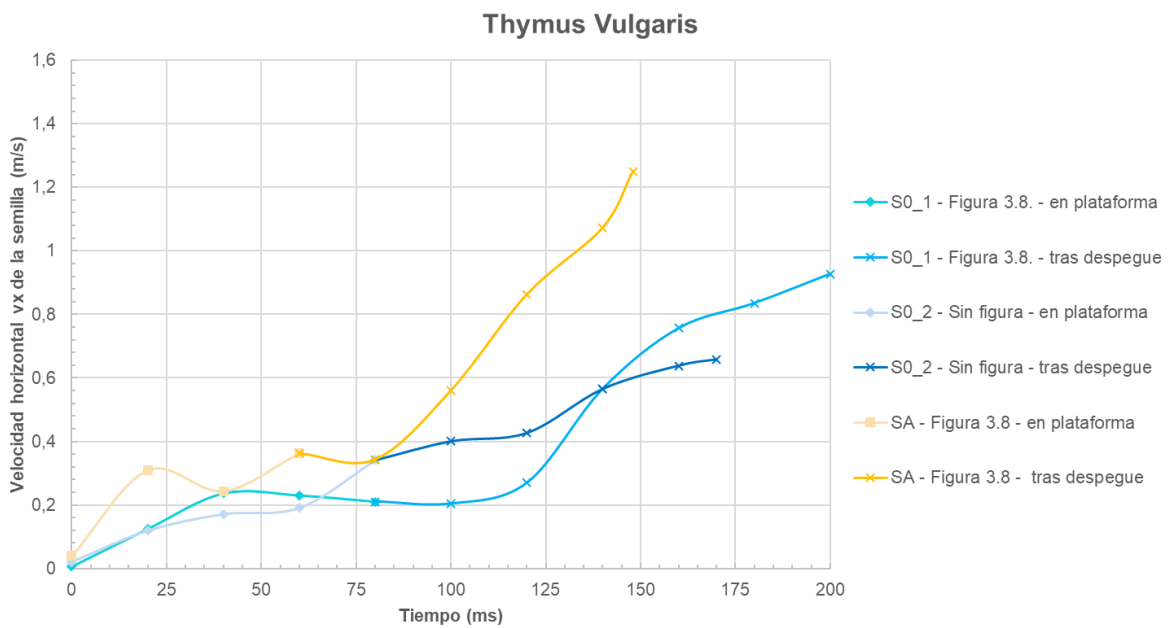


Figura 3.31. Gráfica velocidad horizontal de la semilla respecto al tiempo de Thymus Vulgaris en diferentes rugosidades.

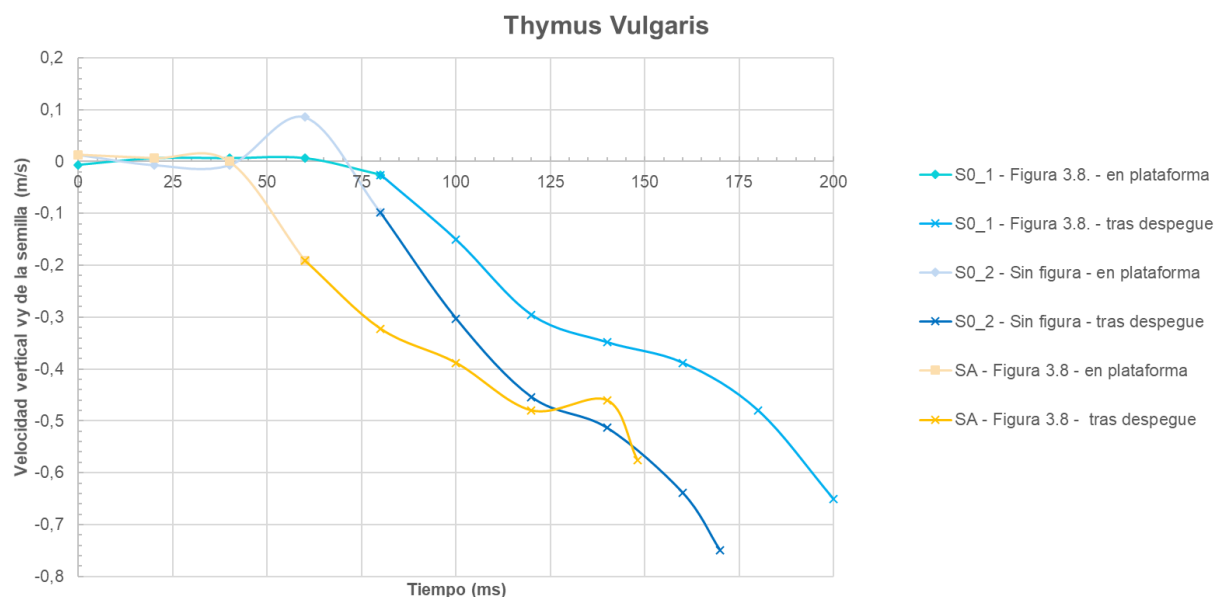


Figura 3.32. Gráfica velocidad vertical de la semilla respecto al tiempo de Thymus Vulgaris en diferentes rugosidades.

En este caso, los resultados de la velocidad de abscisión de la dispersión primaria son bastante más elevados a los obtenidos en dispersión secundaria. Este cambio puede ser debido a la existencia de estructura de vuelo en esta especie (tabla 3.7) ya que hará que la diáspora permanezca más tiempo en el aire con mayores posibilidades de incrementar la velocidad alcanzada.

Thymus vulgaris			
Dispersión	Primaria	Secundaria	
Rugosidad	-	Superficie lisa	Placa A
v (m/s)	3,74988	1,13345	1,37618
vx (m/s)	3,73127	0,92763	1,25000
vy (m/s)	-0,55969	-0,75000	-0,57566

Tabla 3.7. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla Thymus vulgaris en los ensayos de dispersión primaria y secundaria.

- **Taraxacum officinale**

El diente de león al igual que el *Brachypodium* tienen como variable añadida el ángulo de ataque, además de la rugosidad. El primer análisis será a unas condiciones constantes: superficie lisa y ángulo de ataque $\beta=0^\circ$.

Además, en esta especie mediremos la velocidad máxima alcanzada por la semilla con y sin malla metálica para ver cuánto puede influir en esta la intensidad turbulenta. En general se puede apreciar como al quitar la malla la velocidad absoluta aumenta con un factor de 2,15, mientras la componente horizontal crece mucho más que la vertical: factores de 2,43 y 1,15 respectivamente (tabla 3.8 y figuras 3.33 y 3.34)

Taraxacum officinale		
Ángulo de ataque	$\beta=0^\circ$	
Rugosidad	Superficie lisa	
Intensidad turbulenta	Con malla	Sin malla
v (m/s)	1,27139	2,74354
vx (m/s)	1,09921	2,67647
vy (m/s)	-0,73	-0,83824

Tabla 3.8. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla *Taraxacum officinale* en ensayos con mismas condiciones variando la intensidad turbulenta.

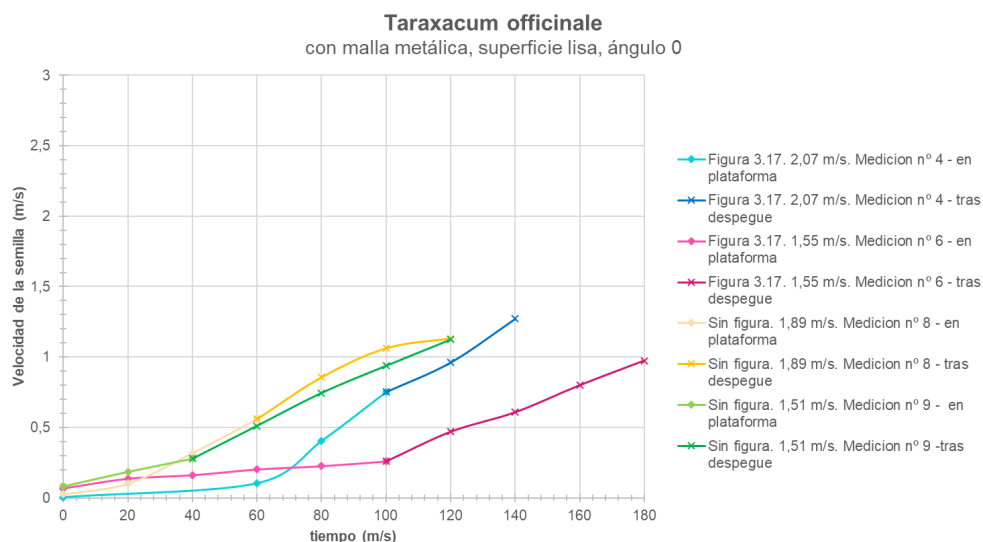


Figura 3.33. Gráfica de la velocidad de la semilla respecto al tiempo de *Taraxacum officinale* con condiciones constantes: malla metálica, superficie lisa y ángulo de ataque $\beta=0^\circ$.

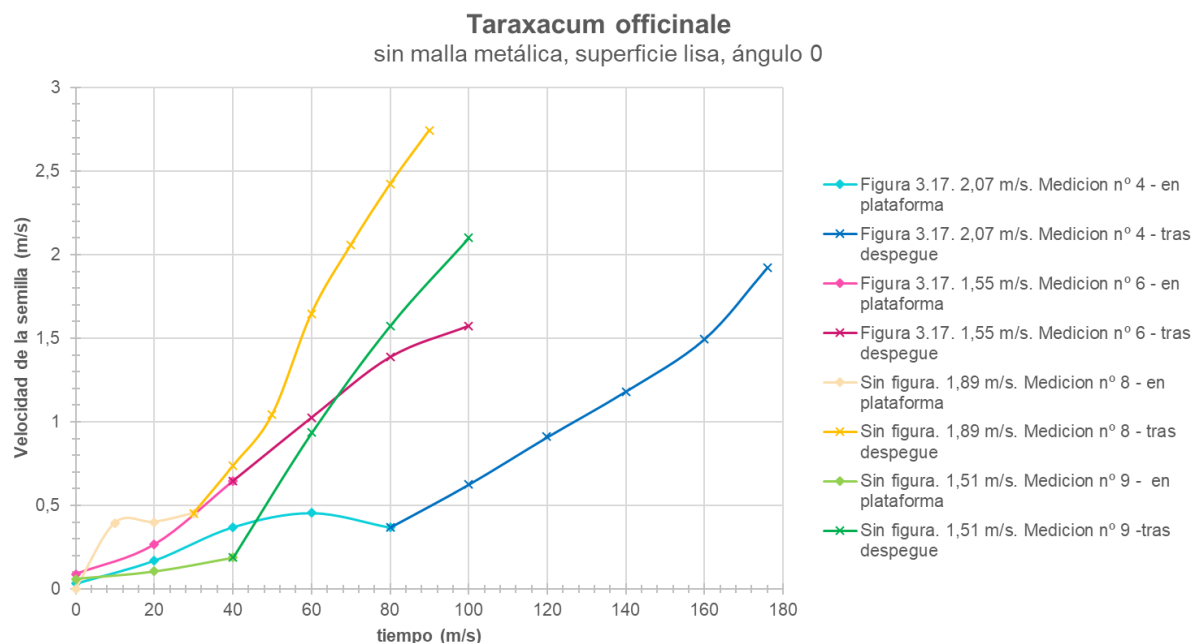


Figura 3.34. Gráfica de la velocidad de la semilla respecto al tiempo de *Taraxacum officinale* con condiciones constantes: sin malla metálica, superficie lisa y ángulo de ataque $\beta=0^\circ$.

Tras este primer análisis inicial, se realizan mediciones de la velocidad de semilla variando el ángulo de ataque. En la tabla 3.9. encontramos los resultados de velocidad máxima alcanzada por la semilla durante la grabación de su despegue, se observa como con $\beta=0^\circ$ la semilla alcanza la mayor velocidad en todas sus componentes, siendo la velocidad absoluta de 1,27 m/s, mientras con la posición inversa $\beta=180^\circ$ es la más lenta, llegando tan solo a 0,69 m/s.

Taraxacum officinale				
Rugosidad	Superficie lisa			
Ángulo de ataque	$\beta=0^\circ$	$\beta=90^\circ$	$\beta=180^\circ$ sin reorientación	$\beta=180^\circ$ con reorientación
v (m/s)	1,27139	1,05646	0,62545	0,69144
vx (m/s)	1,09921	0,80000	0,40079	0,22222
vy (m/s)	-0,73000	-0,69000	-0,50794	-0,65476

Tabla 3.9. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla *Taraxacum officinale* en ensayos con mismas condiciones variando el ángulo de ataque.

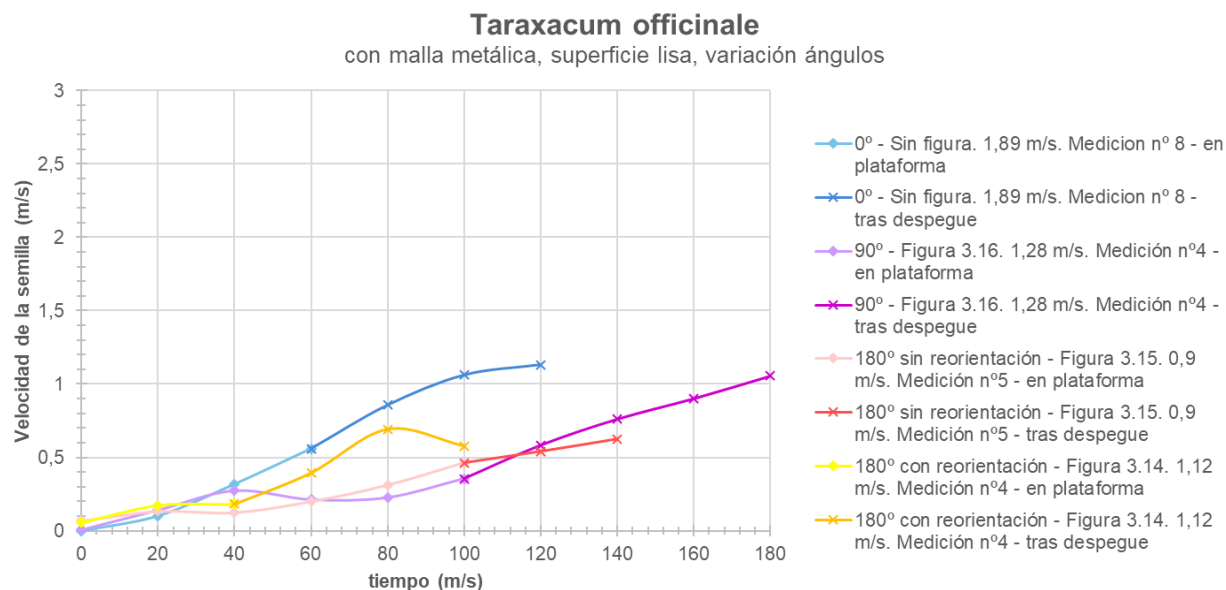


Figura 3.35. Gráfica velocidad de la semilla respecto al tiempo de *Taraxacum officinale* variando los ángulos de ataque.

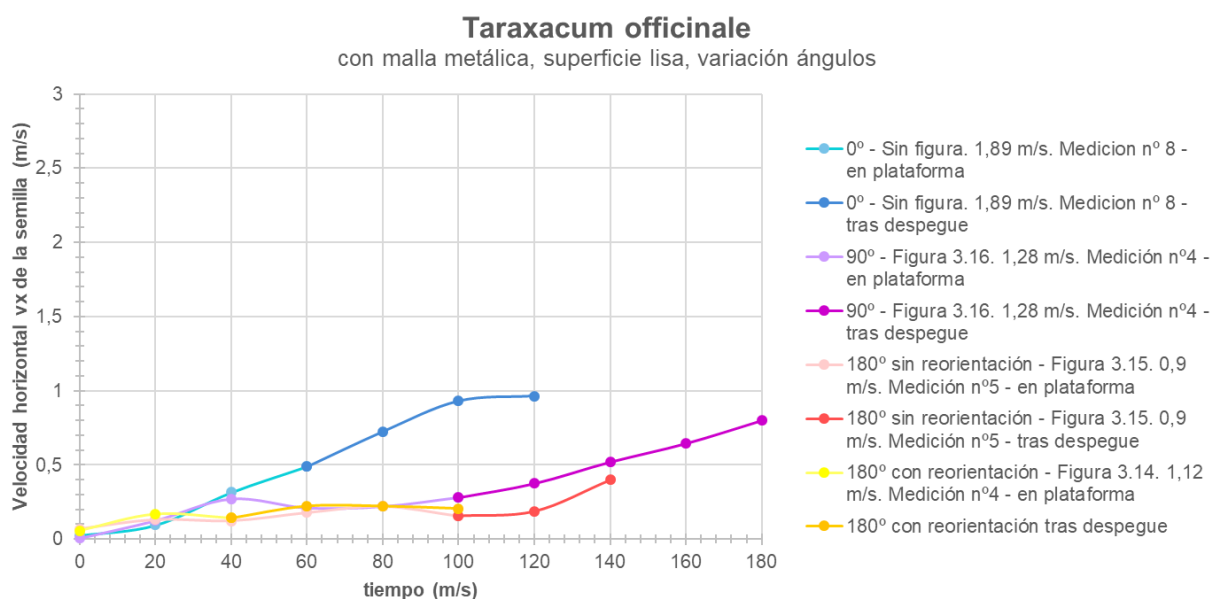


Figura 3.36. Gráfica velocidad horizontal de la semilla respecto al tiempo de *Taraxacum officinale* variando los ángulos de ataque.

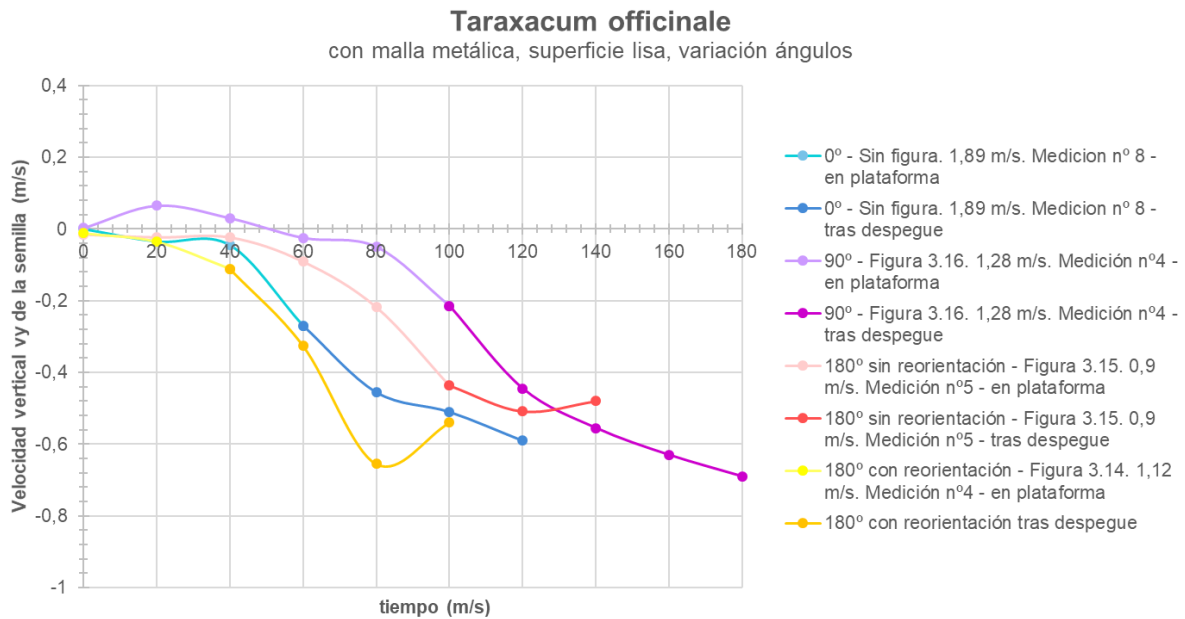


Figura 3.37. Gráfica velocidad vertical de la semilla respecto al tiempo de *Taraxacum officinale* variando los ángulos de ataque.

- *Brachypodium stacei*

El primer análisis al igual que el diente de león será a unas condiciones constantes: superficie lisa y ángulo de ataque $\beta=0^\circ$.

Al igual que en el caso anterior del diente de león, se mide la velocidad de la semilla con y sin malla metálica, para ver cuánto puede influir la intensidad turbulenta (tabla 3.10) En este caso, al quitar la malla metálica la velocidad absoluta aumenta solo en un 1,14 mientras la componente horizontal y vertical aumentan 1,16 y 1,26 respectivamente.

<i>Brachypodium stacei</i>		
Ángulo de ataque	$\beta=0^\circ$	
Rugosidad	Superficie lisa	
Intensidad turbulenta	Con malla	Sin malla
v (m/s)	1,06664	1,22011
v_x (m/s)	0,79000	0,88158
v_y (m/s)	-0,71667	-0,90132

Tabla 3.10. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla *Taraxacum officinale* en ensayos con mismas condiciones variando la intensidad turbulenta.

Análogamente se realizan mediciones de la velocidad de la semilla variando el ángulo de ataque. En la tabla 3.11. encontramos los resultados de velocidad máxima alcanzada por la semilla durante la grabación de su despegue. Se observa cómo una vez más se alcanza la mayor velocidad con $\beta=0^\circ$.

Brachypodium stacei		
Rugosidad	Superficie lisa	
Ángulo de ataque	$\beta=0^\circ$	$\beta=180^\circ$
v (m/s)	1,06664	0,82807
vx (m/s)	0,79000	0,56000
vy (m/s)	-0,71667	-0,61000

Tabla 3.11. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla Brachypodium stacei en ensayos con mismas condiciones variando el ángulo de ataque.

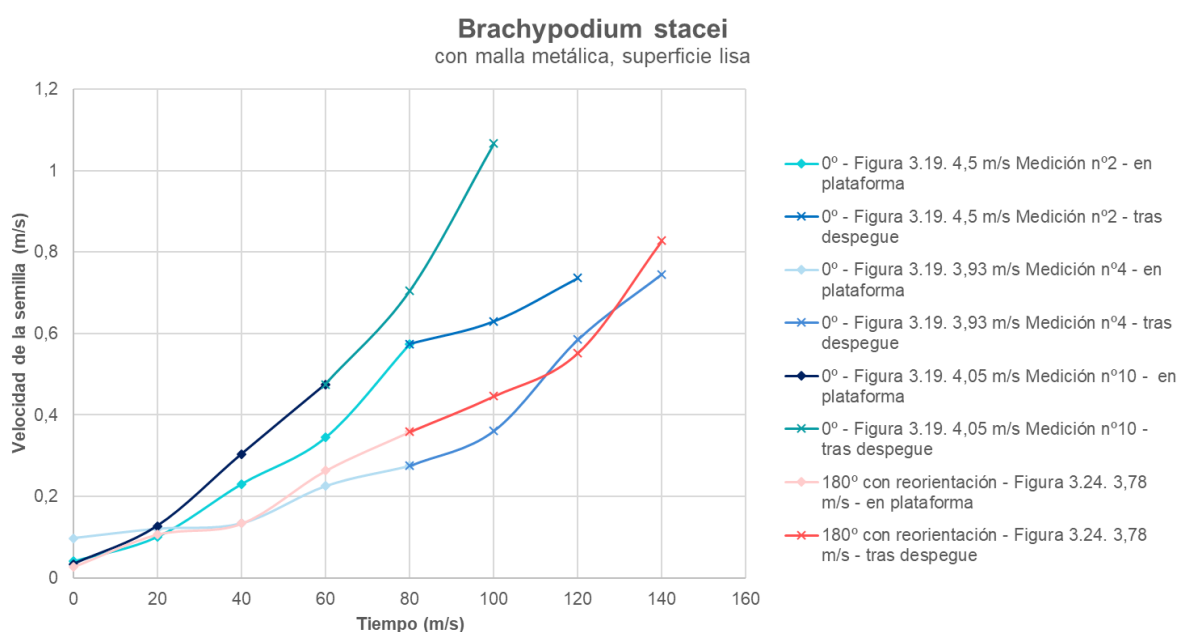


Figura 3.38. Gráfica velocidad de la semilla respecto al tiempo de Brachypodium stacei variando los ángulos de ataque.

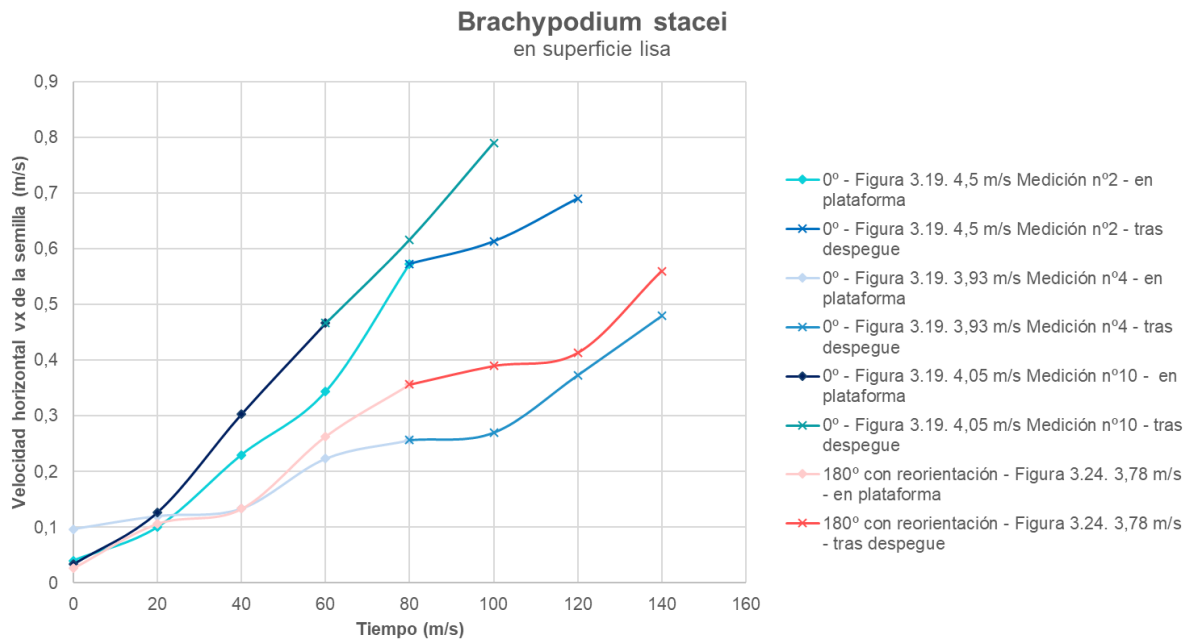


Figura 3.39. Gráfica velocidad horizontal de la semilla respecto al tiempo de *Brachypodium stacei* variando los ángulos de ataque.

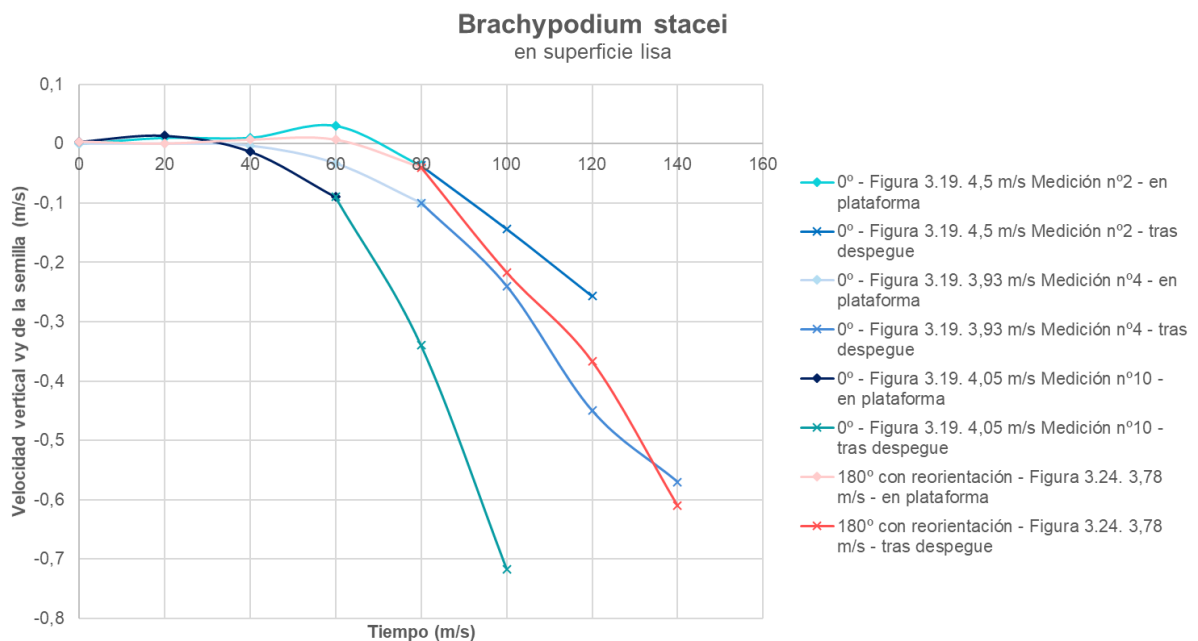


Figura 3.40. Gráfica velocidad vertical de la semilla respecto al tiempo de *Brachypodium stacei* variando los ángulos de ataque.

Por último, en esta especie se realizan ensayos variando la rugosidad de la plataforma. Ver tabla 3.12 y figuras 3.41, 3.42 y 3.43.

Al igual que vimos en el apartado 3.1 con la velocidad crítica, la placa 5 destaca por estar asociada con la máxima velocidad de la semilla. Si se observa la figura 3.43. donde se representa la componente vertical de la velocidad, podemos observar cómo a diferencia de las demás rugosidades, en las que la semilla desciende de forma continua, en este caso se producen como se comentó con anterioridad “saltos” pequeños hacia arriba.

Para las rugosidades S0, SA y SB, se obtienen valores relativamente cercanos, pues todas son rugosidades cercanas a cero. Cabe destacar como en el caso de SA, se observa un movimiento más horizontal que vertical, a diferencia del resto de las superficies (exceptuando S5), en las que se encuentran componentes de velocidad más compensadas entre sí.

Por otro lado, con esta especie, S3 obtiene el valor más pequeño de velocidad de la semilla (flujo independiente con vórtices de recirculación estables).

Brachypodium stacei					
Ángulo de ataque	$\beta=0^\circ$				
Rugosidad	Superficie lisa	Placa A	Placa B	Placa 3	Placa 5
v (m/s)	1,22011	1,68118	1,09851	0,76455	2,38191
vx (m/s)	0,88158	1,67105	0,67105	0,42105	2,22039
vy (m/s)	-0,90132	-0,18421	-0,90789	-0,63816	-0,39474

Tabla 3.12. Resultados de la velocidad máxima alcanzada por la semilla *Brachypodium stacei* en distintas rugosidades.

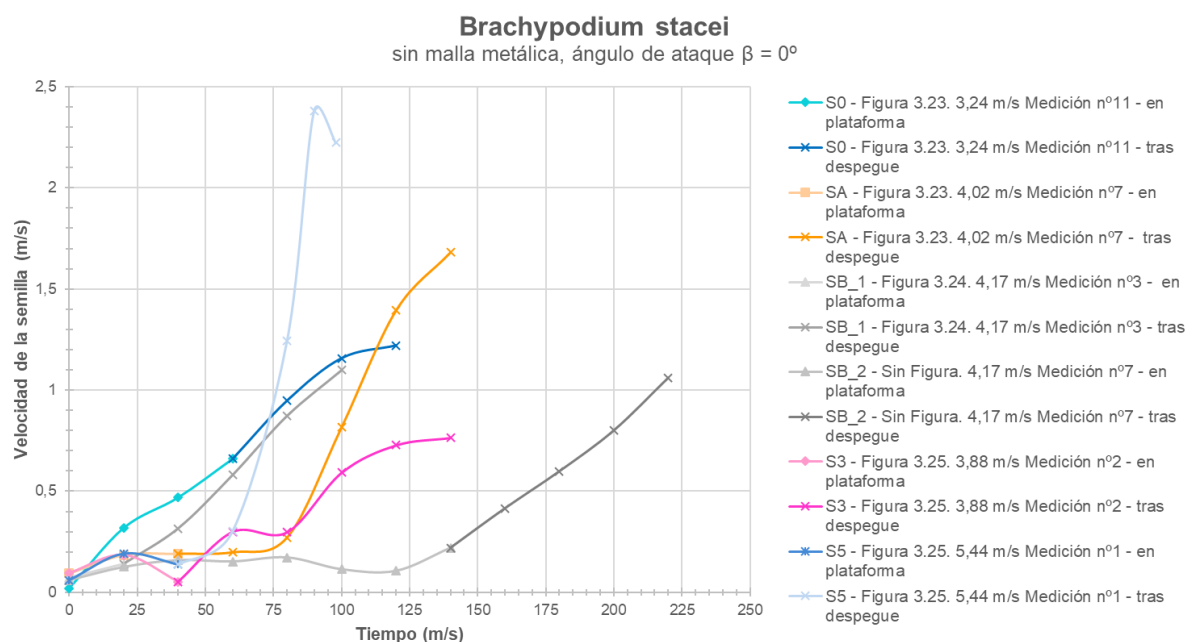


Figura 3.41. Gráfica velocidad de la semilla respecto al tiempo de *Brachypodium stacei* con distintas rugosidades.

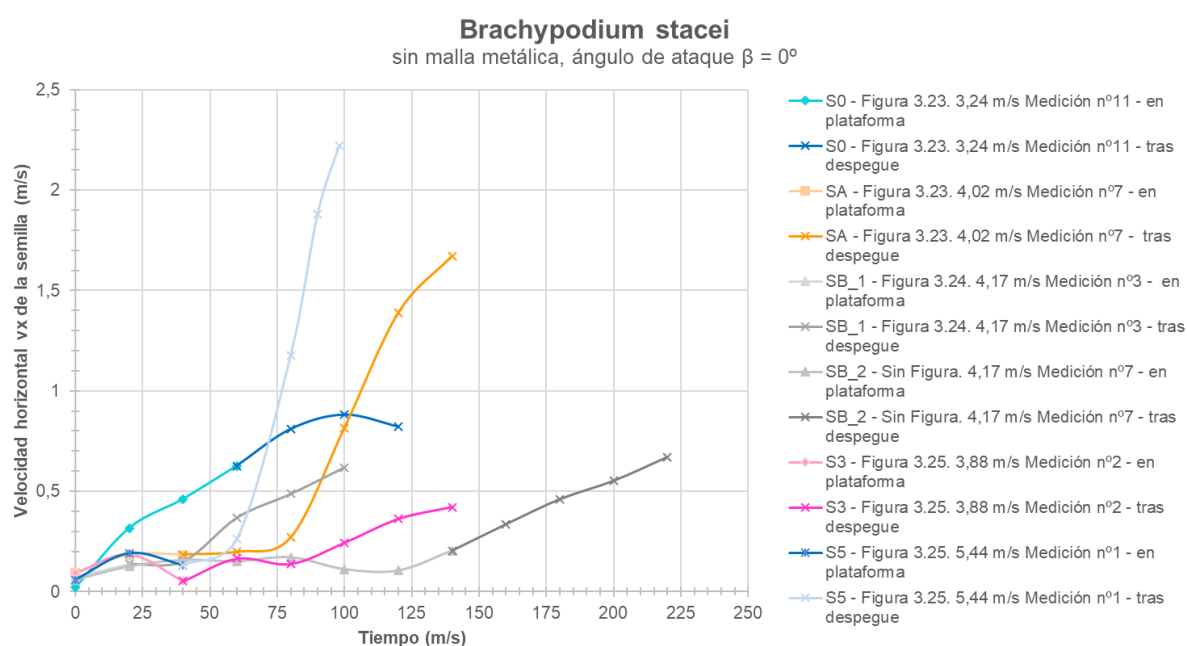


Figura 3.42. Gráfica velocidad horizontal de la semilla respecto al tiempo de *Brachypodium stacei* con distintas rugosidades.

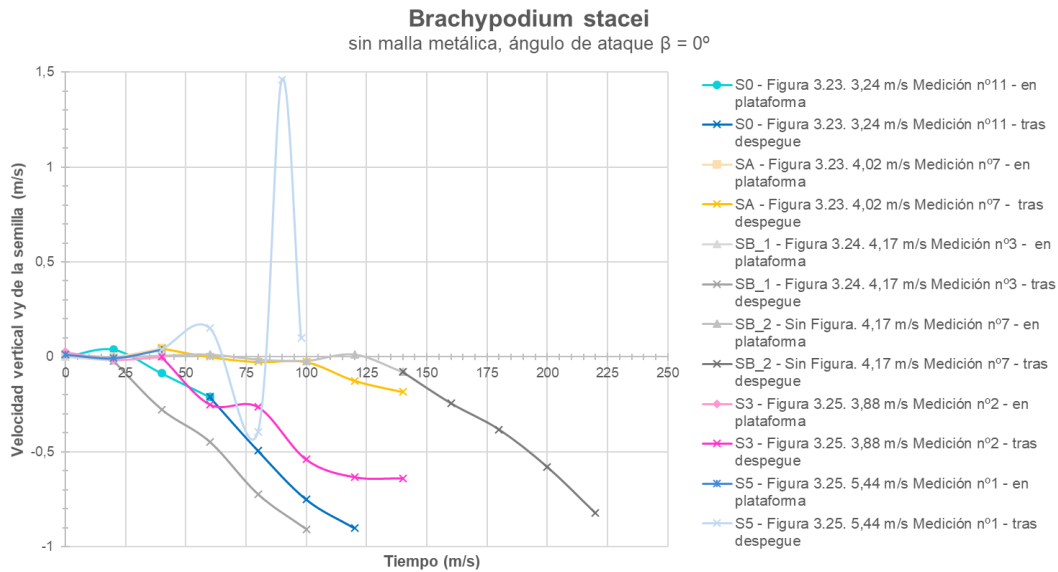


Figura 3.43. Gráfica velocidad vertical de la semilla respecto al tiempo de *Brachypodium stacei* con distintas rugosidades.

3.3. Comparación entre especies

Los apartados 3.1 y 3.2 han servido para calcular la velocidad crítica v_c , velocidad mínima del viento necesaria para el despegue de las semillas, así como la velocidad de vuelo de la semilla, respectivamente. En este apartado se relacionan estos resultados entre las diferentes especies para tener una visión global. En la tabla 3.13. se encuentran estos datos empleando una escala de colores para una visualización más fácil. Siendo los colores rojos los valores menores y los verdosos los mayores, amarillos y naranjas son valores intermedios.

En un primer momento se puede pensar que las semillas con estructura de vuelo su componente horizontal de velocidad será mayor que la vertical, al permanecer en el aire más tiempo que las que no tienen estructura de vuelo. Sin embargo, todas las semillas por lo general tienen la componente horizontal mayor que la vertical en nuestros ensayos. Las ocasiones en las que esto no se cumple son en semillas con estructura de vuelo. Por lo que no hay una clara relación entre la posesión de estructura de vuelo y las componentes horizontal y vertical del vuelo de la semilla.

Además, para la velocidad de la semilla hay que tener en cuenta que la cámara solo enfoca la parte inicial del despegue de la semilla, y como hemos visto en los resultados del apartado 3.2. el máximo valor que obtenemos de velocidad (m/s) en todas las semillas se encuentra en el último momento del vídeo cuando la semilla abandona el área de enfoque. Es justo después del despegue cuando la semilla comienza a “volar/planear” y será entonces cuando se obtengan unos valores más estables del vuelo.

Especie	Estructura de vuelo	Peso (mg)	D (mm)	β	Superficie	vc (m/s)			vmax semilla (m/s)			
						Media	Min	Max	v	vx	vy	vx/vy
Urtica dioica	No	0,57 $\pm$ 0,08	1,82 $\pm$ 0,13	NA	S0	3,7 $\pm$ 0,7	3,2	4,3	1,07	0,95	-0,53	1,79
				NA	S6	5,8 $\pm$ 0,8	5,8	5,8	1,39	1,25	-0,78	1,60
Thymus vulgaris	Sí	0,6 $\pm$ 0,2	2,0 $\pm$ 0,3	NA	S0	2,3 $\pm$ 0,2	2,1	2,8	1,13	0,93	-0,75	1,24
				NA	SA	2,7 $\pm$ 0,2	2,4	3,1	1,38	1,25	-0,58	2,16
				NA	SB	2,7 $\pm$ 0,7	2,2	3,2		NA		
				NA	S3	2,5 $\pm$ 0,3	2,05	2,9		NA		
				NA	S4	2,8 $\pm$ 0,1	2,7	2,9		NA		
Taraxacum officinale	Sí	0,60 $\pm$ 0,10	*D EV = 12,316 *D fil = 0,016	180°	S0	1,1 $\pm$ 0,2	0,9	1,46	0,69	0,22	-0,66	0,33
				45°	S0	1,49 $\pm$ 0,09	1,42	1,59		NA		
				135°	S0	1,08 $\pm$ 0,12	0,95	1,19		NA		
				90°	S0	1,2 $\pm$ 0,2	0,81	1,63	1,06	0,8	-0,69	1,16
				0°	S0	2,3 $\pm$ 0,4	1,53	2,94	2,74	2,68	-0,84	3,19
				0°	SA	3,6 $\pm$ 0,5	3,12	4,53		NA		
				0°	SB	3,3 $\pm$ 0,8	2,82	5,36		NA		
				0°	S2*	3,2	3,18	3,18		NA		
				0°	S3*	3,5	3,47	3,47		NA		
				0°	S6*	3	3	3		NA		
Brachypodium stacei	Sí	4,5 $\pm$ 2	7,9 $\pm$ 0,4	0°	S0	3,3 $\pm$ 1,0	2,5	6,2	1,22	0,88	-0,9	0,98
				0°	SA	3,5 $\pm$ 0,6	2,8	4,3	1,68	1,67	-0,18	9,28
				0°	SB	3,7 $\pm$ 0,3	3,3	4,2	1,1	0,67	-0,91	0,74
				0°	S3	3,88 $\pm$ 0	3,88	3,88	0,76	0,42	-0,64	0,66
				0°	S5	5,0 $\pm$ 0,6	4,6	5,4	2,38	2,22	-0,4	5,55
Brachypodium dystachion	Sí	4 $\pm$ 2	7,8 $\pm$ 0,5	0°	SA	4,3 $\pm$ 0,5	3,2	4,8		NA		
				0°	SB	4,0 $\pm$ 0,2	4,1	4,8		NA		

Tabla 3.13. Resultados morfológicos y valores de velocidad crítica y velocidad máxima alcanzada por la semilla para las distintas especies analizadas durante el trabajo.

De la tabla 3.13. hemos podido representar los valores de velocidad crítica según la rugosidad en las diferentes especies. A simple vista se puede observar como las superficies S0, SA y SB, con rugosidad $\ll 1$, tienen valores de velocidad por debajo de las demás superficies siempre. En el caso particular de S6, se ve cómo afecta sustancialmente al vuelo de Urtica dioica, pero es indiferente en el despegue de Taraxacum officinale.

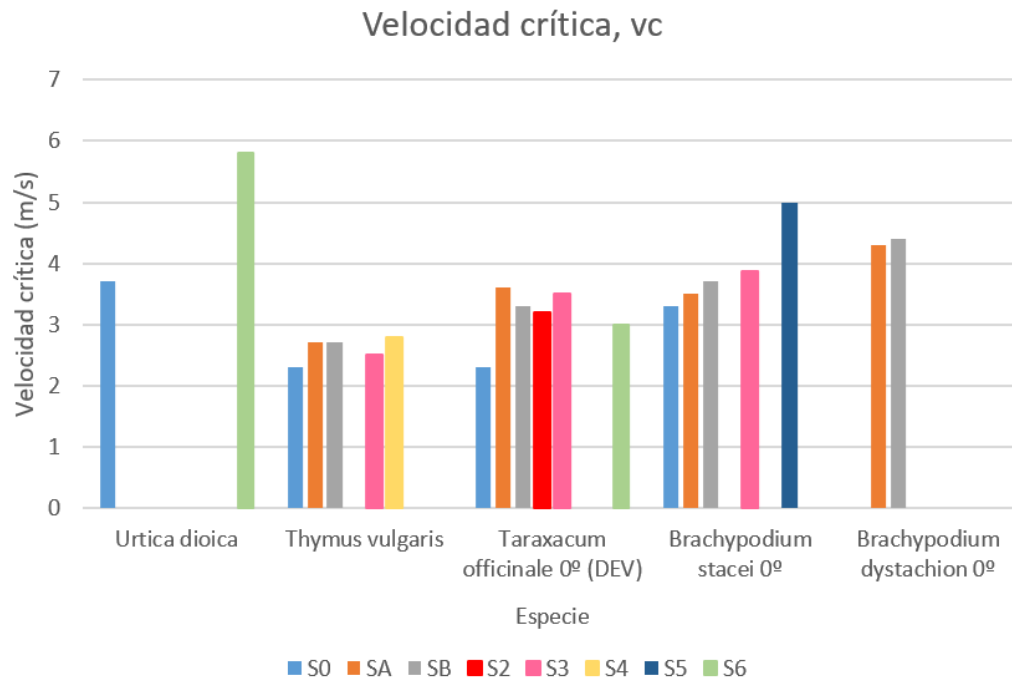


Figura 3.44. Gráfico de barras de la velocidad crítica de las diferentes especies en función de su rugosidad.

En lo que respecta a los números adimensionales obtenidos en el análisis adimensional del apartado 1.5. se puede estudiar la Tabla 3.14. Los números adimensionales Reynolds crítico y Froude crítico se han definido usando la velocidad crítica del viento para el despegue en cada caso.

El número de Froude crítico es, en general, mayor a la unidad, $Fr > 1$, lo cual significa que la fuerza de inercia domina sobre la gravedad. La excepción está en algunos casos del diente de león, en los que $Fr < 1$ debido a que esta semilla es la más ligera (coeficiente de masa mínimo).

Nos centraremos en analizar el número de Reynolds crítico. Como se puede observar, $Re \gg 1$, indicando que la inercia es más importante que la viscosidad. En concreto, se encontramos dos clases de resultados: por un lado, los de orden $Re = 10^2$ Thymus vulgaris [320 - 380] y Urtica dioica [470 - 730] y por otro los de orden $Re = 10^3$ Brachypodium stacei [1800 - 2700] y Taraxacum officinale [2000 - 3000] (Ver Figura 3.45)

Especie	ρ_s / ρ_a promedio	h/D	d/D		β	Superficie	ϵ/D	L/D	Re crítico	Fr crítico
Urtica dioica	95,7	0,30 ± 0,03	0,66 ± 0,02		NA	S0	<<1	<<1	471±82	28±5
Thymus vulgaris	56,74	0,37 ± 0,08	semilla	semilla+ EV	NA	S0	<<1	<<1	317 ± 28	17 ± 2
			0,32 ± 0,04	0,75 ± 0,11	NA	SA	<<1	<<1	364 ± 33	19 ± 2
					NA	SB	<<1	<<1	364 ± 96	19 ± 5
					NA	S3	0,51	3,06	334 ± 38	18 ± 2
Taraxacum officinale	5,87	-	0,25 ± 0,03	0,044 ± 0,003	NA	S4	0,51	1,02	379 ± 17	20 ± 1
					180°	S0	<<1	<<1	945 ± 166	0,10 ± 0,02
					45°	S0	<<1	<<1	1268 ± 76	0,135 ± 0,008
					135°	S0	<<1	<<1	914 ± 103	0,098 ± 0,011
					90°	S0	<<1	<<1	1040 ± 208	0,11 ± 0,02
					0°	S0	<<1	<<1	1942 ± 375	7 ± 1
					0°	SA	<<1	<<1	3061 ± 422	10 ± 1
					0°	SB	<<1	<<1	2844 ± 673	10 ± 2
					0°	S2*	0,12	0,24	2710	9
					0°	S3*	0,08	0,49	2957	10
					0°	S6*	0,74	1,05	2557	9
Brachypodium stacei	59,29	0,155 ± 0,014	0,19 ± 0,02	0,102 ± 0,005	0°	S0	<<1	<<1	1797 ± 518	12 ± 3
					0°	SA	<<1	<<1	1930 ± 305	13 ± 2
					0°	SB	<<1	<<1	2004 ± 178	13 ± 1
					0°	S3	0,13	0,76	2112 ± 0	14 ± 0
					0°	S5	0,25	0,25	2732 ± 323	18 ± 2
Brachypodium dystachion	56,92	0,158 ± 0,010	0,183 ± 0,006	0,092 ± 0,009	0°	SA	<<1	<<1	2304 ± 267	16 ± 2
					0°	SB	<<1	<<1	2137 ± 127	14,4 ± 0,9

Tabla 3.14. Números adimensionales que controlan el problema.

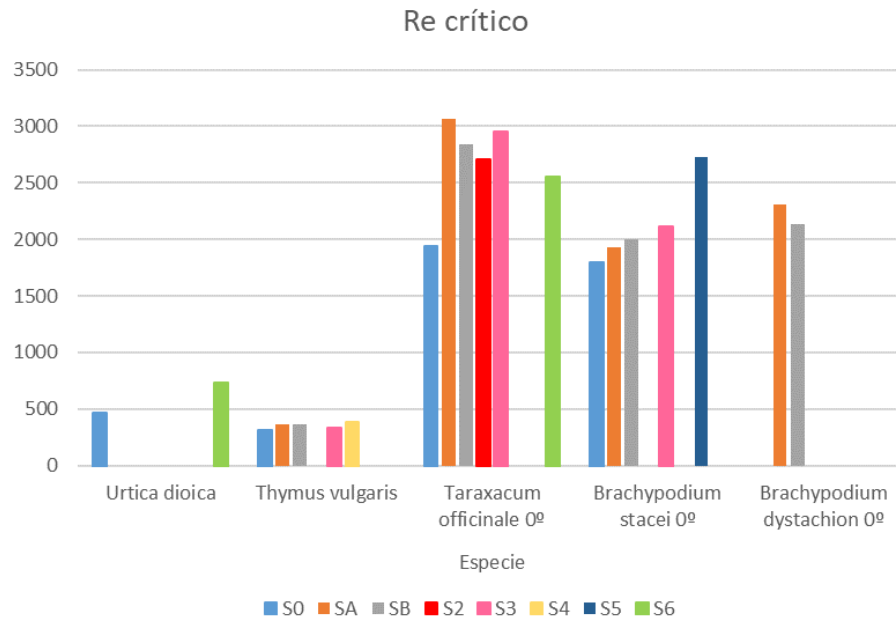


Figura 3.45. Gráfico de barras del número de Reynolds de las diferentes especies en función de su rugosidad.

Para el caso concreto de *Taraxacum officinale* se analizan los números de Reynolds para los diferentes ángulos de ataque estudiados, manteniendo la misma superficie: S0 (Figura 3.46) Siendo en este caso el intervalo [914 - 1942]. El valor mayor corresponde a 0°, siendo el segundo mayor valor para 45° de 1268, que se separa bastante del valor anterior.

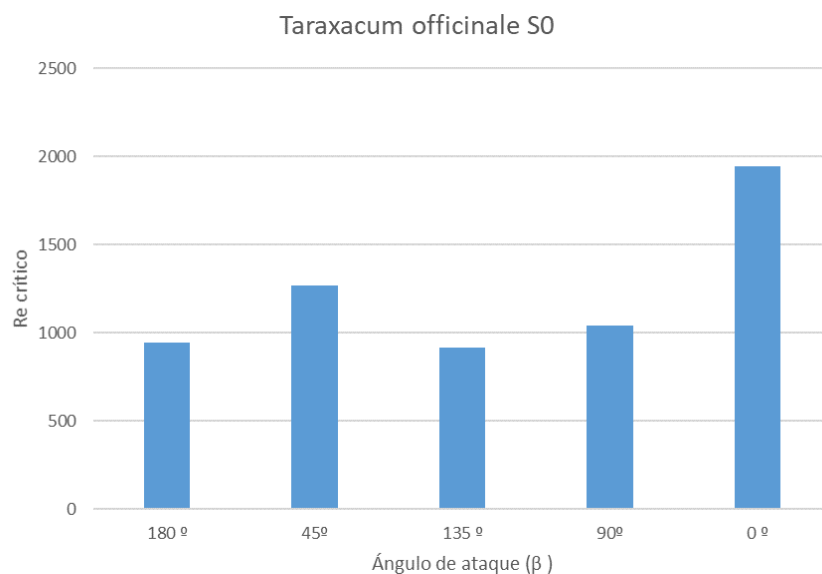


Figura 3.46. Gráfico de barras del número de Reynolds de *Taraxacum officinale* para la superficie lisa, S0, en función del ángulo de ataque.

Para el diente de león como se dijo anteriormente se escogieron dos longitudes características para obtener dos posibles números de Reynolds, el del pappus completo y el de un filamento individual. Cummins y su equipo en 2018 revelaron que el vilano de un diente de león se beneficia de un “efecto de pared” para números de Reynolds bajos, es decir, los calculados con el filamento individual: los filamentos vecinos interactúan fuertemente unos con otros por la gruesa capa límite alrededor de cada filamento, lo que causa una reducción considerable en el flujo de aire a través del pappus que se comporta como una membrana permeable.

En la naturaleza, el número de Reynolds usando el diámetro del filamento es menor que uno, y por lo tanto correspondería un flujo laminar. Sin embargo, en nuestro estudio, es del orden de 100 y 1000 posiblemente debido a un modelo de filamentos más gruesos. En el trabajo de Yi-Ming Du y colaboradores, 2021, usando el diámetro del pappus se obtuvieron unos números de Reynolds entre 154 a 924, $Re = 0$ (10^2), pero el Re correspondiente a la velocidad terminal de la semilla ($v_{\text{minima}} = 0.2346$ m/s) mucho menor que la velocidad mínima para el despegue de la semilla. Así como Cummins 2018, utilizó un número de Reynolds representativo de 400, usando también la velocidad terminal. Yangyang Dong y colaboradores, 2021 trabajaron en números de Reynolds entre 100-400.

Para concluir este apartado, se representan las gráficas adimensionales (figuras 3.47-3.50) correspondientes al apartado 3.2: velocidad de la semilla respecto al tiempo. La representación gráfica es el cociente de la velocidad de la semilla (m/s) entre la velocidad crítica (m/s) en el eje Y, frente al tiempo adimensionalizado con $t = D / v$, el t tiempo asociado a la velocidad del viento y al tamaño de la semilla.

En todas estas gráficas la velocidad de la semilla es menor que la velocidad del viento, ya que todos los resultados son menores a 1. Por lo que todas las semillas vuelan a una velocidad menor que la del viento. La relación de velocidad menor la encontramos en *Urtica dioica* con 0.25, la única especie sin estructura de vuelo. A la que le sigue *Brachypodium stacei* con 0.44 prácticamente el doble, semilla elipsoidal con 1 filamento cilíndrico, con un valor similar se encuentra

Thymus vulgaris con 0.51, semilla elipsoidal con 5 filamentos cilíndricos. La última semilla es *Taraxacum officinale*, cuya máxima relación la alcanza con el ángulo de ataque a 90° , obteniendo 0.82, mientras con la posición natural de 0° tiene en torno a 0.6. Por lo tanto, vemos como a medida que la semilla consta de estructura de vuelo y con más número de filamentos, más cercana a la velocidad del viento será la velocidad de la semilla.

Cada gráfica adimensional viene seguida de una tabla donde se pueden consultar de cada ensayo la superficie empleada, sus rugosidades relativas correspondientes, número de Reynolds crítico y secuencia de imágenes correspondientes al apartado 3.1.

En todos los casos la velocidad aumenta con el paso del tiempo. De manera general, se puede observar como la rugosidad no tiene un efecto considerable al representarse los diferentes ensayos de manera bastante agrupada con un mismo recorrido. Para el caso concreto del *Brachypodium*, que ha sido la semilla donde más cambios de superficie se realizaron, si se puede notar una variación mayor. Hay un caso en específico, SB_2, donde la semilla tarda mucho más que las demás en despegar, esto podría deberse al rozamiento de la placa misma.

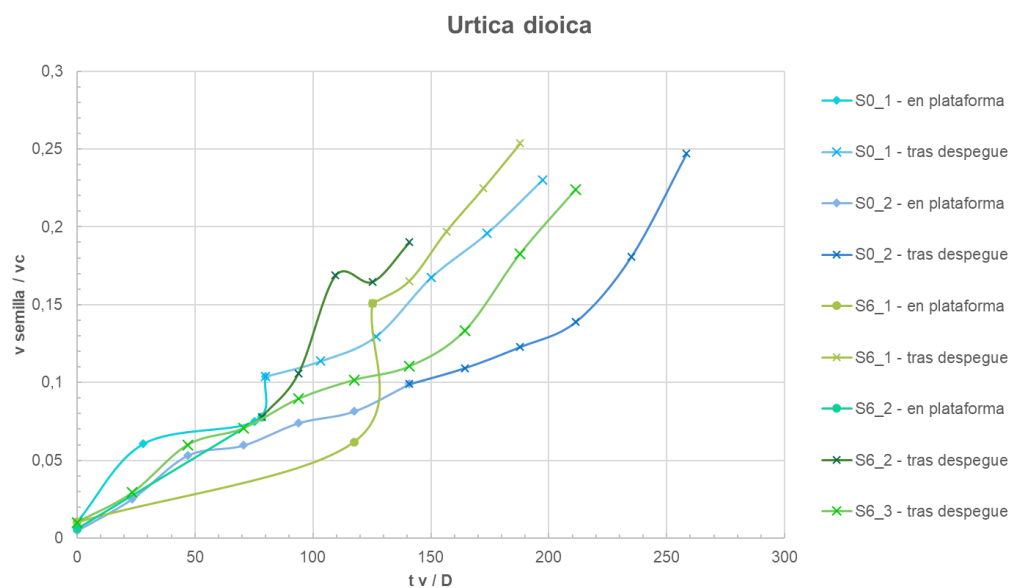


Figura 3.47. Gráfica adimensional velocidad de la semilla respecto al tiempo de *Urtica dioica*.

Gráfica adimensional Urtica dioica				
Superficie	ϵ/D	L/D	Re crítico	Figura
S0_1	$\ll 1$	$\ll 1$	540	3.2
S0_2	$\ll 1$	$\ll 1$	545	3.3
S6_1	4,98	7,12	580	3.4
S6_2	4,98	7,12	782	NA
S6_3	4,98	7,12	782	3.5

Tabla 3.15. Rugosidades relativas, Reynolds y secuencia de fotos correspondientes a los ensayos de la gráfica adimensional de Urtica dioica.

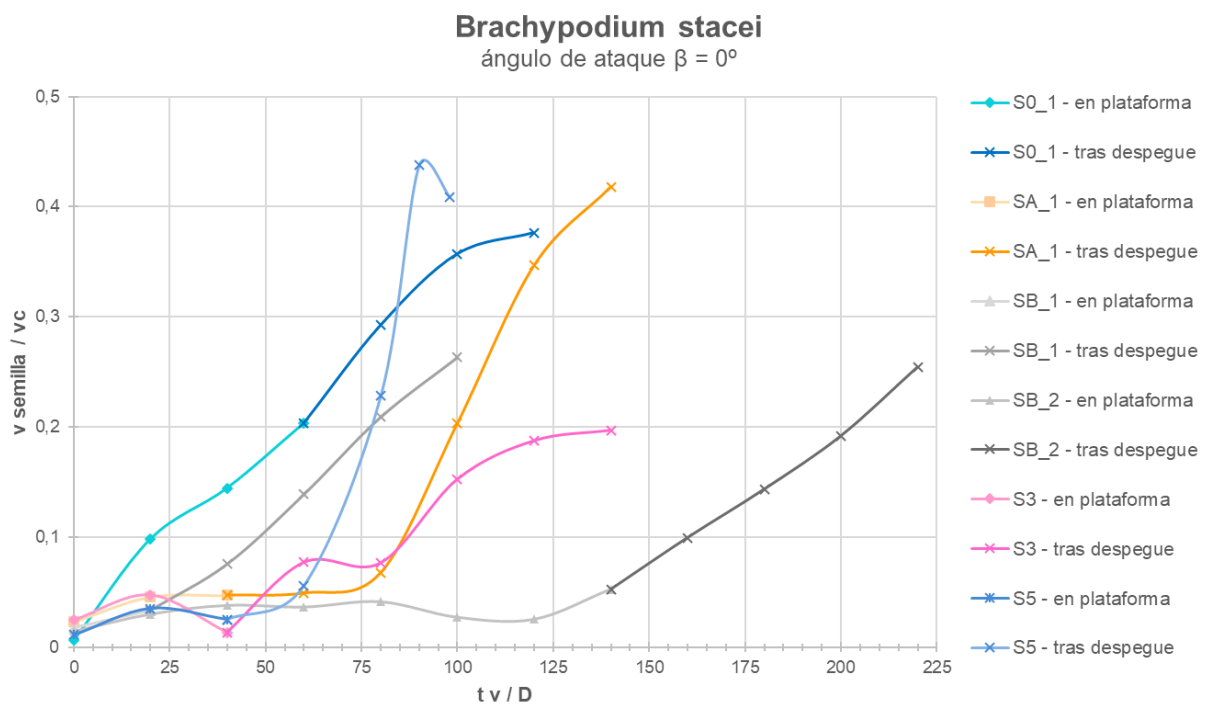


Figura 3.48. Gráfica adimensional velocidad de la semilla respecto al tiempo de *Brachypodium stacei*.

Gráfica adimensional <i>Brachypodium stacei</i>				
Superficie	ε/D	L/D	Re crítico	Figura
S0	$\ll 1$	$\ll 1$	1763	3.23
SA	$\ll 1$	$\ll 1$	2188	3.23
SB_1	$\ll 1$	$\ll 1$	2270	3.24
SB_2				NA
S3	0,13	0,76	2112	3.25
S5	0,25	0,25	2961	3.25

Tabla 3.16. Rugosidades relativas, Reynolds y secuencia de fotos correspondientes a los ensayos de la gráfica adimensional de *Brachypodium stacei*.

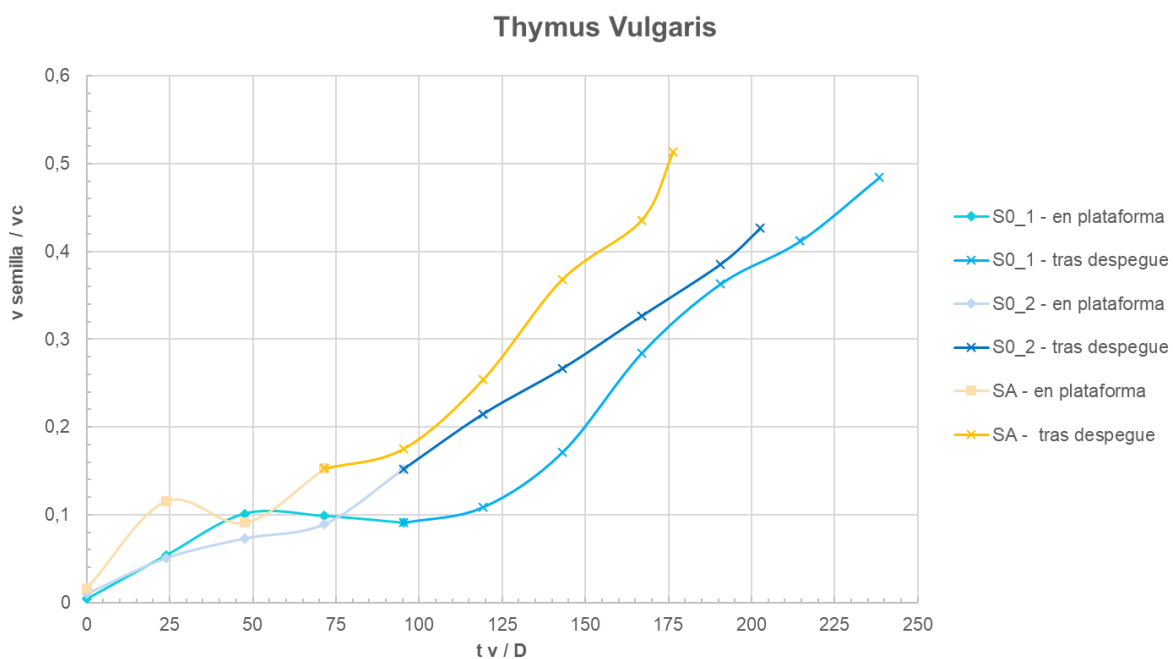


Figura 3.49. Gráfica adimensional velocidad de la semilla respecto al tiempo de *Thymus vulgaris*.

Gráfica adimensional Thymus vulgaris				
Rugosidad	ε/D	L/D	Re crítico	Figura
S0_1	$\ll 1$	$\ll 1$	318	3.8
S0_2	$\ll 1$	$\ll 1$	318	NA
SA	$\ll 1$	$\ll 1$	364	3.8

Tabla 3.17. Rugosidades relativas, Reynolds y secuencia de fotos correspondientes a los ensayos de la gráfica adimensional de Thymus vulgaris.

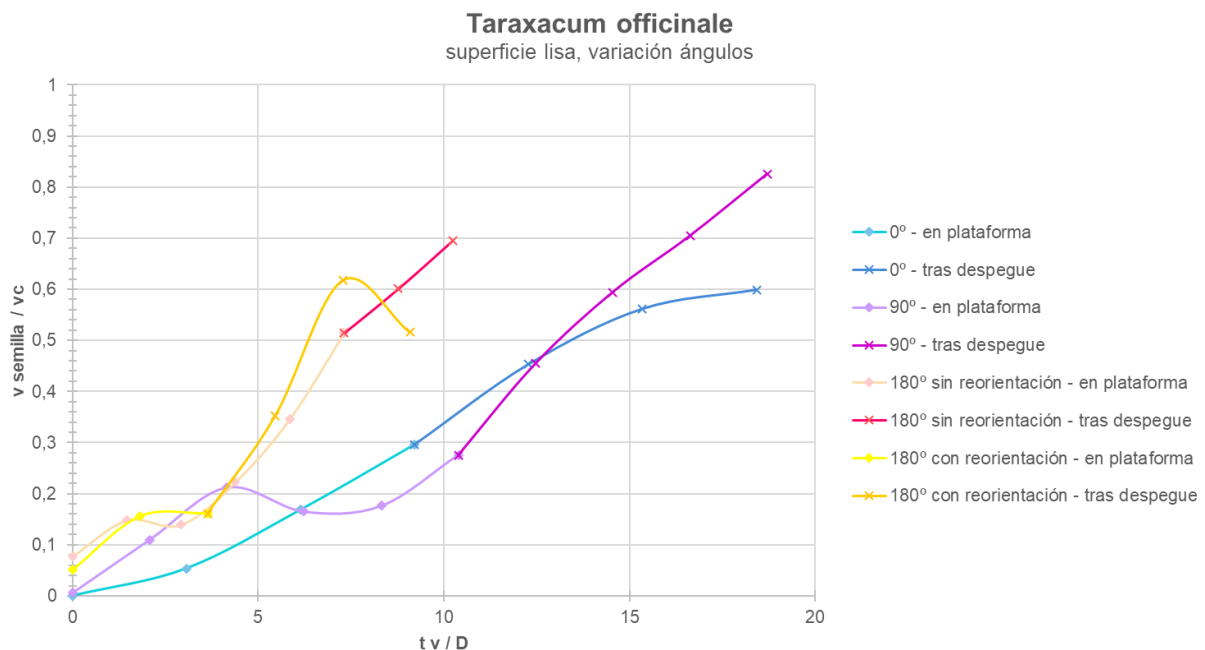


Figura 3.50. Gráfica adimensional velocidad de la semilla respecto al tiempo de Taraxacum officinale usando el diámetro del vilano.

Para el diámetro del filamento se obtiene la misma gráfica, pero con el eje del tiempo con un valor máximo de 15000 debido a la disminución del tamaño del diámetro. La superficie empleada es la superficie lisa, con lo cual ε/D y L/D serán $\ll 1$.

Gráfica adimensional Taraxacum officinale		
Ángulo de ataque	Re crítico	Figura
0°	1611	NA
90°	1091	3.13
180° sin reorientación	767	3.12
180° con reorientación	955	3.11

Tabla 3.18. Rugosidades relativas, Reynolds y secuencia de fotos correspondientes a los ensayos de la gráfica adimensional de Taraxacum officinale.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Para la realización de los ensayos requeridos para el estudio de la dispersión secundaria de las semillas, en primer lugar, se caracterizaron las siete especies (*Arabidopsis thaliana*, *Ononix natrix*, *Urtica dioica*, *Thymus vulgaris*, *Taraxacum officinale* y *Brachypodium stacei/distachyon*) de semillas a utilizar en morfología y peso, a continuación, fue necesario el acondicionamiento del túnel de viento, así como su calibración midiendo la uniformidad de flujo e intensidad de turbulencia.

Para estudiar la trayectoria de la semilla y su velocidad instantánea fue necesaria la grabación de videos usando una cámara de alta velocidad con una fuente luminosa enfrentada a la misma, quedando el túnel de viento entre ambos. Para la variación de la rugosidad de la superficie del suelo de la semilla se generaron mediante impresión 3D de plástico las superficies que emulan el sustrato, así como un soporte de sujeción de las distintas plataformas.

Tras definir las variables relevantes del problema, se empleó el análisis dimensional para obtener los números adimensionales que controlan el problema y se estableció la metodología experimental a seguir.

Con el despegue de la semilla en el túnel de viento y su grabación se pudieron obtener dos variables de relevancia: la velocidad mínima del viento necesaria para el despegue de las semillas y la velocidad de vuelo de las semillas. A la hora de representar los resultados fue de interés separarlos en función de si las semillas disponían de estructura de vuelo (*Thymus vulgaris*, *Taraxacum officinale* y *Brachypodium stacei/distachyon*) o no (*Arabidopsis thaliana*, *Ononix natrix*, *Urtica dioica*).

Por último, se comparan los resultados entre las cuatro especies de las que obtuvimos resultados de despegue (*Urtica dioica*, *Thymus vulgaris*, *Taraxacum officinale* y *Brachypodium stacei/distachyon*), considerando el ángulo de ataque, la rugosidad del sustrato, la velocidad mínima del viento requerida para el despegue, el

número de Reynolds, el número de Froude y la velocidad máxima alcanza por la semilla.

Hemos visto como las semillas que tienen estructura de vuelo tienden a reorientarse al mismo ángulo de ataque de 0° . Por otro lado, la rugosidad influye en la velocidad mínima del viento requerida para el despegue. La superficie lisa de rugosidad cero, siempre tendrá valores de velocidad menores que cualquier otro tipo de rugosidad. Sin embargo, dentro de las diferentes rugosidades, no hay una diferencia significativa.

En lo que respecta a la velocidad máxima de la semilla calculada por análisis fotográfico incluso teniendo en cuenta que por este método podría aumentar el error, pudimos comparar los resultados de dos especies con las del análisis de la dispersión primaria teniendo resultados bastante coherentes. También se ha visto como no hay una clara relación entre la posesión de estructura de vuelo y las componentes horizontales y verticales del vuelo de la semilla. En un primer momento se puede pensar que las semillas con estructura de vuelo, como permanecerán en el aire más tiempo que las que no tienen estructura de vuelo, la componente horizontal de velocidad será mayor que la vertical, sin embargo, todas las semillas por lo general tienen la componente horizontal mayor que la vertical en nuestros ensayos.

Se ha puesto en relieve cómo las variables usadas para definir el análisis dimensional resultan coherentes para las semillas sin estructura de vuelo, sin embargo, para las semillas con estructura de vuelo, es difícil poder generalizar el problema pues cada semilla es única. Cabe mencionar el diente de león (*Taraxacum officinale*) el cual ha sido foco de atención en los últimos años por numerosos investigadores debido a su peculiar morfología, la cual depende de factores no tenidos en cuenta en este estudio como la porosidad o la humedad.

En resumen, se ha podido observar cómo para el estudio de la dispersión secundaria al tenerse en cuenta tantos factores que pueden influir en el vuelo de la semilla, sería necesario realizar más ensayos para poder analizar estos factores individualmente basándose en las necesidades de cada semilla.

Por ello, en cuanto al trabajo futuro, habría que realizar más ensayos para poder estudiar en más profundidad el efecto individual de cada uno de los parámetros de control en los resultados. Además, sería de interés el estudio individual de cada especie para poder obtener resultados más concluyentes, poniendo especial énfasis si la semilla presenta estructura de vuelo. Las diversas morfologías que se pueden encontrar además de afectar como es obvio a la geometría hacen que aparezcan en el problema otras variables a tener en cuenta.

En cuanto a las rugosidades, hemos visto cómo variando la relación anchura/altura podemos encontrar diferentes tipos de vórtices. Para estudiar mejor este efecto, habría que repetir estos ensayos numerosas veces para poder establecer un patrón claro. En nuestro caso, al haber tantas variables en juego, es difícil poder extraer conclusiones claras respecto a este parámetro. También se podrían estudiar superficies basadas en la naturaleza, para emular así ciertos sustratos naturales de interés.

Otro parámetro que se ha visto que tiene gran importancia y sería interesante estudiar su influencia con más detalle es la intensidad turbulenta del flujo de aire incidente. En nuestro caso no fue posible tener un mejor control de la intensidad turbulenta, pudimos ver la diferencia entre un túnel de viento sin/con malla en el acondicionador de flujo, pero más allá podría intentar poner valor a esta turbulencia y hacer que sea lo más real posible a la de la naturaleza.

También sería conveniente, una vez se ha encontrado la velocidad crítica, realizar un análisis del vuelo de las semillas con el mismo valor del número de Reynolds.

Por último, sería de gran interés caracterizar el flujo de aire alrededor de la semilla para poder explicar el comportamiento observado. Para ello, se podrían realizar visualizaciones en el túnel de viento sembrando partículas trazadoras y realizar medidas con técnicas láser, como Particle Image Velocimetry (PIV).

5. BIBLIOGRAFÍA

Sun, B; Guo, X. (2022) Pneumatic Shape and Drag Scaling Laws of the Dandelion. Preprints.

Seale, M; Kiss, A; Bovio, S. et al. (2022) Dandelion pappus morphing is actuated by radially patterned material swelling. *Nat Commun* 13, 2498.

Fernández, A (2022). Estudio experimental de la dispersión de semillas. Parte II: Caracterización del vuelo de las semillas. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Jaén.

Valenzuela, V. (2021). Caracterización de la capacidad dispersiva de hierbas anuales del olivar. Una aproximación mediante modelos mecanicistas y túnel de viento. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Jaén.

Fu-Sheng Qiu, Bo-Wen Wang, Yi-Ming Du, and Hui-Yuan Qian (2021) Numerical investigation on the flow characteristics of model dandelion seeds with angles of attitude. *Physics of Fluids* 33, 113107

Yangyang Dong, Kexin Hu, Yongbin Wang, and Zijian Zhang (2021) The steady vortex and enhanced drag effects of dandelion seeds immersed in low-Reynolds-number flow. *AIP Advances* 11, 085320.

Fu-Sheng Qiu, Tian-Bao He, and Wen-Yu Bao (2020) Effect of porosity on separated vortex rings of dandelion seeds. *Physics of Fluids* 32, 113104

Minghu Liu et al. (2020) A video camera recording method for measuring terminal velocity of seed dispersal by wind. Springer Nature.

Seale, M. and Nakayama, N. (2020) From passive to informed: mechanical mechanisms of seed dispersal. *New Phytol*, 225: 653-658.

Apuntes EPSJaen Simulación de flujos (2020) Proceso de formación de la estela.

P. G. Ledda, L. Siconolfi, F. Viola, S. Camarri, and F. Gallaire (2019) Flow dynamics of a dandelion pappus: A linear stability approach. *Phys. Rev. Fluids* 4, 071901

Liang et al. (2019) How do diaspore traits, wind speed and sand surface configuration interact to determine seed burial during wind dispersal. *Plant Soil*, 440 :357–368.

Rogers et al. (2019) The total dispersal kernel: a review and future directions. *AoB PLANTS* 11, No. 5.

Zhu, J. et al. (2019) A trade-off between primary and secondary seed dispersal by wind. *Plant Ecol* 220, 541–552.

Johnson et al. (2019) Rapid changes in seed dispersal traits may modify plant responses to global change. *AoB PLANTS* 11.

- Cummins, C. et al. (2018)** A separated vortex ring underlies the flight of the dandelion. *Nature* 562, 414–418.
- Andersson et al. (2018)** Instabilities in the wake of an inclined prolate spheroid.
- Jaramillo, J. (2017)** Design and construction of a low speed wind tunnel.
- Zotz et al. (2016)** Measuring the terminal velocity of tiny diaspores. *Seed Science Research*.
- Meng, Q. et al (2016)** Hydroactuated Configuration Alteration of Fibrous Dandelion Pappi: Toward Self-Controllable Transport Behavior. *Adv. Funct. Mater.*, 26: 7378-7385.
- Casseau, V. et al. (2015)** Morphologic and Aerodynamic Considerations Regarding the Plumed Seeds of *Tragopogon pratensis* and Their Implications for Seed Dispersal. *PLoS ONE* 10(5).
- Teller et al. (2014)** Dispersal under duress: Can stress enhance the performance of a passively dispersed species? *Ecology*, 95(10): 2694–2698
- Roccia et al. (2013)** Estudio del “vuelo” de semillas autorrotantes. *Mecánica Computacional* 32: 1481-1500.
- Nathan et al. (2011)** Mechanistic models of seed dispersal by wind. *Theor Ecol* (2011) 4:113–132.
- Marchetto et al. (2010)** Applications of particle image velocimetry for seed release studies. *Ecology*, 91(8): 2485–2492.
- Cattafesta et al. (2010)** Fundamentals of Wind-Tunnel Design. Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Florida.
- Basic Principles of Wind Tunnel Design (2009)**. *Qpedia* 3 (2): 10-13.
- Wilson et al. (2009)** Something in the way you move: dispersal pathways affect invasion success. *Trends in Ecology and Evolution* 24 No.3
- de Langre, E. (2008)** Effects of Wind on Plants. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 40: 141–68.
- Kalpakjian, S. y Schmid, S. (2008)** “Rugosidad y medición superficial; fricción, desgaste y lubricación” En: *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Quinta edición. México, Pearson Educación. pp. 1036 - 1042.
- Skarpaas, O. y Shea, K. (2007)** Dispersal patterns, dispersal mechanisms, and invasion wave speeds for invasive thistles. *The american naturalist* 170 No. 3.
- Tropea et al. (2007)** “Dimensional Analysis and Data Organization” En: *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. pp. 42 - 56.
- Munson et al. (2006)** Fundamentals of Fluid Mechanics. Sixth Edition. John Wiley & Sons, Inc.

- Li, Y. et al. (2006)** Oil content of Arabidopsis seeds: the influence of seed anatomy, light and plant-to-plant variation. *Phytochemistry*. 2006 May;67(9):904-15.
- Katul et al. (2005)** Mechanistic analytical models for long-distance seed dispersal by wind. *The american naturalist* 166 No. 3.
- Skarpaas et al. (2005)** Environmental variability and the initiation of dispersal: turbulence strongly increases seed release. *Proc. R. Soc. B*. 273: 751–756.
- Schurr et al. (2005)** A mechanistic model for secondary seed dispersal by wind and its experimental. *Journal of Ecology* 93: 1017–1028.
- Jiménez, J. (2004)** Turbulent flows over rough walls. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 36: 173–96
- Fernández Feria, R. (2001)** *Mecánica de Fluidos*.
- Jongejans, E. y Telenius, A. (2001)** Field experiments on seed dispersal by wind in ten umbelliferous species (Apiaceae). *Plant Ecology* 152: 67–78.
- Finnigan, J. (2000)** Turbulence in plant canopies. *Annual Review of Fluid Mechanics* 32: 519–571.
- Jongejans, E. y Schippers, P. (1999)** Modeling seed dispersal by wind in herbaceous species. *Oikos* 87: 362-372.
- Murren, J.C. y Ellison, A.M. (1998)** Seed dispersal characteristics of *Brassavola nodosa* (Orchidaceae). *American Journal of Botany* 85(5): 675–680.
- Johnson, R. (1998)** *The Handbook of Fluid Dynamics*.
- Schetz, J.A y Fuhs, A.E (1996)** “Lifting surfaces” En: *Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinery: Applications of Fluid Dynamics*, Volume III. John Wiley & Sons, Inc. pp. 1673 - 1684.
- Vogel, S. (1994)** *Life in moving fluids: The physical biology of flow*.
- Chambers, J.C. y MacMahon, J.A. (1994)** A day in the life of a seed: Movements and fates of seeds and their implications for natural and managed systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst* 25: 263-292.
- Johnson, E.A. y Fryer, G.I. (1992)** Physical characterization of seed microsites - movement on the ground. *Journal of Ecology* 80 (4): 823-836.
- Greene, D.F. y Johnson, E.A. (1990)** The aerodynamic of plumed seeds. *Functional Ecology* 4: 117-125.
- Voguel, S. (1989)** Drag and reconfiguration of broad leaves in high winds. *Journal of Experimental Botany* 40 (217): 941-948.

Norberg, R.A. (1973) Autorotation, self-stability, and structure of single-winged fruits and seeds (samaras) with comparative remarks on animal flight. Biol. Rev 48: 561-596

Manual Computer Controlled Wind Energy Unit, with SCADA. Edibon.

Descripción Arabidopsis thaliana. <http://seresmodelicos.csic.es/planta.html>

Descripción y figura Ononix natrux.

<https://bioeduca.malaga.eu/es/catalogo-de-especies/detalle-de-la-especie/Pegamoscas/#!tab1>

Descripción y figura Urtica dioica. <https://www.asturnatura.com/especie/urtica-dioica.html>

<https://www.naturalista.mx/taxa/51884-Urtica-dioica>

6. ANEXOS

6.1. Anexo I: Análisis de datos en Matlab para comprobar la uniformidad del flujo

Una vez conocidos los datos de velocidad, hacemos la medición del área transversal completa. Las hicimos para diferentes regímenes de giro: 40 y 100 %, así como para el túnel de viento con y sin acondicionador de flujo.

Se barre la salida tomando medidas con el anemómetro por cada centímetro cuadrado como se explica en el apartado 2.1.1 de la memoria. En un primer lugar, se reflejan en un Excel que posteriormente será exportado como archivo de texto, para que posteriormente pueda ser leído y graficado mediante el siguiente código de Matlab. Suponemos que la velocidad en los contornos es nula, debido a la condición de no deslizamiento.

Es importante localizar los archivos de texto en la misma ubicación que el código *ContornoVelocidad.m* para que puedan ser leídos sin problema. Además, para obtener la gráfica de colores sólidos que se busca, es necesario que en la misma carpeta se encuentre también la función *gridfit.m*

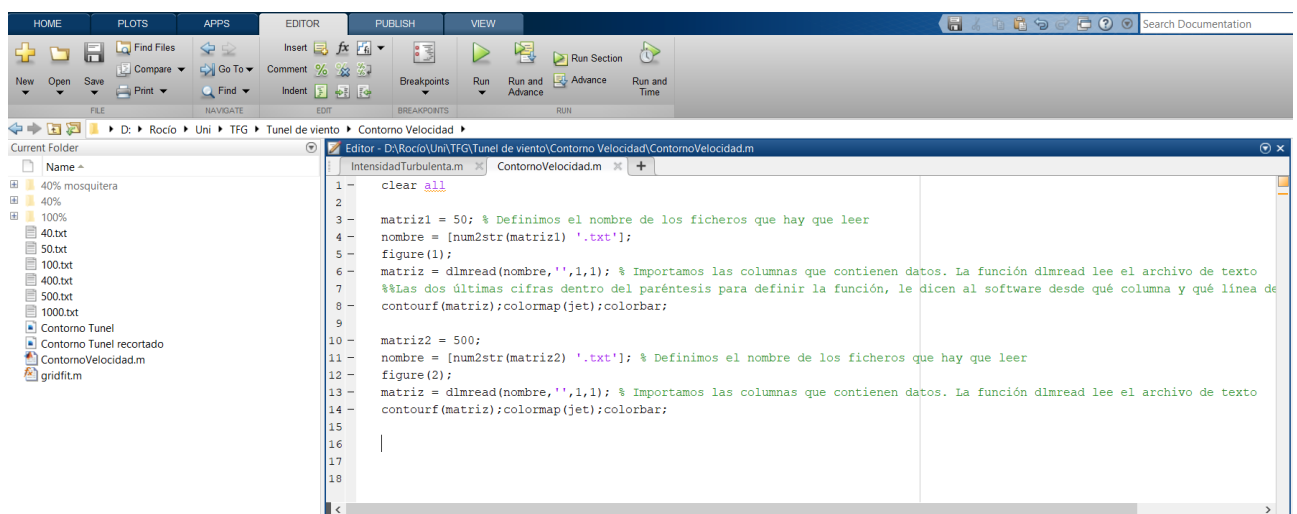


Figura 6.1. Código realizado en el software Matlab.

matriz1 = 100; % Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer. En este caso el archivo de texto que se leerá se llama 100.

```
nombre = [num2str(matriz1) '.txt'];
```

```
figure(1);
```

```
matriz = dlmread(nombre,"",1,1); % Importamos las columnas que contienen datos. La función dlmread lee el archivo de texto
```

%%Las dos últimas cifras dentro del paréntesis para definir la función, le dicen al software desde qué columna y qué línea debe empezar a leer.

```
contourf(matriz);colormap(jet);colorbar; % contourf(Z) crea un gráfico de contorno lleno que contiene las isolíneas de la matriz Z,
```

%%donde Z contiene valores de altura en el plano x-y.

Como se observa en la siguiente imagen, se obtiene la gráfica con colores sólidos. Las medidas de los ejes están en centímetros, coincidiendo con las medidas reales del área de salida del túnel. La escala de color representa la velocidad en m/s.

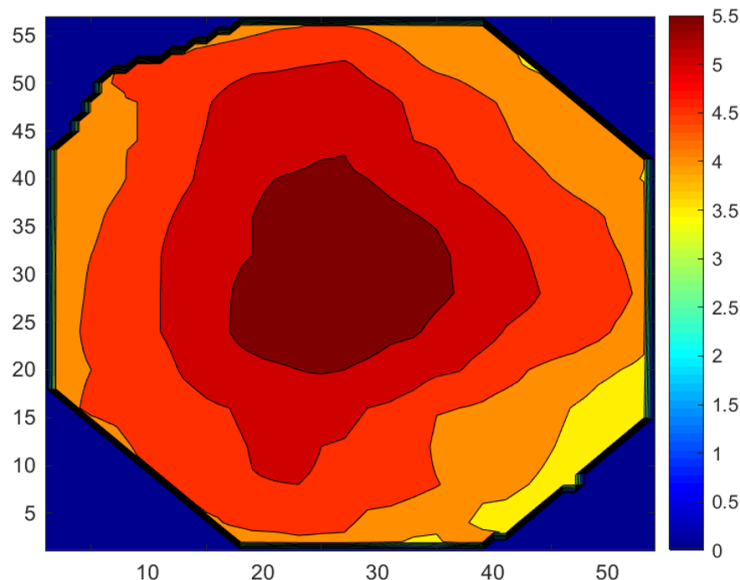


Figura 6.2. Gráfica velocidad en m/s.

La uniformidad del flujo se representa adimensionalmente y, como era lo esperado, se encuentran valores cercanos a la unidad (lo que quiere decir que son los máximos) en el centro de la superficie transversal. Cerca de las paredes, los valores se vuelven más cercanos a cero por los esfuerzos superficiales.

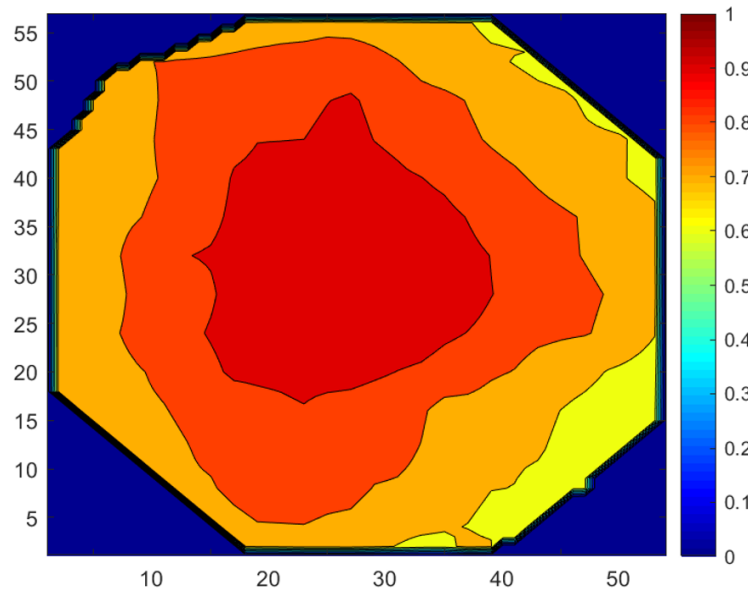


Figura 6.3. Gráfica velocidad adimensional.

6.2. Anexo II: Medición intensidad turbulenta

A pesar de que en los ensayos en laboratorio en un túnel de viento la velocidad es el parámetro controlado, es imposible que siempre se de la misma velocidad impuesta. Esta variación de velocidad en el tiempo es lo que se conoce como turbulencia.

Como se explica en el trabajo principal, para obtenerla mediremos la velocidad del viento a tiempo real usando un hilo caliente PCE, que permite obtener la variación de velocidad por segundo. El software Meeter leerá y exportará los datos obtenidos por el anemómetro en un archivo de texto y en un gráfico. Siendo representado en el eje x, el tiempo en segundos y en el eje y, la velocidad en m/s.

NO.	DATE	TIME	VELOCITY (m/s)	TEMPERATURE (C)	FLOW (CMM)	AREA (m2)	
1		02/01/2002	9:18:24	0	31	0	11.11
2		02/01/2002	9:18:25	0	31	0	11.11
3		02/01/2002	9:18:26	0	31	0	11.11
4		02/01/2002	9:18:27	0	31	0	11.11
5		02/01/2002	9:18:28	0	31	0	11.11
6		02/01/2002	9:18:29	0	31	0	11.11
7		02/01/2002	9:18:30	0.12	31	79.991	11.11
8		02/01/2002	9:18:31	1.648	31	1093.223	11.11
9		02/01/2002	9:18:32	4.196	30.9	2793.053	11.11
10		02/01/2002	9:18:33	6.688	30.8	4452.888	11.11
11		02/01/2002	9:18:34	6.712	30.7	4472.885	11.11
12		02/01/2002	9:18:35	6.868	30.7	4572.875	11.11
13		02/01/2002	9:18:36	6.496	30.6	4326.233	11.11
14		02/01/2002	9:18:37	6.848	30.6	4559.543	11.11
15		02/01/2002	9:18:38	6.568	30.5	4372.895	11.11
16		02/01/2002	9:18:39	6.927	30.4	4612.872	11.11
17		02/01/2002	9:18:40	6.654	30.4	4432.89	11.11
18		02/01/2002	9:18:41	6.947	30.3	4626.204	11.11
19		02/01/2002	9:18:42	6.733	30.3	4486.218	11.11
20		02/01/2002	9:18:43	6.119	30.2	4072.926	11.11
21		02/01/2002	9:18:44	7.059	30.2	4699.53	11.11
22		02/01/2002	9:18:45	6.644	30.2	4426.224	11.11
23		02/01/2002	9:18:46	6.626	30.2	4412.892	11.11
24		02/01/2002	9:18:47	6.598	30.2	4392.894	11.11
25		02/01/2002	9:18:48	6.757	30.2	4499.55	11.11
26		02/01/2002	9:18:49	6.773	30.1	4512.881	11.11
27		02/01/2002	9:18:50	6.779	30.1	4512.881	11.11
28		02/01/2002	9:18:51	6.759	30.1	4499.55	11.11
29		02/01/2002	9:18:52	6.563	30.1	4372.895	11.11
30		02/01/2002	9:18:53	6.583	30.1	4386.228	11.11
31		02/01/2002	9:18:54	6.801	30.1	4532.879	11.11
32		02/01/2002	9:18:55	6.966	30.1	4639.536	11.11
33		02/01/2002	9:18:56	6.933	30.1	4619.538	11.11
34		02/01/2002	9:18:57	6.713	30.1	4472.885	11.11
35		02/01/2002	9:18:58	6.494	30.1	4326.233	11.11
36		02/01/2002	9:18:59	6.521	30.1	4346.231	11.11
37		02/01/2002	9:19:00	6.809	30.1	4532.879	11.11
38		02/01/2002	9:19:01	6.75	30.1	4499.55	11.11
39		02/01/2002	9:19:02	7.201	30.1	4799.52	11.11
40		02/01/2002	9:19:03	6.764	30	4506.216	11.11
41		02/01/2002	9:19:04	6.768	30	4506.216	11.11
42		02/01/2002	9:19:05	6.58	30	4386.228	11.11
43		02/01/2002	9:19:06	6.574	30	4379.562	11.11
44		02/01/2002	9:19:07	6.742	30	4492.883	11.11
45		02/01/2002	9:19:08	6.716	30	4472.885	11.11
46		02/01/2002	9:19:09	6.406	30	4266.24	11.11
47		02/01/2002	9:19:10	6.727	30	4479.552	11.11
48		02/01/2002	9:19:11	6.733	30	4486.218	11.11
49		02/01/2002	9:19:12	6.722	30	4479.552	11.11

Figura 6.4. Ejemplo archivo de texto generado por el software Meeter con los datos extraídos del anemómetro.

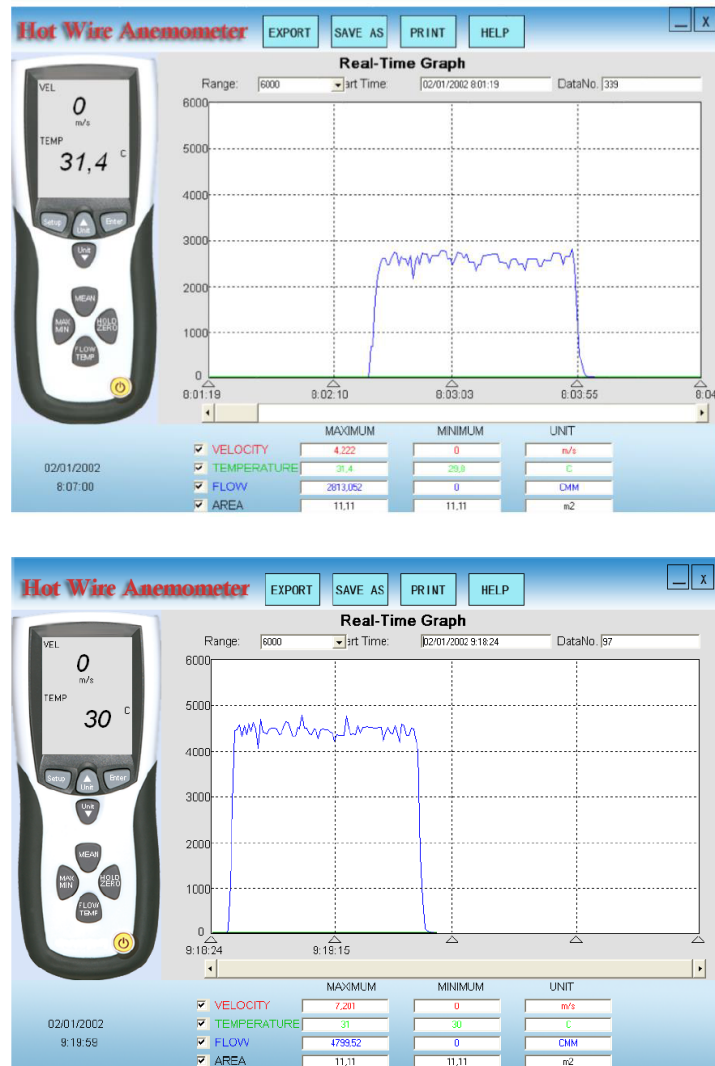


Figura 6.5. Ejemplo Software y gráfica. Imagen superior para el 50% de potencia, imagen inferior para el 100% de potencia.

Medimos los datos de un minuto y medio (tiempo medio para que vuelen las semillas) para el 50, 60, 70, 75, 80, 90 y 100% de potencia del ventilador, repitiendo 3 veces las mediciones para hacer una media de la intensidad que se da para cada velocidad.

Como ha sido explicado en el anterior apartado, para que Matlab pueda leer archivos de texto es necesario que estos se encuentren en la misma carpeta que el código *IntensidadTurbulenta.m*. Habrá un archivo de texto por cada medición, con lo cual para cada velocidad habrá tres.

```
clear all
```

```
close all
```

```
%50ventilador 3.3 m/s
```

```
essais = [50001,50002,50003];
```

```
%Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(1)) '.txt'];
```

```
%Importamos las columnas que contienen datos de velocidad.
```

```
run = dlmread(nombre,"",1,3); %La funcion dlmread lee las columnas que se le  
indiquen del archivo de texto, en este caso las dos últimas columnas.
```

```
%Creamos vector de flujo con los datos de la columna importada, para ensayo 1  
velocidad 50%
```

```
flow50001 = run(:,1);
```

```
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
```

```
flow50001(flow50001==0)=[];
```

```
%Mismo proceso para los otros dos archivos de texto del 50%ventilador
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(2)) '.txt'];
```

```
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
```

```
run = dlmread(nombre,"",1,3); %La función dlmread lee las columnas que se le  
indiquen del archivo de texto
```

```
%Creamos vector de flujo para ensayo 2 velocidad 50%
```

```
flow50002 = run(:,1);
```

```
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
```

```
flow50002(flow50002==0)=[];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(3)) '.txt'];
```



```

% Importamos las columnas que contienen datos de flow

run = dlmread(nombre,"",1,3); %La funcion dlmread lee las columnas que se le
indiquen del archivo de texto

%Creamos vector de flujo para ensayo 3 velocidad 50%

flow50003 = run(:,1);

%Quitamos los valores iguales a cero del vector

flow50003(flow50003==0)=[];


%Gráfica con los 3 ensayos al 50%

figure(50)
plot(flow50001,'r')
hold on
plot(flow50002,'b')
hold on
plot(flow50003,'m')


%Cálculo de la media de los ensayos 1,2,3.

M50001=mean(flow50001);
M50002=mean(flow50002);
M50003=mean(flow50003);
M50=(M50001+M50002+M50003)/3


%Cálculo de la desviación media de los ensayos 1,2,3.

D50001=std(flow50001)
D50002=std(flow50002)
D50003=std(flow50003)
D50=(D50001+D50002+D50003)/3


%Cálculo de la intensidad turbulenta

```

IT50=D50/M50

%Mismo proceso para los demás porcentajes de velocidad: 60,70,75,80,90,100

%60 ventilador 3.88m/s

```
essais = [60001,60002,60003];
```

% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer

```
nombre = [num2str(essais(1)) '.txt'];
```

% Importamos las columnas que contienen datos de flow

```
run = dlmread(nombre,"",1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

%Creamos vector de flujo para ensayo 1 velocidad 60%

```
flow60001 = run(:,1);
```

%Quitamos los valores iguales a cero del vector

```
flow60001(flow60001==0)=[];
```

% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer

```
nombre = [num2str(essais(2)) '.txt'];
```

% Importamos las columnas que contienen datos de flow

```
run = dlmread(nombre,"",1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

%Creamos vector de flujo para ensayo 2 velocidad 60%

```
flow60002 = run(:,1);
```

%Quitamos los valores iguales a cero del vector

```
flow60002(flow60002==0)=[];
```

% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer

```
nombre = [num2str(essais(3)) '.txt'];
```

% Importamos las columnas que contienen datos de flow

```
run = dlmread(nombre,"",1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

%Creamos vector de flujo para ensayo 3 velocidad 60%

```
flow60003 = run(:,1);
```

%Quitamos los valores iguales a cero del vector

```
flow60003(flow60003==0)=[];
```

%gráfica con los 3 ensayos al 60%

```
figure(60)
```

```
plot(flow60001,'r')
```

```
hold on
```

```
plot(flow60002,'b')
```

```
hold on
```

```
plot(flow60003,'m')
```

%Cálculo de la media de los ensayos 1,2,3.

```
M60001=mean(flow60001);
```

```
M60002=mean(flow60002);
```

```
M60003=mean(flow60003);
```

```
M60=(M60001+M60002+M60003)/3
```

%Cálculo desviación media de los ensayos 1,2,3.

```
D60001=std(flow60001)
```

```
D60002=std(flow60002)
```

```
D60003=std(flow60003)
```

```
D60=(D60001+D60002+D60003)/3
```

%Calculo de la intensidad turbulenta

```
IT60=D60/M60
```

% 70% ventilador 4.6m/s

```
essais = [70001,70002,70003];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(1)) '.txt'];
```

```
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
```

```
run = dlmread(nombre, ",", 1, 3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

```
%Creamos vector de flujo para ensayo 1 velocidad 70%
```

```
flow70001 = run(:,1);
```

```
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
```

```
flow70001(flow70001==0)=[];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(2)) '.txt'];
```

```
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
```

```
run = dlmread(nombre, ",", 1, 3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

```
%Creamos vector de flujo para ensayo 2 velocidad 70%
```

```
flow70002 = run(:,1);
```

```
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
```

```
flow70002(flow70002==0)=[];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(3)) '.txt'];
```

```
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
```

```
run = dlmread(nombre, ",", 1, 3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

```
%Creamos vector de flujo para ensayo 3 velocidad 70%
```

```
flow70003 = run(:,1);
```

```
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
```

```
flow70003(flow70003==0)=[];
```

%gráfica con los 3 ensayos al 70%

```
figure(70)
```

```
plot(flow70001,'r')
```

```
hold on
```

```
plot(flow70002,'b')
```

```
hold on
```

```
plot(flow70003,'m')
```

%Cálculo de la media de los ensayos 1,2,3.

```
M70001=mean(flow70001);
```

```
M70002=mean(flow70002);
```

```
M70003=mean(flow70003);
```

```
M70=(M70001+M70002+M70003)/3
```

%Cálculo de la desviación media de los ensayos 1,2,3.

```
D70001=std(flow70001)
```

```
D70002=std(flow70002)
```

```
D70003=std(flow70003)
```

```
D70=(D70001+D70002+D70003)/3
```

%Cálculo Intensidad Turbulenta

```
IT70=D70/M70
```

% 75% ventilador 4.9m/s

```
essais = [75001,75002,75003];
```

% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer

```
nombre = [num2str(essais(1)) '.txt'];
```

```

% Importamos las columnas que contienen datos de flow
run = dlmread(nombre,"",1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
%Creamos vector de flujo para ensayo 1 velocidad 75%
flow75001 = run(:,1);
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
flow75001(flow75001==0)=[];

% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
nombre = [num2str(essais(2)) '.txt'];
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
run = dlmread(nombre,"",1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
%Creamos vector de flujo para ensayo 2 velocidad 75%
flow75002 = run(:,1);
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
flow75002(flow75002==0)=[];

% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
nombre = [num2str(essais(3)) '.txt'];
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
run = dlmread(nombre,"",1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
%Creamos vector de flujo para ensayo 3 velocidad 75%
flow75003 = run(:,1);
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
flow75003(flow75003==0)=[];

%gráfica con los 3 ensayos al 75%
figure(75)
plot(flow75001,'r')
hold on

```

```
plot(flow75002,'b')
```

```
hold on
```

```
plot(flow75003,'m')
```

```
%Cálculo de la media de los ensayos 1,2,3.
```

```
M75001=mean(flow75001);
```

```
M75002=mean(flow75002);
```

```
M75003=mean(flow75003);
```

```
M75=(M75001+M75002+M75003)/3
```

```
%Cálculo de la desviación media de los ensayos 1,2,3.
```

```
D75001=std(flow75001)
```

```
D75002=std(flow75002)
```

```
D75003=std(flow75003)
```

```
D75=(D75001+D75002+D75003)/3
```

```
%Calculo intensidad turbulenta
```

```
IT75=D75/M75
```

```
% 80% ventilador 5.2m/s
```

```
essais = [80001,80002,80003];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(1)) '.txt'];
```

```
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
```

```
run = dlmread(nombre,',1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

```
%Creamos vector de flujo para ensayo 1 velocidad 80%
```

```
flow80001 = run(:,1);
```

```
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
```

```
flow80001(flow80001==0)=[];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(2)) '.txt'];
```

```
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
```

```
run = dlmread(nombre, ",1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

```
%Creamos vector de flujo para ensayo 2 velocidad 80%
```

```
flow80002 = run(:,1);
```

```
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
```

```
flow80002(flow80002==0)=[];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(3)) '.txt'];
```

```
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
```

```
run = dlmread(nombre, ",1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

```
%Creamos vector de flujo para ensayo 3 velocidad 80%
```

```
flow80003 = run(:,1);
```

```
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
```

```
flow80003(flow80003==0)=[];
```

```
%Gráfica con los 3 ensayos al 80%
```

```
figure(80)
```

```
plot(flow80001,'r')
```

```
hold on
```

```
plot(flow80002,'b')
```

```
hold on
```

```
plot(flow80003,'m')
```

```
%Cálculo de la media de los ensayos 1,2,3.
```

```
M80001=mean(flow80001);
```



```
M80002=mean(flow80002);
```

```
M80003=mean(flow80003);
```

```
M80=(M80001+M80002+M80003)/3
```

```
%Cálculo de la desviación media de los ensayos 1,2,3.
```

```
D80001=std(flow80001)
```

```
D80002=std(flow80002)
```

```
D80003=std(flow80003)
```

```
D80=(D80001+D80002+D80003)/3
```

```
IT80=D80/M80
```

```
% 90% ventilador 5.6m/s
```

```
essais = [90001,90002,90003];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(1)) '.txt'];
```

```
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
```

```
run = dlmread(nombre,',1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

```
%Creamos vector de flujo para ensayo 1 velocidad 90%
```

```
flow90001 = run(:,1);
```

```
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
```

```
flow90001(flow90001==0)=[];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(2)) '.txt'];
```

```
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
```

```
run = dlmread(nombre,',1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

```

%Creamos vector de flujo para ensayo 2 velocidad 90%
flow90002 = run(:,1);
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
flow90002(flow90002==0)=[];

% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
nombre = [num2str(essais(3)) '.txt'];
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
run = dlmread(nombre,',1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
%Creamos vector de flujo para ensayo 3 velocidad 90%
flow90003 = run(:,1);
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
flow90003(flow90003==0)=[];

%gráfica con los 3 ensayos al 90%
figure(90)
plot(flow90001,'r')
hold on
plot(flow90002,'b')
hold on
plot(flow90003,'m')

%Cálculo de la media de los ensayos 1,2,3.
M90001=mean(flow90001);
M90002=mean(flow90002);
M90003=mean(flow90003);
M90=(M90001+M90002+M90003)/3

%Cálculo de la desviación media de los ensayos 1,2,3.

```

```
D90001=std(flow90001)
```

```
D90002=std(flow90002)
```

```
D90003=std(flow90003)
```

```
D90=(D90001+D90002+D90003)/3
```

```
%Calculo de la intensidad turbulenta
```

```
IT90=D90/M90
```

```
% 100% ventilador 6.2m/s
```

```
essais = [100001,100002,100003];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(1)) '.txt'];
```

```
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
```

```
run = dlmread(nombre,"",1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

```
%Creamos vector de flujo para ensayo 1 velocidad 100%
```

```
flow100001 = run(:,1);
```

```
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
```

```
flow100001(flow100001==0)=[];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(2)) '.txt'];
```

```
% Importamos las columnas que contienen datos de flow
```

```
run = dlmread(nombre,"",1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
```

```
%Creamos vector de flujo para ensayo 2 velocidad 100%
```

```
flow100002 = run(:,1);
```

```
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
```

```
flow100002(flow100002==0)=[];
```

```
% Definimos el nombre de los ficheros que hay que leer
```

```
nombre = [num2str(essais(3)) '.txt'];
```

```

% Importamos las columnas que contienen datos de flow
run = dlmread(nombre,"",1,3); %esto me lee las dos ultimas columnas
%Creamos vector de flujo para ensayo 3 velocidad 100%
flow100003 = run(:,1);
%Quitamos los valores iguales a cero del vector
flow100003(flow100003==0)=[];

%gráfica con los 3 ensayos al 100%
figure(100)
plot(flow100001,'r')
hold on
plot(flow100002,'b')
hold on
plot(flow100003,'m')
%Cálculo de la media de los ensayos 1,2,3.
M100001=mean(flow100001);
M100002=mean(flow100002);
M100003=mean(flow100003);
M100=(M100001+M100002+M100003)/3

%Cálculo de la desviacion media de los ensayos 1,2,3.
D100001=std(flow100001)
D100002=std(flow100002)
D100003=std(flow100003)
D100=(D100001+D100002+D100003)/3

%Calculo de la intensidad turbulenta
IT100=D100/M100

```

Potencia del ventilador (%)	50	60	70	75	80	90	100
Velocidad ventilador (m/s)	3,3	3,88	4,6	4,9	5,2	5,6	6,2
Velocidad media (m/s)	1,933	3,289	3,373	3,24	3,036	3,437	5,751
Desviación típica - 1	2,247	1,948	2,298	2,709	2,9024	3,21	2,04
Desviación típica - 2	1,21	2,111	2,479	2,723	2,813	3,057	2,227
Desviación típica - 3	1,599	1,952	2,51	2,597	2,824	3,184	2,313
Media de la desviación	1,685	2,004	2,429	2,676	2,846	3,151	2,194
Intensidad turbulenta	0,872	0,609	0,72	0,826	0,938	0,917	0,381

Tabla 6.1. Resultados código Matlab: velocidad media y desviación de las 3 mediciones de velocidad para cada % potencia del ventilador, y cálculo final de la intensidad turbulenta.

En cada gráfica obtenida se representan los tres vectores correspondientes a cada velocidad impuesta. Como se observa la velocidad marcada por el software del túnel de viento no es la velocidad real, sino que fluctúa alrededor del valor indicado. Esta inestabilidad, de subidas y bajadas de fuerza son lo que constituyen el flujo turbulento.

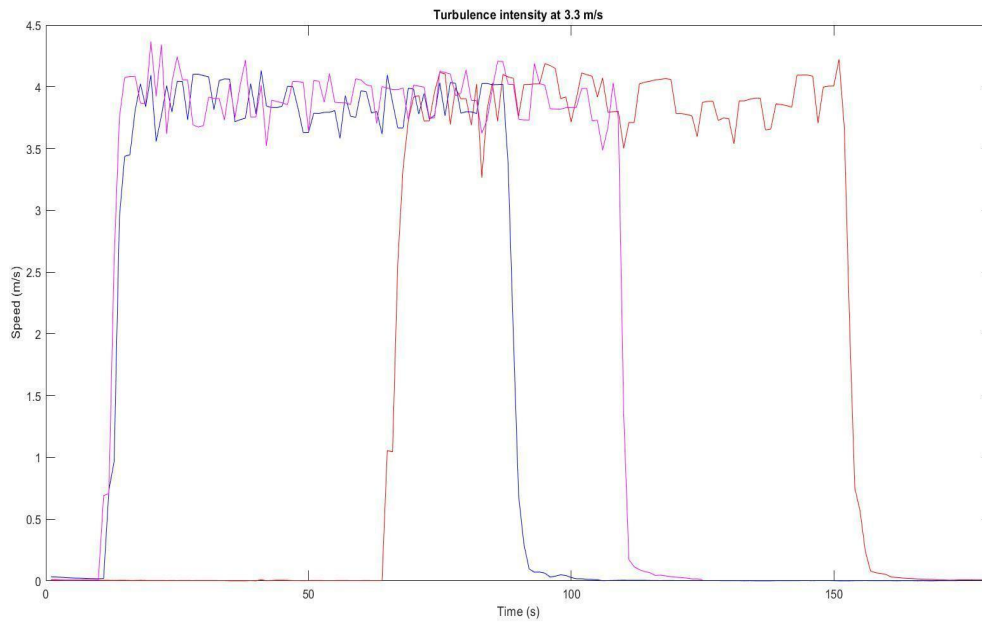


Figura 6.6. Gráfica de evolución temporal de la velocidad instantánea para la velocidad media de 3.3 m/s.

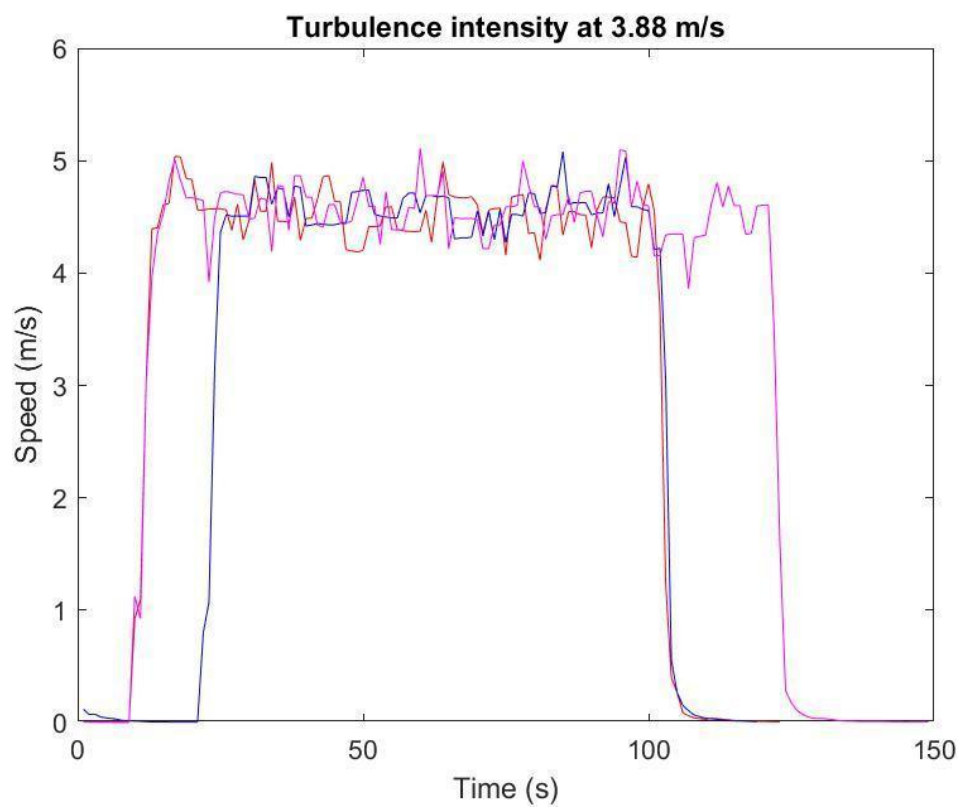


Figura 6.7. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 3.8 m/s.

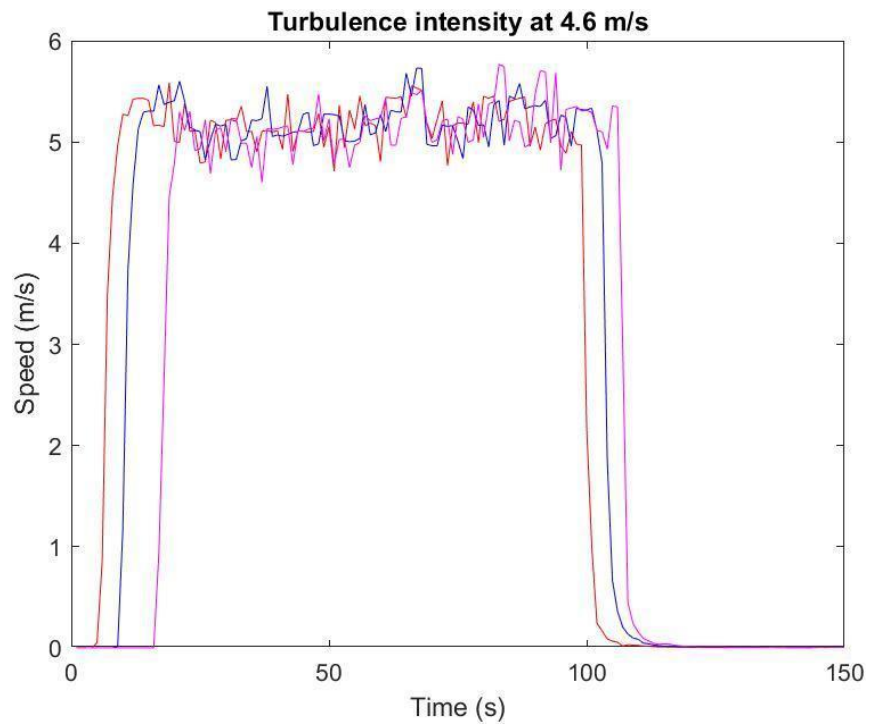


Figura 6.8. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 4.6 m/s.

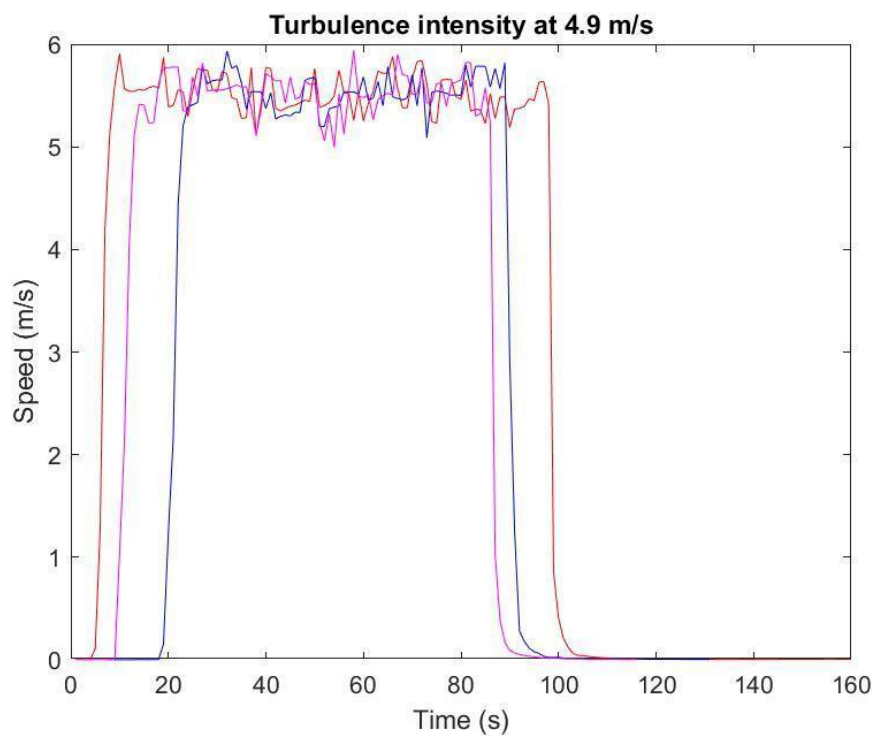


Figura 6.9. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 4.9 m/s.

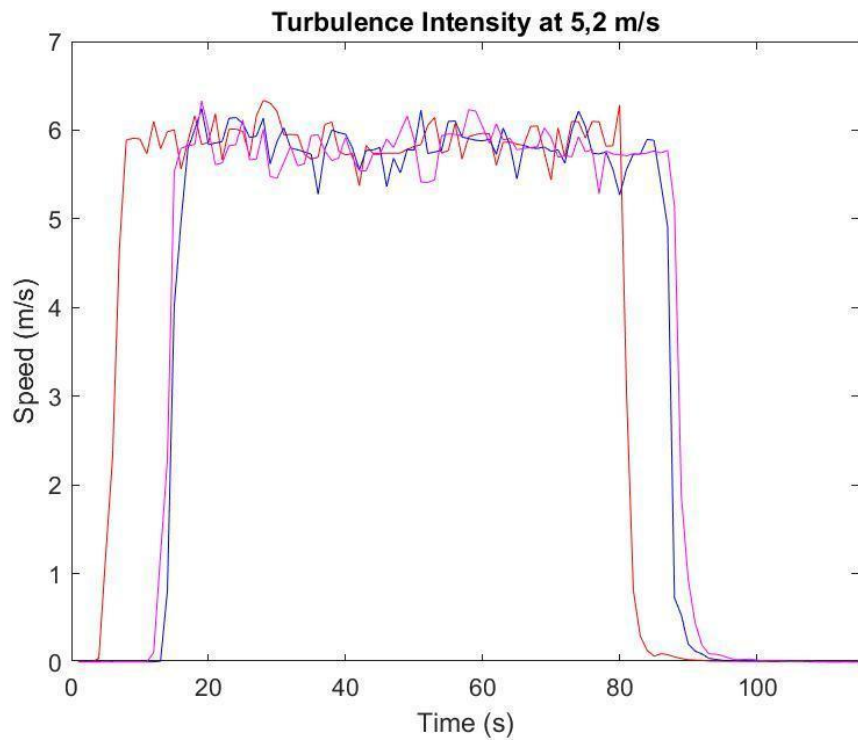


Figura 6.10. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 5.2 m/s.

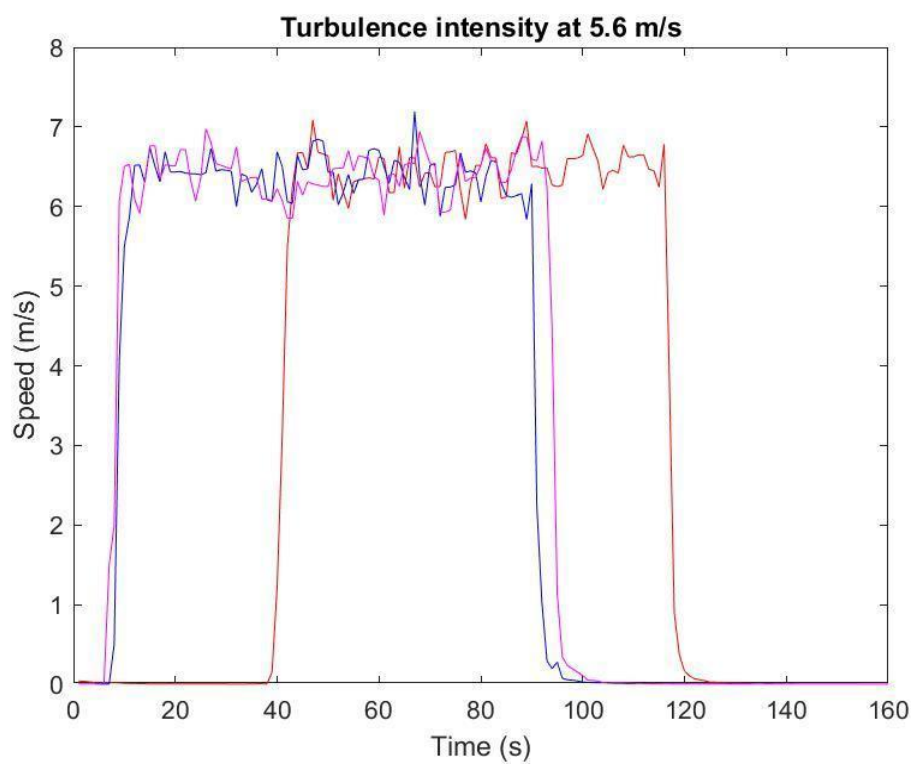


Figura 6.11. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 5.6 m/s.

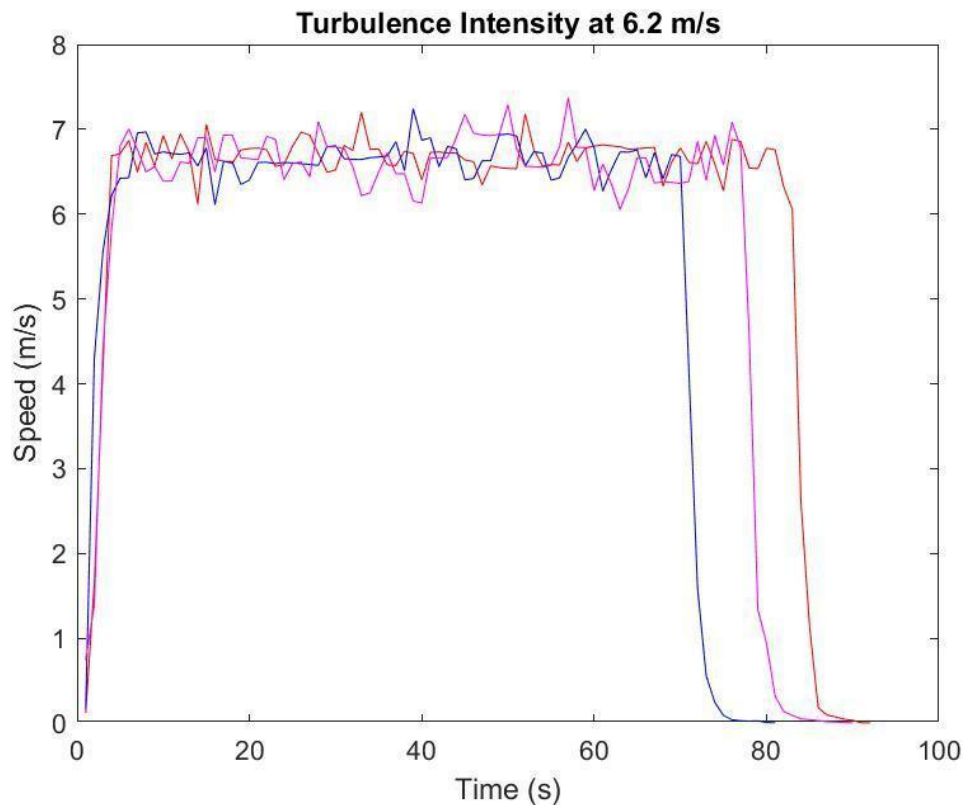


Figura 6.12. Gráfica intensidad turbulenta para la velocidad de 6.2 m/s.

6.3. Anexo III: Tablas de ensayos para la obtención de la velocidad crítica

Especie	Superficie	ϵ/D	L/D	Medición	Número de ensayos										Media	σ
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Arabidopsis thaliana D = 0,513 mm	S0	<<1	<<1	vc (m/s)	No	6,2	No	No	No	No	No	No	No	No	5,9	0,3
				vc (m/s)	No	6,2	5,6	No	No	No	No	No	No	No		
	SA**	<<1	<<1	Re crítico	No	219,9	198,6	No	No	No	No	No	No	No	209	15
				Fr crítico	No	87,5	79,0	No	No	No	No	No	No	No	83	6
Ononix natrix D = 1,470 mm	S0	<<1	<<1	vc (m/s)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	NA	NA
	SA,SB,SC,S1,S2,S3,S4,S5,S6	NA	NA	vc (m/s)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	NA	NA
Urtica dioica D = 1,822 mm	S0	<<1	<<1	vc (m/s)	3,2	No	4,28	4,32	No	No	No	3,15	No	No	3,7375	0,7
				Re crítico	403,6	No	539,8	544,8	No	No	No	397,3	No	No	471,34	82,0
				Fr crítico	23,9	No	32,0	32,3	No	No	No	23,6	No	No	28,0	4,9
	SA,SB,SC,S1,S2,S3,S4,S5	NA	NA	vc (m/s)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No	NA	NA
				vc (m/s)	4,6	6,2	6,2	6,2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5,8	0,8
				Re crítico	580,1	781,9	781,9	781,9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	731	101
	S6	4,98	7,12	Fr crítico	34,4	46,4	46,4	46,4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	43	6

*Para las que no vuelan: significa que al 100% de la potencia del ventilador no han conseguido despegar.

**Rachas de viento: Aumento brusco del viento con respecto a su velocidad media tomada en un cierto intervalo de tiempo. Va seguida de un descenso en el viento.

Tabla 6.13. Resultados de la velocidad crítica y números adimensionales de las especies Arabidopsis thaliana, Ononix natrix y Urtica dioica.

Especie: <i>Thymus vulgaris</i> D = Ds = 1,963 mm															
Superficie	ϵ/D	L/D	Medición	Número de ensayos										Media	σ
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
S0	<<1	<<1	vc (m/s)	2,1	2,1	2,2	2,3	2,4	2,3	2,3	2,6	2,4	2,8	2,3	0,2
			distancia dispersión (cm)	40	45	65	45	65	55	65	80	60	100	62	18
			Re crítico	278	288	296	314	323	314	314	349	323	375	317	28
			Fr crítico	15	15	16	17	17	17	17	19	17	20	17	2
SA	<<1	<<1	vc (m/s)	2,8	2,4	2,4	2,9	3,1	2,8	2,6	2,7	2,4	2,6	2,7	0,2
			distancia dispersión (cm)	60	65	45	85	120	100	70	75	80	55	76	22
			Re crítico	375	323	323	399	424	383	359	367	331	359	364	33
			Fr crítico	20	17	17	21	22	20	19	19	18	19	19	2
SB	<<1	<<1	vc (m/s)	2,2	3,2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2,7	0,7
			distancia dispersión (cm)	60	100	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	80	28
			Re crítico	296	432	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	364	96
			Fr crítico	16	23	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	19	5
S3	0,51	3,06	vc (m/s)	2,7	2,1	2,1	2,2	2,3	2,5	2,5	2,7	2,9	2,6	2,5	0,3
			distancia dispersión (cm)	65	50	50	62	60	60	60	75	105	80	67	16
			Re crítico	367	278	288	296	314	341	341	367	391	359	334	38
			Fr crítico	19	15	15	16	17	18	18	19	21	19	18	2
S4	0,51	1,02	vc (m/s)	2,9	2,7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2,79	0,1
			distancia dispersión (cm)	80	70	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	75	7
			Re crítico	391	367	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	379	17
			Fr crítico	21	19	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	20	1

Tabla 6.14. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de la semilla *Thymus vulgaris*.

Especie: Taraxacum officinale D EV (mm) = 12,316 D fil (mm) = 0,016 Turbulencia: Con malla metálica Superficie: S0															
Orientación (β)	Medición	Número de ensayos												Media	σ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
β = 180°	vc (m/s)	1,1	1,1	0,9	1,1	0,9	1,3	1,5	1,4	1,0	1,1	0,9	1,0	1,1	0,2
	Re (DEV) crítico	972	972	767	955	767	1134	1244	1210	886	972	767	852	945	166
	Fr (DEV) crítico	0,10	0,10	0,08	0,10	0,08	0,12	0,13	0,13	0,09	0,10	0,08	0,09	0,10	0,02
	Re (Dfil) crítico	1,3	1,3	1,0	1,3	1,0	1,5	1,6	1,6	1,2	1,3	1,0	1,1	1,3	0,2
	Fr (Dfil) crítico	2,9	2,9	2,3	2,8	2,3	3,3	3,7	3,6	2,6	2,9	2,3	2,5	2,8	0,5
β = 45°	vc (m/s)	1,42	1,59	1,46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1,5	0,09
	Re (DEV) crítico	1210	1355	1244	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1268	76
	Fr (DEV) crítico	0,129	0,145	0,133	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,135	0,008
	Re (Dfil) crítico	1,60	1,79	1,65	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1,68	0,10
	Fr (Dfil) crítico	3,6	4,0	3,7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,7	0,2
β = 135°	vc (m/s)	1,09	1,19	0,95	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1,07	0,12
	Re (DEV) crítico	929	1014	810	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	914	103
	Fr (DEV) crítico	0,099	0,108	0,086	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,098	0,011
	Re (Dfil) crítico	1,23	1,34	1,07	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1,21	0,14
	Fr (Dfil) crítico	2,7	3,0	2,4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2,7	0,3
β = 90°	vc (m/s)	1,1	1,0	1,3	1,3	1,0	1,6	1,3	1,3	0,8	1,6	1,4	NA	1,2	0,2
	Re (DEV) crítico	972	852	1091	1091	852	1321	1091	1091	690	1389	1210	NA	1040	208
	Fr (DEV) crítico	0,10	0,09	0,12	0,12	0,09	0,14	0,12	0,12	0,07	0,15	0,13	NA	0,11	0,02
	Re (Dfil) crítico	1,3	1,1	1,4	1,4	1,1	1,7	1,4	1,4	0,9	1,8	1,6	NA	1,4	0,3
	Fr (Dfil) crítico	2,9	2,5	3,2	3,2	2,5	3,9	3,2	3,2	2,0	4,1	3,6	NA	3,1	0,6
β = 0°	vc (m/s)	2,12	2,88	2,7	1,66	1,53	1,99	2,88	2,25	2,7	2,31	1,92	1,86	2,2	0,5
	Re (DEV) crítico	1807	2455	2301	1415	1304	1696	2455	1918	2301	1969	1636	1585	1865	399
	Fr (DEV) crítico	0,19	0,26	0,25	0,15	0,14	0,18	0,26	0,20	0,25	0,21	0,17	0,17	0,20	0,04
	Re (Dfil) crítico	2,4	3,2	3,0	1,9	1,7	2,2	3,2	2,5	3,0	2,6	2,2	2,1	2,5	0,5
	Fr (Dfil) crítico	5	7	7	4	4	5	7	6	7	6	5	5	5	1

Tabla 6.15. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de la semilla Taraxacum officinale, variando el ángulo de ataque.

Especie: Taraxacum officinale																				D EV (mm) = 12,316				D fil (mm) = 0,016				Orientación: β = 0°			
Superficie	e/DEV	e/Dfil	L/DEV	L/Dfil	Medición	Número de ensayos															Media	σ									
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15											
S0	<<1	<<1	<<1	<<1	vc (m/s)	2,1	2,9	2,7	1,7	1,5	2,0	2,9	2,3	2,7	2,3	1,9	1,9	2,2	2,8	2,4	2,3	0,4									
					distancia dispersión (cm)	65	125	70	65	70	90	80	75	120	55	NA	NA	NA	NA	NA	82	24									
					Re (DEV) crítico	1807	2455	2301	1415	1304	1666	2455	1918	2301	1909	1636	1585	1858	2352	2080	1942	375									
					Fr (DEV) crítico	6	8	8	5	4	6	8	6	8	7	6	5	6	8	7	7	1									
					Re (Dfil) crítico	2,3	3,2	3,0	1,8	1,7	2,2	3,2	2,5	3,0	2,6	2,1	2,1	2,4	3,1	2,7	2,5	0,5									
SA	<<1	<<1	<<1	<<1	Fr (Dfil) crítico	169	230	216	133	122	159	230	180	216	184	153	149	174	220	195	182	35									
					vc (m/s)	4,5	3,2	4,2	3,1	3,5	4,0	3,7	3,2	3,3	3,2	NA	NA	NA	NA	NA	3,6	0,5									
					distancia dispersión (cm)	115	70	170	70	80	130	125	80	80	95	NA	NA	NA	NA	NA	102	33									
					Re (DEV) crítico	3861	2710	3614	2659	3009	3367	3111	2761	2813	2710	NA	NA	NA	NA	NA	3061	422									
					Fr (DEV) crítico	13	9	12	9	10	11	11	9	9	9	NA	NA	NA	NA	NA	10	1									
SB	<<1	<<1	<<1	<<1	Re (Dfil) crítico	5,0	3,5	4,7	3,5	3,9	4,4	4,0	3,6	3,7	3,5	NA	NA	NA	NA	NA	4,0	0,5									
					Fr (Dfil) crítico	362	254	339	249	282	315	291	259	264	254	NA	NA	NA	NA	NA	287	40									
					vc (m/s)	5,4	3,3	4,0	3,2	2,8	2,9	2,9	3,2	2,9	2,8	NA	NA	NA	NA	NA	3,3	0,8									
					distancia dispersión (cm)	105	90	130	70	80	80	75	85	85	80	NA	NA	NA	NA	NA	88	18									
					Re (DEV) crítico	4568	2813	3367	2710	2403	2455	2506	2761	2455	2403	NA	NA	NA	NA	NA	2844	673									
S2	0,12	93,75	0,24	187,50	Fr (DEV) crítico	15	9	11	9	8	8	8	9	8	8	NA	NA	NA	NA	10	2										
					Re (Dfil) crítico	5,9	3,7	4,4	3,5	3,1	3,2	3,3	3,6	3,2	3,1	NA	NA	NA	NA	NA	3,7	0,9									
					Fr (Dfil) crítico	428	264	315	254	225	230	235	259	230	225	NA	NA	NA	NA	NA	266	63									
					vc (m/s)	3,2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,2	-									
					distancia dispersión (cm)	90	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	90	-									
S3	0,08	62,50	0,49	375,00	Re (DEV) crítico	2710	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2710	-											
					Fr (DEV) crítico	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	9	-										
					Re (Dfil) crítico	3,5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,5	-									
					Fr (Dfil) crítico	254	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	254	-									
					vc (m/s)	3,5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,5	-									
S6	0,74	567,50	1,05	811,25	distancia dispersión (cm)	85	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	85	-											
					Re (DEV) crítico	2957	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2957	-									
					Fr (DEV) crítico	10	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	10	-									
					Re (Dfil) crítico	3,8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,8	-									
					Fr (Dfil) crítico	277	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	277	-									
S8	0,74	567,50	1,05	811,25	vc (m/s)	3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3	-										
					distancia dispersión (cm)	70	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	70	-									
					Re (DEV) crítico	2557	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2557	-									
					Fr (DEV) crítico	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	9	-									
					Re (Dfil) crítico	3,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,3	-									
S8	0,74	567,50	1,05	811,25	Fr (Dfil) crítico	240	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	240	-										
					vc (m/s)	3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3	-									
					distancia dispersión (cm)	70	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	70	-									
					Re (DEV) crítico	2557	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2557	-									
					Fr (DEV) crítico	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	9	-									
S8	0,74	567,50	1,05	811,25	Re (Dfil) crítico	3,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,3	-										
					Fr (Dfil) crítico	240	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	240	-									
					vc (m/s)	3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3	-									
					distancia dispersión (cm)	70	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	70	-									
					Re (DEV) crítico	2557	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2557	-									
S8	0,74	567,50	1,05	811,25	Fr (DEV) crítico	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	9	-											
					Re (Dfil) crítico	3,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,3	-									
					Fr (Dfil) crítico	240	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	240	-									
					vc (m/s)	3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3	-									
					distancia dispersión (cm)	70	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	70	-									
S8	0,74	567,50	1,05	811,25	Re (DEV) crítico	2557	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2557	-											
					Fr (DEV) crítico	9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	9	-										
					Re (Dfil) crítico	3,3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,3	-									
					Fr (Dfil) crítico	240	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	240	-									
					vc (m/s)	3	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3	-									

Especie: <i>Brachypodium stacei</i> D = Ds = 7,865 mm Orientación: β = 0°																							
Superficie	ε/D	L/D	Medición	Número de ensayos																		Media	σ
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
S0	<<1	<<1	vc (m/s)	2,9	3,0	4,7	3,0	3,9	6,2	4,5	3,1	2,9	2,5	2,9	3,4	2,9	2,6	2,5	2,7	2,9	2,9	3,3	1,0
			distancia dispersión (cm)	85	100	85	115	105	65	75	75	85	80	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	87	15
			Re crítico	1600	1633	2569	1633	2112	3374	2427	1665	1600	1366	1600	1829	1567	1399	1366	1470	1567	1567	1797	518
			Fr crítico	11	11	17	11	14	22	16	11	11	9	11	12	10	9	9	10	10	10	12	3
SA	<<1	<<1	vc (m/s)	2,9	3,1	3,3	3,2	2,8	4,3	4,0	4,2	3,7	3,9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,5	0,6
			distancia dispersión (cm)	85	40	25	55	30	90	120	115	80	90	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	73	34
			Re crítico	1567	1698	1796	1763	1502	2346	2188	2308	2019	2112	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1930	305
			Fr crítico	10	11	12	12	10	16	14	15	13	14	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	13	2
SB	<<1	<<1	vc (m/s)	3,7	3,3	4,2	3,3	3,6	3,7	4,2	3,8	3,4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,7	0,3
			distancia dispersión (cm)	55	25	70	30	65	110	75	65	75	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	63	25
			Re crítico	2019	1796	2270	1796	1954	2019	2270	2046	1861	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2004	178
			Fr crítico	13	12	15	12	13	13	15	14	12	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	13	1
S3	0,13	0,76	vc (m/s)	3,88	3,88	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	3,88	0	
			distancia dispersión (cm)	35	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	35	0
			Re crítico	2112	2112	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2112	0
			Fr crítico	14	14	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	14	0
S5	0,25	0,25	vc (m/s)	5,4	4,6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5,0	0,6	
			distancia dispersión (cm)	155	90	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	123	46
			Re crítico	2961	2504	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2732	323
			Fr crítico	20	17	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	18	2

Especie: <i>Brachypodium distachyon</i> D = Ds = 7,777 mm Orientación: $\beta = 0^\circ$															
Superficie	ϵ/D	L/D	Medición	Número de ensayos										Media	σ
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
SA	<<1	<<1	vc (m/s)	4,7	4,8	4,6	3,8	4,2	3,2	4,5	4,4	4,2	4,6	4,3	0,5
			Re crítico	2508	2605	2476	2024	2244	1711	2400	2357	2244	2476	2304	267
			Fr crítico	17	18	17	14	15	12	16	16	15	17	16	2
SB	<<1	<<1	vc (m/s)	4,5	4,8	4,5	4,2	4,5	4,4	4,1	4,2	4,5	NA	4,0	0,2
			Re crítico	2438	2605	2438	2244	2400	2357	2207	2244	2438	NA	2137	127
			Fr crítico	16,4	17,5	16,4	15,1	16,2	15,9	14,9	15,1	16,4	NA	14,4	0,9

Tabla 6.17. Resultados de la velocidad crítica, distancia de dispersión y números adimensionales de la semilla *Brachypodium*, variando la rugosidad. *Brachypodium stacei* tabla superior y *Brachypodium distachyon* tabla inferior.

6.4. Anexo IV: Tablas de cálculo de velocidad instantánea de la semilla

Para calcular el error en la velocidad absoluta de la semilla $v(x,y,t)$ mediante la propagación de errores (técnica utilizada para calcular la incertidumbre en un resultado obtenido a partir de varias mediciones con incertidumbres asociadas) se calculan las derivadas parciales de la velocidad respecto a la posición en la dirección horizontal (dv/dx), la posición en la dirección vertical (dv/dy) y el tiempo (dv/dt). Así como el cambio en la velocidad en un intervalo de posición en la dirección horizontal (Δx), un intervalo de posición en la dirección vertical (Δy) y un intervalo de tiempo (Δt).

$$v \pm \Delta v$$

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

$$\Delta x = \Delta y = 1 \text{ pix} \rightarrow \dots \text{mm}$$

$$\Delta t = \frac{1}{fps}$$

Ecuación 6.1. Definición de variables para el cálculo del error de la velocidad.

El intervalo de la posición en ambas direcciones será el mismo debido que nos basamos en análisis de imágenes. Si la distancia y el tiempo se calculan mediante el análisis de imágenes, es posible que el error en estas mediciones sea mayor que si se utilizan otros métodos. Esto se debe a que el análisis de imágenes puede ser más propenso a errores debido a factores como la resolución de la imagen, la calidad de la iluminación y la precisión de la medición.

$$\Delta v_x = \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial t} \Delta t \quad \Delta v_y = \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial v}{\partial t} \Delta t$$

$$\Delta v_x = \frac{1}{t} \Delta x + \frac{-x}{2t^2} \Delta t \quad \Delta v_y = \frac{1}{t} \Delta y + \frac{-y}{2t^2} \Delta t$$

Ecuación 6.2. Error de la velocidad horizontal y vertical.

Siendo el error total de la velocidad el mostrado en la ecuación 6.3, obteniendo errores como máximo del 20%.

$$\Delta v = \frac{1}{2} \frac{\Delta v_x}{\sqrt{|v_x|}} + \frac{1}{2} \frac{\Delta v_y}{\sqrt{|v_y|}}$$

Ecuación 6.3. Error de la velocidad absoluta.

Siendo en el siguiente ejemplo de *Urtica dioica* los resultados obtenidos (tabla 6.3)

$$\Delta x = \Delta y = 1 \text{ pix} = 0,067 \text{ mm}$$

$$\Delta t = \frac{1}{fps} = \frac{1}{500fps}$$

	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	Error vx (m/s)	vy (m/s)	Error vy (m/s)	v (m/s)	Error v (m/s)
Superficie lisa_3 en plataforma	0	0	723	606	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	16	714	601	562,50	312,50	0,03801	0,00660	0,02111	0,00554	0,04348	0,03599
	14	28	668	604	3.833,33	-250,00	0,25901	0,02721	-0,01689	0,00704	0,25956	0,05381
	24	48	573	609	4.750,00	-250,00	0,32095	0,01943	-0,01689	0,00422	0,32139	0,03339
Superficie lisa_3 tras despegue	25	50	560	611	6.500,00	-1.000,00	0,43919	0,25338	-0,06757	0,06757	0,44436	0,32114
	30	60	497	646	6.300,00	-3.500,00	0,42568	0,04932	-0,23649	0,03041	0,48696	0,06906
	35	70	429	692	6.800,00	-4.600,00	0,45946	0,05270	-0,31081	0,03784	0,55471	0,07281
	40	80	337	745	9.200,00	-5.300,00	0,62162	0,06892	-0,35811	0,04257	0,71739	0,07927
	45	90	234	814	10.300,00	-6.900,00	0,69595	0,07635	-0,46622	0,05338	0,83767	0,08485
	50	100	111	892	12.300,00	-7.800,00	0,83108	0,08986	-0,52703	0,05946	0,98410	0,09024

Tabla 6.18. Ejemplo cálculo del error de la velocidad en la especie *Urtica dioica*, ensayo correspondiente a la tabla 6.4.

	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
Superficie lisa_3 en plataforma	0	0,00	723	606	-	-	-	-	-
	8	16,00	714	601	562,5	312,5	0,03801	0,02111	0,04348
	14	28,00	668	604	3833,33	-250	0,25901	-0,01689	0,25956
	24	48,00	573	609	4750	-250	0,32095	-0,01689	0,32139
Superficie lisa_3 tras despegue	25	50,00	560	611	6500	-1000	0,43919	-0,06757	0,44436
	30	60,00	497	646	6300	-3500	0,42568	-0,23649	0,48696
	35	70,00	429	692	6800	-4600	0,45946	-0,31081	0,55471
	40	80,00	337	745	9200	-5300	0,62162	-0,35811	0,71739
	45	90,00	234	814	10300	-6900	0,69595	-0,46622	0,83767
	50	100,00	111	892	12300	-7800	0,83108	-0,52703	0,98410
Superficie lisa_4 en plataforma	0	0,00	847	608	-	-	-	-	-
	5	10,00	844	608	300	0	0,02027	0,00000	0,02027
	10	20,00	830	600	1400	800	0,09459	0,05405	0,10895
	15	30,00	797	608	3300	-800	0,22297	-0,05405	0,22943
	20	40,00	760	599	3700	900	0,25000	0,06081	0,25729
	25	50,00	713	604	4700	-500	0,31757	-0,03378	0,31936
Superficie lisa_4 tras despegue	30	60,00	661	602	5200	200	0,35135	0,01351	0,35161
	35	70,00	598	608	6300	-600	0,42568	-0,04054	0,42760
	40	80,00	532	631	6600	-2300	0,44595	-0,15541	0,47225
	45	90,00	465	672	6700	-4100	0,45270	-0,27703	0,53074
	50	100,00	393	724	7200	-5200	0,48649	-0,35135	0,60010
	55	110,00	292	780	10100	-5600	0,68243	-0,37838	0,78031
Placa 6_1 en plataforma	60	120,00	151	851	14100	-7100	0,95270	-0,47973	1,06667
	0	0,00	795	754	-	-	-	-	-
	75	50,00	808	752	-260	40	-0,02826	0,00435	0,02859
	100	66,67	815	750	-420	120	-0,04565	0,01304	0,04748
Placa 6_1 tras despegue	175	116,67	721	841	1880	-1820	0,20435	-0,19783	0,28442
	180	120,00	705	855	4800	-4200	0,52174	-0,45652	0,69327
	190	126,67	667	882	5700	-4050	0,61957	-0,44022	0,76003
	200	133,33	623	916	6600	-5100	0,71739	-0,55435	0,90662
Placa 6_3 en plataforma	210	140,00	573	955	7500	-5850	0,81522	-0,63587	1,03388
	220	146,67	519	1002	8100	-7050	0,88043	-0,76630	1,16721
	0	0,00	792	754	-	-	-	-	-
	200	133,33	810	753	-135	7,5	-0,01467	0,00082	0,01470
Placa 6_3 tras despegue	250	166,67	819	760	-270	-210	-0,02935	-0,02283	0,03718
	300	200,00	706	855	3390	-2850	0,36848	-0,30978	0,48140
	310	206,67	677	883	4350	-4200	0,47283	-0,45652	0,65725
	320	213,33	622	916	8250	-4950	0,89674	-0,53804	1,04577
Placa 6_4 en plataforma	330	220,00	573	955	7350	-5850	0,79891	-0,63587	1,02107
	340	226,67	519	1003	8100	-7200	0,88043	-0,78261	1,17798
	0	0,00	676	807	-	-	-	-	-
	300	300,00	679	806	-	-	-	-	-
Placa 6_4 tras despegue	350	350,00	688	804	-34,29	8,57	-0,00373	0,00093	0,00384
	400	400,00	623	791	560	150	0,06087	0,01630	0,06302
	410	410,00	590	784	1633,33	333,33	0,17754	0,03623	0,18120
	420	420,00	555	783	3400	400	0,36957	0,04348	0,37211
	430	430,00	510	793	4000	-450	0,43478	-0,04891	0,43753
	440	440,00	457	812	4900	-1450	0,53261	-0,15761	0,55544
	450	450,00	404	840	5300	-2350	0,57609	-0,25543	0,63018
	460	460,00	348	875	5450	-3150	0,59239	-0,34239	0,68422
	470	470,00	269	910	6750	-3500	0,73370	-0,38043	0,82646
	480	480,00	159	963	9450	-4400	1,02717	-0,47826	1,13306
	490	490,00	40	1023	11450	-5650	1,24457	-0,61413	1,38784

Tabla 6.19. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de *Urtica dioica*.

	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
Superficie lisa_2 en plataforma	0	0	812	653	-	-	-	-	-
	10	20	812	653	0	0	0,00000	0,00000	0,00000
	20	40	809	651	150	100	0,01974	0,01316	0,02372
	30	60	791	652	900	-50	0,11842	-0,00658	0,11860
	40	80	765	653	1300	-50	0,17105	-0,00658	0,17118
Superficie lisa_2 tras despegue	50	100	736	640	1450	650	0,19079	0,08553	0,20908
	60	120	684	655	2600	-750	0,34211	-0,09868	0,35605
	70	140	623	701	3050	-2300	0,40132	-0,30263	0,50263
	80	160	558	770	3250	-3450	0,42763	-0,45395	0,62365
	90	180	472	848	4300	-3900	0,56579	-0,51316	0,76384
	100	200	375	945	4850	-4850	0,63816	-0,63816	0,90249
Superficie lisa_1 en plataforma	105	210	325	1002	5000	-5700	0,65789	-0,75000	0,99766
	0	0	833	650	-	-	-	-	-
	30	60	833	650	0	0	0,00000	0,00000	0,00000
	40	80	832	651	50	-50	0,00658	-0,00658	0,00930
	50	100	813	650	950	50	0,12500	0,00658	0,12517
	60	120	777	649	1800	50	0,23684	0,00658	0,23693
Superficie lisa_1 tras despegue	70	140	742	648	1750	50	0,23026	0,00658	0,23036
	80	160	710	652	1600	-200	0,21053	-0,02632	0,21216
	90	180	679	675	1550	-1150	0,20395	-0,15132	0,25395
	100	200	638	720	2050	-2250	0,26974	-0,29605	0,40051
	110	220	552	773	4300	-2650	0,56579	-0,34868	0,66460
	120	240	437	832	5750	-2950	0,75658	-0,38816	0,85034
Placa A en plataforma	130	260	310	905	6350	-3650	0,83553	-0,48026	0,96372
	140	280	169	1004	7050	-4950	0,92763	-0,65132	1,13345
	0	0	822	655	-	-	-	-	-
	30	60	822	655	0	0	0,00000	0,00000	0,00000
	40	80	818	653	200	100	0,02632	0,01316	0,02942
	50	100	812	651	300	100	0,03947	0,01316	0,04161
Placa A tras despegue	60	120	765	650	2350	50	0,30921	0,00658	0,30928
	70	140	728	650	1850	0	0,24342	0,00000	0,24342
	80	160	673	679	2750	-1450	0,36184	-0,19079	0,40906
	90	180	621	728	2600	-2450	0,34211	-0,32237	0,47006
	100	200	536	787	4250	-2950	0,55921	-0,38816	0,68072
	110	220	405	860	6550	-3650	0,86184	-0,48026	0,98662
	120	240	242	930	8150	-3500	1,07237	-0,46053	1,16707
	124	248	166	965	9500	-4375	1,25000	-0,57566	1,37618

Tabla 6.20. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de Thymus vulgaris.

Con malla metálica, superficie lisa, ángulo 0									
	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
Superficie lisa_1 en plataforma	0	0	958	550	-	-	-	-	-
	500	1000	958	550	0	0	0,00000	0,00000	0,00000
	600	1200	956	542	10	40	0,00079	0,00317	0,00327
	630	1260	907	482	816,67	1000	0,06481	0,07937	0,10247
	640	1280	806	472	5050	500	0,40079	0,03968	0,40275
Superficie lisa_1 tras despegue	650	1300	626	530	9000	-2900	0,71429	-0,23016	0,75045
	660	1320	405	629	11050	-4950	0,87698	-0,39286	0,96096
	670	1340	128	790	13850	-8050	1,09921	-0,63889	1,27139
Superficie lisa_2 en plataforma	0	0	796	525	-	-	-	-	-
	20	40	795	525	25	0	0,00250	0,00000	0,00250
	30	60	794	527	50	-100	0,00500	-0,01000	0,01118
	40	80	781	528	650	-50	0,06500	-0,00500	0,06519
	50	100	754	528	1350	0	0,13500	0,00000	0,13500
	60	120	722	526	1600	100	0,16000	0,01000	0,16031
	70	140	682	521	2000	250	0,20000	0,02500	0,20156
Superficie lisa_2 tras despegue	80	160	637	523	2250	-100	0,22500	-0,01000	0,22522
	90	180	588	540	2450	-850	0,24500	-0,08500	0,25933
	100	200	514	598	3700	-2900	0,37000	-0,29000	0,47011
	110	220	427	683	4350	-4250	0,43500	-0,42500	0,60815
	120	240	318	800	5450	-5850	0,54500	-0,58500	0,79953
	130	260	189	946	6450	-7300	0,64500	-0,73000	0,97413
	140	280	100	1000	7000	-8000	0,70000	-0,80000	1,09900
Superficie lisa_3 en plataforma	1	0	808	467	-	-	-	-	-
	10	18	810	482	-111,11	-833,33	-0,01111	-0,08333	0,08407
	20	38	807	504	150	-1100	0,01500	-0,11000	0,11102
	30	58	807	504	0	0	0,00000	0,00000	0,00000
	40	78	801	490	300	700	0,03000	0,07000	0,07616
	50	98	783	479	900	550	0,09000	0,05500	0,10548
	60	118	755	481	1400	-100	0,14000	-0,01000	0,14036
	70	138	746	505	450	-1200	0,04500	-0,12000	0,12816
	80	158	749	511	-150	-300	-0,01500	-0,03000	0,03354
	90	178	747	509	100	100	0,01000	0,01000	0,01414
	100	198	747	516	0	-350	0,00000	-0,03500	0,03500
	110	218	745	509	100	350	0,01000	0,03500	0,03640
	120	238	746	509	-50	0	-0,00500	0,00000	0,00500
	130	258	747	512	-50	-150	-0,00500	-0,01500	0,01581
	140	278	746	512	50	0	0,00500	0,00000	0,00500
	150	298	741	512	250	0	0,02500	0,00000	0,02500
	160	318	722	519	950	-350	0,09500	-0,03500	0,10124
	170	338	659	528	3150	-450	0,31500	-0,04500	0,31820
Superficie lisa_3 tras despegue	180	358	561	582	4900	-2700	0,49000	-0,27000	0,55946
	190	378	416	673	7250	-4550	0,72500	-0,45500	0,85595
	200	398	230	775	9300	-5100	0,93000	-0,51000	1,06066
	210	418	37	893	9650	-5900	0,96500	-0,59000	1,13107
Superficie lisa_4 en plataforma	1	0	832	528	-	-	-	-	-
	50	98	829	529	30,61	-10,20	0,00306	-0,00102	0,00323
	100	198	807	528	220	10	0,02200	0,00100	0,02202
	150	298	805	524	20	40	0,00200	0,00400	0,00447
	200	398	802	513	30	110	0,00300	0,01100	0,01140
	250	498	722	509	800	40	0,08000	0,00400	0,08010
	260	518	688	523	1700	-700	0,17000	-0,07000	0,18385
Superficie lisa_4 tras despegue	270	538	639	549	2450	-1300	0,24500	-0,13000	0,27735
	280	558	561	615	3900	-3300	0,39000	-0,33000	0,51088
	290	578	443	706	5900	-4550	0,59000	-0,45500	0,74507
	300	598	294	820	7450	-5700	0,74500	-0,57000	0,93804
	310	618	112	952	9100	-6600	0,91000	-0,66000	1,12414

Tabla 6.21. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de Taraxacum officinale con malla metálica.

Sin malla metálica, superficie lisa, ángulo 0									
	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
Superficie lisa_1 en plataforma	0	0	911	659	-	-	-	-	-
	50	100	912	638	-10	210	-0,00147	0,03088	0,03092
	100	200	912	660	0	-220	0,00000	-0,03235	0,03235
	110	220	905	638	350	1100	0,05147	0,16176	0,16976
	120	240	879	595	1300	2150	0,19118	0,31618	0,36948
	130	260	832	555	2350	2000	0,34559	0,29412	0,45380
Superficie lisa_1 tras despegue	140	280	784	541	2400	700	0,35294	0,10294	0,36765
	150	300	702	563	4100	-1100	0,60294	-0,16176	0,62426
	160	320	590	615	5600	-2600	0,82353	-0,38235	0,90796
	170	340	445	684	7250	-3450	1,06618	-0,50735	1,18074
	180	360	251	744	9700	-3000	1,42647	-0,44118	1,49314
	188	376	46	784	12812,5	-2500	1,88419	-0,36765	1,91972
Superficie lisa_2 en plataforma	0	0	928	657	-	-	-	-	-
	50	100	925	658	30	-10	0,00441	-0,00147	0,00465
	100	200	914	657	110	10	0,01618	0,00147	0,01624
	150	300	874	656	400	10	0,05882	0,00147	0,05884
	160	320	866	647	400	450	0,05882	0,06618	0,08854
	170	340	838	624	1400	1150	0,20588	0,16912	0,26644
Superficie lisa_2 tras despegue	180	360	750	620	4400	200	0,64706	0,02941	0,64773
	190	380	624	680	6300	-3000	0,92647	-0,44118	1,02615
	200	400	466	783	7900	-5150	1,16176	-0,75735	1,38682
	210	420	285	897	9050	-5700	1,33088	-0,83824	1,57286
Superficie lisa_3 en plataforma	0	0	876	655	-	-	-	-	-
	10	20	876	655	0	0	0,00000	0,00000	0,00000
	15	30	852	643	2400	1200	0,35294	0,17647	0,39460
	20	40	836	621	1600	2200	0,23529	0,32353	0,40004
Superficie lisa_3 tras despegue	25	50	818	596	1800	2500	0,26471	0,36765	0,45303
	30	60	768	594	5000	200	0,73529	0,02941	0,73588
	35	70	700	614	6800	-2000	1,00000	-0,29412	1,04236
	40	80	597	658	10300	-4400	1,51471	-0,64706	1,64712
	45	90	465	704	13200	-4600	1,94118	-0,67647	2,05567
	50	100	307	750	15800	-4600	2,32353	-0,67647	2,42000
	55	110	125	791	18200	-4100	2,67647	-0,60294	2,74354
Superficie lisa_4 en plataforma	0	0	937	639	-	-	-	-	-
	10	20	939	646	-100	-350	-0,01471	-0,05147	0,05353
	20	40	937	644	100	100	0,01471	0,01471	0,02080
	30	60	937	636	0	400	0,00000	0,05882	0,05882
	40	80	928	625	450	550	0,06618	0,08088	0,10450
Superficie lisa_4 tras despegue	50	100	903	619	1250	300	0,18382	0,04412	0,18904
	60	120	776	624	6350	-250	0,93382	-0,03676	0,93455
	70	140	566	666	10500	-2100	1,54412	-0,30882	1,57470
	80	160	288	731	13900	-3250	2,04412	-0,47794	2,09925

Tabla 6.22. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de Taraxacum officinale sin malla metálica.

Con malla metálica, superficie lisa, variación ángulo									
	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
90° en plat.	0	0	804	521	-	-	-	-	-
	100	200	804	521	0	0	0,00000	0,00000	0,00000
	120	240	801	520	75	25	0,00750	0,00250	0,00791
	130	260	776	507	1250	650	0,12500	0,06500	0,14089
	140	280	722	501	2700	300	0,27000	0,03000	0,27166
	150	300	680	506	2100	-250	0,21000	-0,02500	0,21148
90° tras despegue	160	320	636	516	2200	-500	0,22000	-0,05000	0,22561
	170	340	580	559	2800	-2150	0,28000	-0,21500	0,35302
	180	360	505	648	3750	-4450	0,37500	-0,44500	0,58194
	190	380	401	759	5200	-5550	0,52000	-0,55500	0,76054
	200	400	272	885	6450	-6300	0,64500	-0,63000	0,90162
180° sin reorientación en plat.	210	420	112	1023	8000	-6900	0,80000	-0,69000	1,05646
	0	0	496	578	-	-	-	-	-
	200	400	496	572	0	15	0,00000	0,00119	0,00119
	250	500	484	572	120	0	0,00952	0,00000	0,00952
	260	520	467	576	850	-200	0,06746	-0,01587	0,06930
	270	540	434	582	1650	-300	0,13095	-0,02381	0,13310
	280	560	403	588	1550	-300	0,12302	-0,02381	0,12530
	290	580	358	611	2250	-1150	0,17857	-0,09127	0,20054
180° sin reorientación tras despegue	300	600	302	666	2800	-2750	0,22222	-0,21825	0,31148
	310	620	263	776	1950	-5500	0,15476	-0,43651	0,46313
	320	640	216	904	2350	-6400	0,18651	-0,50794	0,54110
180° con reorientación en plat	330	660	115	1025	5050	-6050	0,40079	-0,48016	0,62545
	0	0	572	568	-	-	-	-	-
	300	600	513	579	98,33333333	-18,33333333	0,00780	-0,00146	0,00794
	310	620	510	580	150	-50	0,01190	-0,00397	0,01255
	320	640	504	582	300	-100	0,02381	-0,00794	0,02510
	330	660	497	574	350	400	0,02778	0,03175	0,04218
	340	680	484	577	650	-150	0,05159	-0,01190	0,05294
	350	700	470	580	700	-150	0,05556	-0,01190	0,05682
180° con reorientación tras despegue	360	720	427	589	2150	-450	0,17063	-0,03571	0,17433
	370	740	391	617	1800	-1400	0,14286	-0,11111	0,18098
	380	760	335	699	2800	-4100	0,22222	-0,32540	0,39404
	390	780	279	864	2800	-8250	0,22222	-0,65476	0,69144
	400	800	227	1000	2600	-6800	0,20635	-0,53968	0,57779

Tabla 6.23. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de *Taraxacum officinale* variando el ángulo.

Con malla metálica, superficie lisa, variación ángulo									
Angulo 0	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
0°_1 en plataforma	1	0	883	614	-	-	-	-	-
	30	58	883	614	0	0	0,00000	0,00000	0,00000
	40	78	871	614	600	0	0,04000	0,00000	0,04000
	50	98	841	611	1500	150	0,10000	0,01000	0,10050
	60	118	772	608	3450	150	0,23000	0,01000	0,23022
	70	138	669	599	5150	450	0,34333	0,03000	0,34464
0°_1 tras despegue	80	158	497	610	8600	-550	0,57333	-0,03667	0,57450
	90	178	313	653	9200	-2150	0,61333	-0,14333	0,62986
	100	198	106	730	10350	-3850	0,69000	-0,25667	0,73619
0°_2 en plataforma	1	0	838	605	-	-	-	-	-
	100	198	823	604	75,76	5,05	0,00505	0,00034	0,00506
	110	218	798	604	1250	0	0,08333	0,00000	0,08333
	120	238	766	604	1600	0	0,10667	0,00000	0,10667
	130	258	737	604	1450	0	0,09667	0,00000	0,09667
	140	278	701	604	1800	0	0,12000	0,00000	0,12000
	150	298	661	605	2000	-50	0,13333	-0,00333	0,13337
0°_2 tras despegue	160	318	594	615	3350	-500	0,22333	-0,03333	0,22581
	170	338	517	645	3850	-1500	0,25667	-0,10000	0,27546
	180	358	436	717	4050	-3600	0,27000	-0,24000	0,36125
	190	378	324	852	5600	-6750	0,37333	-0,45000	0,58470
	200	398	180	1023	7200	-8550	0,48000	-0,57000	0,74518
0°_3 en plataforma	1	0	834	603	-	-	-	-	-
	100	198	804	604	151,52	-5,05	0,01010	-0,00034	0,01011
	110	218	800	602	200	100	0,01333	0,00667	0,01491
	120	238	795	604	250	-100	0,01667	-0,00667	0,01795
	130	258	785	603	500	50	0,03333	0,00333	0,03350
	140	278	747	599	1900	200	0,12667	0,01333	0,12737
0°_3 tras despegue	150	298	656	603	4550	-200	0,30333	-0,01333	0,30363
	160	318	516	630	7000	-1350	0,46667	-0,09000	0,47527
	170	338	331	732	9250	-5100	0,61667	-0,34000	0,70419
	180	358	94	947	11850	-10750	0,79000	-0,71667	1,06664
Angulo 180	Imagen	Tiempo	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
180°_1 en plataforma	1	0	859	600	-	-	-	-	-
	30	58	859	600	0	0	0,00000	0,00000	0,00000
	40	78	851	599	400	50	0,02667	0,00333	0,02687
	50	98	819	599	1600	0	0,10667	0,00000	0,10667
	60	118	779	597	2000	100	0,13333	0,00667	0,13350
	70	138	700	595	3950	100	0,26333	0,00667	0,26342
180°_1 tras despegue	80	158	593	607	5350	-600	0,35667	-0,04000	0,35890
	90	178	476	672	5850	-3250	0,39000	-0,21667	0,44614
	100	198	352	782	6200	-5500	0,41333	-0,36667	0,55253
	110	218	184	965	8400	-9150	0,56000	-0,61000	0,82807

Tabla 6.24. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de *Brachypodium stacei* variando el ángulo.

Sin malla metálica, ángulo 0, variación rugosidad									
R0	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
Superficie lisa_1 en plataforma	1	0	911	657	-	-	-	-	-
	120	238	875	656	151,26	4,20	0,01990	0,00055	0,01991
	130	258	827	650	2400	300	0,31579	0,03947	0,31825
	140	278	757	663	3500	-650	0,46053	-0,08553	0,46840
Superficie lisa_1 tras despegue	150	298	662	695	4750	-1600	0,62500	-0,21053	0,65950
	160	318	539	770	6150	-3750	0,80921	-0,49342	0,94778
	170	338	405	884	6700	-5700	0,88158	-0,75000	1,15745
	180	358	280	1021	6250	-6850	0,82237	-0,90132	1,22011
RA	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
Placa A_1 en plataforma	1	0	848	657	-	-	-	-	-
	30	58	843	657	86,21	0	0,01134	0,00000	0,01134
	40	78	829	656	700	50	0,09211	0,00658	0,09234
	50	98	815	654	700	100	0,09211	0,01316	0,09304
Placa A_1 tras despegue	60	118	787	654	1400	0	0,18421	0,00000	0,18421
	70	138	759	647	1400	350	0,18421	0,04605	0,18988
	80	158	729	647	1500	0	0,19737	0,00000	0,19737
	90	178	688	651	2050	-200	0,26974	-0,02632	0,27102
	100	198	564	655	6200	-200	0,81579	-0,02632	0,81621
	110	218	353	674	10550	-950	1,38816	-0,12500	1,39377
	120	238	99	702	12700	-1400	1,67105	-0,18421	1,68118
RB	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
Placa B_1 en plataforma	1	0	906	657	-	-	-	-	-
	210	418	900	657	14,35	0	0,00189	0,00000	0,00189
	220	438	885	656	750	50	0,09868	0,00658	0,09890
	230	458	874	656	550	0	0,07237	0,00000	0,07237
Placa B_1 tras despegue	240	478	853	659	1050	-150	0,13816	-0,01974	0,13956
	250	498	830	701	1150	-2100	0,15132	-0,27632	0,31503
	260	518	774	769	2800	-3400	0,36842	-0,44737	0,57955
	270	538	700	879	3700	-5500	0,48684	-0,72368	0,87220
	280	558	606	1017	4700	-6900	0,61842	-0,90789	1,09851
RB	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
Placa B_2 en plataforma	1	0	876	656	-	-	-	-	-
	30	58	869	656	120,69	0	0,01588	0,00000	0,01588
	40	78	860	654	450	100	0,05921	0,01316	0,06065
	50	98	841	654	950	0	0,12500	0,00000	0,12500
	60	118	817	653	1200	50	0,15789	0,00658	0,15803
	70	138	794	651	1150	100	0,15132	0,01316	0,15189
	80	158	768	653	1300	-100	0,17105	-0,01316	0,17156
	90	178	751	656	850	-150	0,11184	-0,01974	0,11357
Placa B_2 tras despegue	100	198	735	654	800	100	0,10526	0,01316	0,10608
	110	218	704	666	1550	-600	0,20395	-0,07895	0,21869
	120	238	653	703	2550	-1850	0,33553	-0,24342	0,41453
	130	258	583	761	3500	-2900	0,46053	-0,38158	0,59807
	140	278	499	849	4200	-4400	0,55263	-0,57895	0,80036
	150	298	397	974	5100	-6250	0,67105	-0,82237	1,06141

Tabla 6. 25.a. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de *Brachypodium stacei* para distintas rugosidades.

R3	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
Placa 3_1 en plataforma	1	0	924	646	-	-	-	-	-
	40	78	915	646	115,38	0	0,01518	0,00000	0,01518
	50	98	901	642	700	200	0,09211	0,02632	0,09579
	60	118	873	644	1400	-100	0,18421	-0,01316	0,18468
Placa 3_1 tras despegue	70	138	865	644	400	0	0,05263	0,00000	0,05263
	80	158	840	682	1250	-1900	0,16447	-0,25000	0,29925
	90	178	819	722	1050	-2000	0,13816	-0,26316	0,29722
	100	198	782	804	1850	-4100	0,24342	-0,53947	0,59185
	110	218	727	900	2750	-4800	0,36184	-0,63158	0,72789
	120	238	663	997	3200	-4850	0,42105	-0,63816	0,76455
R5	Imagen	Tiempo (ms)	x (pix)	y (pix)	vx (pix/s)	vy (pix/s)	vx (m/s)	vy (m/s)	v (m/s)
Placa 5_1 en plataforma	1	0	823	643	-	-	-	-	-
	30	58	819	642	68,97	17,24	0,00907	0,00227	0,00935
	40	78	813	642	300	0	0,03947	0,00000	0,03947
	50	98	804	640	450	100	0,05921	0,01316	0,06065
	60	118	775	641	1450	-50	0,19079	-0,00658	0,19090
Placa 5_1 tras despegue	70	138	755	635	1000	300	0,13158	0,03947	0,13737
	80	158	715	612	2000	1150	0,26316	0,15132	0,30356
	90	178	536	672	8950	-3000	1,17763	-0,39474	1,24203
	95	188	393	561	14300	11100	1,88158	1,46053	2,38191
	99	196	258	555	16875	750	2,22039	0,09868	2,22259

Tabla 6.25.b. Análisis trayectoria horizontal y vertical y correspondientes velocidades, así como la velocidad absoluta de los distintos ensayos de *Brachypodium stacei* para distintas rugosidades.