

ESTUDIO DEL “VUELO” DE SEMILLAS AUTORROTANTES

Bruno Roccia^{a,b,c}, Sergio Preidikman^{b,c}, Carlos Estrada^b y Julio Massa^b

^a *Departamento de Ciencias Básicas. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Río Cuarto
Campus Universitario, Ruta Nacional 36 Km. 601. 5800 Río Cuarto. Argentina.
Tel./Fax.:0358-4676246 broccia@ing.unrc.edu.ar, <http://www.ing.unrc.edu.ar>*

^b *Departamento de Estructuras. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Universidad
Nacional de Córdoba. Tel.: 0351-4334145, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina.
spreidik@umd.edu, cestrada@efn.uncor.edu, jmassa@efn.uncor.edu, <http://www.efn.uncor.edu>*

^c *CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1917,
Buenos Aires, Argentina. <http://www.conicet.gov.ar>*

Palabras clave: Semillas autorrotantes, Cinemática, Biomimética.

Resumen. Diversas clases de plantas utilizan el viento para trasladar sus semillas a grandes distancias desde su lugar de origen. A lo largo de millones de años de evolución, cierto tipo de semillas desarrollaron especies de “*órganos aerodinámicos*” tales como las alas, que les permiten a estas verdaderas “estructuras volantes” generar suficiente fuerza de sustentación para mantenerse en vuelo durante un tiempo mientras caen. Estudios publicados, mayormente, por biólogos reportan esencialmente dos configuraciones morfológicas diferentes de semillas aladas: unas se limitan a ejecutar un movimiento de autorrotación a medida que descienden, mientras que otras rotan además respecto a su eje longitudinal. Este fenómeno de la naturaleza ha inspirado la concepción de micro vehículos aéreos basados en el mecanismo de autorrotación como principal instrumento de generación de sustentación.

En este trabajo se presenta una revisión bibliográfica sobre el estado del arte concerniente a la cinemática y aerodinámica de las semillas voladoras y una formulación matemática que permite estudiar en detalle la cinemática de las semillas autorrotantes en su movimiento de descenso hacia el suelo. Además, se presenta un código de computación interactivo que sirve como nexo entre el lenguaje “descriptivo” utilizado por los biólogos y el lenguaje “predictivo” usado por los ingenieros. El código desarrollado facilita grandemente el estudio y análisis de los patrones cinemáticos asociados al vuelo de diferentes “*semillas aladas*” y está previsto continuar su desarrollo para incluir un modelo aerodinámico que permita caracterizar los principales parámetros cinemáticos que intervienen en la transición entre la caída libre y el inicio de la autorrotación y estudiar la influencia de esos parámetros en la tasa de descenso. Como caso de estudio se presentan resultados de una simulación numérica relativa a las trayectorias espaciales que describen diferentes puntos pertenecientes al ala de una semilla autorrotante y se muestran curvas para el módulo de la velocidad de tales puntos. El modelo desarrollado en este esfuerzo es la base sobre la cual se pretende posteriormente acoplar un modelo aerodinámico no estacionario y un modelo dinámico no lineal con el objeto de estudiar el fenómeno de las semillas voladoras que aún presenta muchos interrogantes.

El fin último de esta línea de investigación es desarrollar herramientas de simulación para estudiar la dinámica y aerodinámica de semillas autorrotantes, y desarrollar sistemas dinámicos finitos para estudiar la aeroservoelasticidad de micro-vehículos aéreos basados en esta nueva filosofía de diseño.

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, hay grupos de investigadores y especialistas en diferentes áreas de la ciencia concentrados en el estudio, diseño, y posterior construcción de micro vehículos aéreos (MAVs) inspirados en la biología. Esas actividades son impulsadas principalmente por las numerosas aplicaciones civiles y militares que dichos vehículos serán capaces de desarrollar, tales como misiones de reconocimiento, inspección de edificios colapsados, exploración de ambientes aburridos, sucios y peligrosos para el ser humano (*dull-dirty-dangerous environments*, D3), y en un futuro, misiones de investigación y exploración de atmósferas no terráqueas, entre otras (Mueller y Delaurier, 2001; Pandolfi y Izzo, 2013).

En las últimas décadas, diferentes grupos de investigación alrededor del mundo han abordado la difícil tarea de estudiar y desentrañar la compleja física que caracteriza el vuelo a pequeña escala. El equipo de Dickinson (*Dickinson Lab, Washington University, USA*) y el Grupo de Vuelo Animal liderado por Charles Ellington (*Cambridge University, Reino Unido*) han llevado adelante diversos proyectos de investigación multidisciplinarios con el objetivo de dar una respuesta a numerosos interrogantes relacionados con el vuelo natural mediante alas batientes. Algunas de estas preguntas permanecen, hasta la fecha, sin una respuesta definitiva: ¿Cómo los insectos generan la fuerza de sustentación necesaria para mantenerse en el aire? ¿Cómo afecta la flexibilidad de las alas a la producción de fuerzas aerodinámicas? ¿Puede diseñarse un mecanismo artificial que iguale o supere el desempeño exhibido por estos aviadores naturales? (Dickinson *et al.*, 1999; Dickinson, 2006; Elimelech y Ellington, 2013; Ellington, 1984; Ellington, 1999; Usherwood y Ellington, 2002).

El estudio de pequeñas criaturas voladoras ha inspirado el desarrollo de diversos micro vehículos aéreos que utilizan conceptos de diseño basados en alas batientes para generar simultáneamente las fuerzas de sustentación y empuje necesarias para desplazarse eficientemente a través del aire. Una revisión detallada de los MAVs construidos desde el año 2000 hasta la fecha puede consultarse en el trabajo de Roccia (2013). A pesar de los grandes logros obtenidos en los últimos años respecto al diseño de MAVs, los entes biológicos concebidos por la naturaleza aventajan a sus análogos mecánicos en muchos aspectos, tales como la relación tamaño/autonomía del vehículo. Estas son dos variables interrelacionadas y por lo tanto es extremadamente complejo, o casi imposible, minimizar o maximizar dichas cantidades en forma independiente, al menos con la tecnología que existe actualmente.

Estas barreras técnicas han impulsado la aparición de nuevos paradigmas de diseño, también inspirados en la naturaleza. De hecho, una alternativa atractiva a las alas batientes está basada esencialmente en la extraordinaria simplicidad con la cual un gran número de plantas utilizan el viento para trasladar sus semillas a grandes distancias desde su lugar de origen (Horn *et al.*, 2001; Nathan, 2006). Dentro de los métodos de dispersión aéreos adoptados por diferentes semillas y frutas voladoras, los más comunes son: *i*) el vuelo mediante autorrotación (*spinning flight*); *ii*) paracaidismo (*parachuted flight*); y *iii*) planeo (*gliding flight*) (Pandolfi y Izzo, 2013). Las semillas que ejecutan un movimiento de autorrotación son llamadas *sámaras* y son, quizás, los “aviadores” más simples, estables y eficientes que la naturaleza ha creado. Más aún, el vuelo exhibido por las sámaras es un ejemplo de elegancia y balance; donde se transforma energía potencial gravitatoria en energía cinética rotacional perpetuando un descenso helicoidal aerodinámicamente estable.

En la última década se han propuesto varios diseños innovadores de MAVs que utilizan el mecanismo de autorrotación; algunos de ellos han mostrado un vuelo eficiente; mientras que otros permanecen aún como diseños conceptuales. En la Tabla 1 se resumen las diferentes propuestas ofrecidas por universidades y empresas privadas.

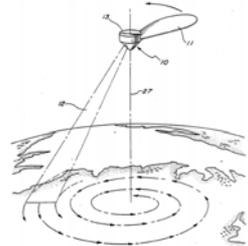
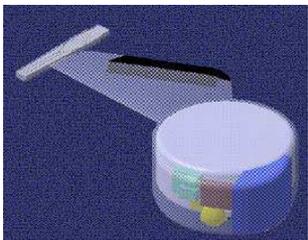
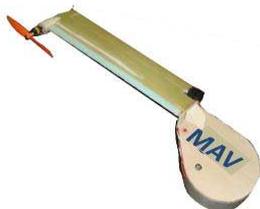
Prototipo	Descripción	MAV
Dispositivo de formación de imágenes atmosféricas (1989)	Diseño conceptual creado por James Burke en Sierra Madre, California, USA, bajo un contrato con NASA. Pensado para exploración espacial, este dispositivo rota mientras desciende a través de la atmosfera. No contiene partes móviles o sistemas de propulsión y la autorrotación es puramente inducida por la configuración geométrica de la estructura (Burke, 1989).	 Crédito: James Burke
MAVPro (2007)	Vehículo desarrollado por Lockheed Martin. Este prototipo pesa 514 gr y puede realizar vuelo suspendido a una velocidad de rotación de 4 Hz. El sistema de control sobre el ala permite al MAVPro elevarse a más de 15 metros. El motor eléctrico utilizado para impulsar el vehículo es del tipo <i>outrunner</i> (caracterizado por la rotación del estator) (Jameson <i>et al.</i> , 2007).	 Crédito: Lockheed Martin
Samarai-NAV (2007)	Diseño conceptual propuesto por Lockheed Martin basado en los requerimientos especificados por la Agencia de Proyectos Avanzados de Defensa (DARPA), que incluyen un peso aproximado de 2 gr, una capacidad de carga de 2 gr y una autonomía de vuelo de 20 minutos. Este nano vehículo aéreo (NAV, <i>Nano Air Vehicle</i>) samarai-NAV debe poseer una velocidad de navegación comprendida entre 5 y 10 m/seg y un alcance de 1 km medido desde el lugar de despegue (Jameson <i>et al.</i> , 2007).	 Crédito: Lockheed Martin
Samara-I y Samara-II (2009)	Estos dos vehículos fueron desarrollados en la Universidad de Maryland, USA. La estructura principal de ambos consiste de un laminado de fibra de carbono cuyas capas tienen una orientación 0/90. El Samara-I pesa 75 gr, tiene una autonomía de 20 minutos, y una dimensión máxima de 27 cm. El Samara-II tiene una dimensión máxima de 18 cm y pesa casi un 50% menos que el Samara-I (sólo 38 gr), pero su autonomía de vuelo también es menor, alrededor de 10 minutos (Ulrich <i>et al.</i> , 2010).	 Crédito: Evan Ulrich y Universidad de Maryland
Dos Samara (2010)	Diseño conceptual presentado por NASA en agosto de 2010. Esta nueva idea está inspirada en el vuelo exhibido por las semillas de arce mientras caen y propone la construcción de una aeronave no tripulada (UAV) capaz de despegar y aterrizar utilizando dos alas rotantes (Fredericks, 2010). Se utilizan paneles en las alas exteriores, que giran para generar el empuje para levantar el vehículo en vuelo vertical. En vuelo horizontal, el motor fuera de borda bloquea los paneles laterales.	 Crédito: NASA
Samarai-MAV (2011)	Vehículo desarrollado por Lockheed Martin, posee una dimensión máxima de 30 cm, pesa 200 gr, rota a 600 revoluciones por minuto y utiliza un motor eléctrico situado en el extremo del ala como fuente de propulsión. El ala, posee además, una superficie de control sobre el borde de fuga, la cual permite al MAV elevarse y descender con gran precisión (Fregene <i>et al.</i> , 2011).	 Crédito: Lockheed Martin

Tabla 1: Propuestas de MAVs basados en el mecanismo de autorrotación.

El estudio de las semillas voladoras se remonta a comienzos del siglo XX, cuando Ridley (1905; 1930) y Webber (1934) publicaron sus estudios sobre la dispersión de semillas a grandes distancias (*Long-Distance Dispersal*, LDD), concluyendo que uno de los principales mecanismos en la dispersión de semillas es el viento, y que las semillas han sufrido adaptaciones durante millones de años de evolución que les permiten explotar la energía provista por las corrientes de aires.

Los primeros estudios referidos a semillas rotantes se remontan al comienzo de la década del 50 y estaban orientados a cuantificar los mecanismos que favorecen la dispersión de esta clase especial de semillas. Posteriormente, fueron publicados numerosos trabajos en este campo con el objetivo de estudiar las características morfológicas de las sámaras tales como: rugosidad, forma de la superficie sustentadora, posición del centro de masa y espesor del borde de ataque (Norberg, 1973; Seter y Rosen, 1992; Azuma y Yasuda, 1997). Burrows (1975) y McCutchen (1977) utilizaron resultados derivados del estudio de helicópteros y perfiles de alas para investigar el origen del inicio de la autorrotación de estas semillas. Es importante destacar que las fuerzas asociadas a la autorrotación determinan una importante característica dinámica de las sámaras, la tasa de descenso o velocidad terminal de la misma.

Al mismo tiempo, Green (1980) utilizó técnicas basadas en fotografías estroboscópicas sobre un gran número de muestras de siete especies diferentes de semillas autorrotantes con el objetivo de medir diversos parámetros morfológicos, cinemáticos, dinámicos y aerodinámicos, tales como: masa, radio, ángulo de cono, ángulo de ataque, velocidad terminal, velocidad angular, orientación, capacidad de carga y número de Reynolds, entre otros. Green encontró una alta correlación entre la tasa de descenso y la raíz cuadrada de la carga sobre el ala (esto es el peso de la sámara dividido por la superficie del ala, *wing loading*). Años más tarde, Azuma y Yasuda (1989; 1997) llevaron a cabo un estudio exhaustivo del comportamiento aerodinámico de las sámaras encontrando diferencias sustanciales con aquellas que descienden hacia el suelo por medio del planeo.

Lentink *et al.* (2009) utilizaron un modelo dinámicamente escalado de una semilla de arce (*maple*) para estudiar el flujo tridimensional alrededor de la misma y encontraron que las sámaras generan suficiente fuerza de sustentación por medio de la formación de un vórtice estable sobre el borde de ataque (*leading-edge vortex*, LEV); este fenómeno permite a estas verdaderas estructuras voladoras permanecer en el aire más tiempo que cualquier otra variedad de semillas no rotantes. Se debe notar, además, que el LEV es una característica crucial en el vuelo animal, que permite explicar las grandes fuerzas de sustentación producidas por insectos, murciélagos y posiblemente aves (Birch y Dickinson, 2001). Sobre esta base Lentink y sus colaboradores señalaron que la generación de un LEV estable representa una solución convergente en el contexto del vuelo natural, tanto en animales como en plantas.

Salcedo *et al.* (2013) utilizaron una técnica basada en velocimetría digital de imágenes de partículas (*digital particle image velocimetry*, DPIV) para conducir un estudio experimental del campo de fluido tridimensional que se genera alrededor de las semillas rotantes mientras estas descienden. Esos investigadores obtuvieron una detallada estructura tridimensional del LEV, en concordancia con los resultados reportados por Lentink *et al.* (2009).

Otro fenómeno, muy poco entendido en el vuelo de las sámaras, es la fase de transición. En esta fase la semilla deja de “simplemente caer” y comienza a rotar. Varshney *et al.* (2012) diseñaron un experimento con el objetivo de determinar la cinemática 3D del ala durante todo el periodo de descenso. El equipo de Varshney concluyó que la transición inicial desde el reposo hasta un estado de rotación estacionario ocurre en tres etapas: un giro en la dirección de la envergadura del ala, seguida de una inclinación hacia el eje vertical, lo cual induce por último una rotación alrededor del eje vertical y una abertura del ángulo de cono, antes de alcanzar finalmente un estado de descenso equilibrado.

En este trabajo, se presenta una extensa revisión bibliográfica sobre el estado del arte concerniente a la cinemática y aerodinámica de las *semillas voladoras*. Además, se desarrolla una formulación matemática que permite estudiar en detalle la cinemática de las *semillas autorrotantes* en su movimiento de descenso hacia el suelo.

2 EL VUELO DE LAS SEMILLAS

Como se mencionó anteriormente, un factor importante en la dispersión aérea de las semillas es el viento. Algunas semillas están dotadas de pequeños paracaídas que poseen filamentos minúsculos que les permiten generar una fuerza de arrastre suficiente para descender lentamente hacia el suelo (*parachuting flight*); otras han evolucionado con alas membranosas que permiten generar sustentación.

A su vez, las semillas aladas pueden presentar también diferentes mecanismos de vuelo: algunas de ellas planean (*gliding flight*), otras descienden balanceándose (*rocking down*), y algunas exhiben un movimiento de rotación estable mientras caen (*spinning flight*). Estos métodos de dispersión han sido estudiados exhaustivamente en el pasado, el lector interesado en este tema puede consultar el trabajo de Azuma y Yasuda (1989) para una descripción detallada del desempeño aerodinámico de semillas voladoras.

2.1 Semillas paracaidistas (*parachuting flight*)

Las semillas que exhiben un vuelo de esta naturaleza están constituidas por un pequeño paracaídas dispuesto sobre una estructura esférica, semiesférica o una especie de cono circular (ver Figura 1a, y 1b). En ausencia de viento, estas semillas caen siguiendo una trayectoria vertical a una velocidad constante, la cual es alcanzada cuando la fuerza de arrastre aerodinámica equilibra el peso de la semilla (ver Figura 1c).

Las características morfológicas que presentan las “*semillas paracaidistas*” permiten inferir que fueron especialmente “diseñadas” para desplazarse pasivamente con una corriente de aire y la distancia que ellas son capaces de recorrer es directamente proporcional a la tasa de descenso. Por otro lado, la forma de los filamentos (especie de plumas) que conforman el paracaídas puede afectar sustancialmente la capacidad de dispersión de las semillas.

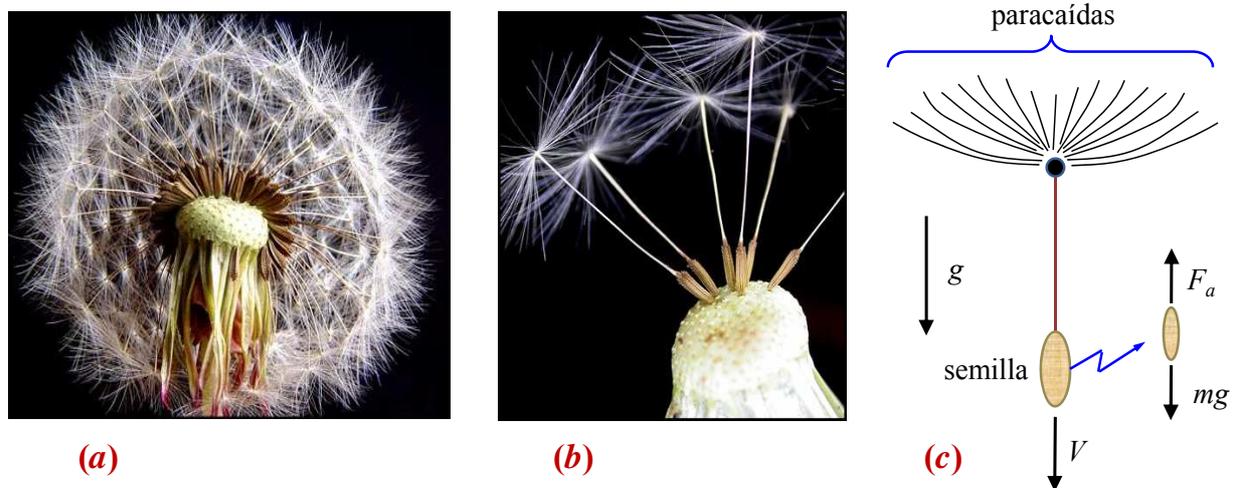


Figura 1: (a) y (b) Semillas plumosas (*pappus*) <http://www.microscopy-uk.org.uk/mag/artjun10/bj-dandelion.html>; (c) Esquema mostrando la trayectoria que sigue una semilla paracaidista.

El vuelo de este tipo de estructuras está siendo considerado actualmente como fuente de inspiración para desarrollar una nueva generación de paracaídas livianos. Esta idea implica la utilización de mecanismos concebidos para funcionar exitosamente a pequeñas escalas; la adaptación de éstos a escalas más grandes como las que caracterizan a los paracaídas convencionales supondrá el abordaje de importantes desafíos biomecánicos y aerodinámicos (Pandolfi y Izzo, 2013).

2.2 Semillas planeadoras (*gliding flight*)

Cierto tipo de arbustos, árboles y plantas trepadoras dispersan sus semillas por medio del mecanismo de vuelo denominado “planeo” (*gliding flight*). Algunas de esas semillas poseen dos membranas delgadas entre las cuales se ubica propiamente la semilla (ver Figura 2a). Estas membranas crecen en forma simétrica y actúan como superficies sustentadoras, las cuales permiten a la semilla experimentar un planeo en línea recta durante un tiempo prolongado en una atmósfera quieta. Por lo general, las trayectorias de vuelo que caracterizan a las “semillas planeadoras” son bastantes empinadas entre 35° y 90° (ver Figura 2b). En ese rango, las semillas maximizan la eficiencia aerodinámica o la relación sustentación/arrastre (y consecuentemente minimizan la tasa de descenso); efecto que ha sido demostrado en túneles de viento (Minami and Azuma, 2003).

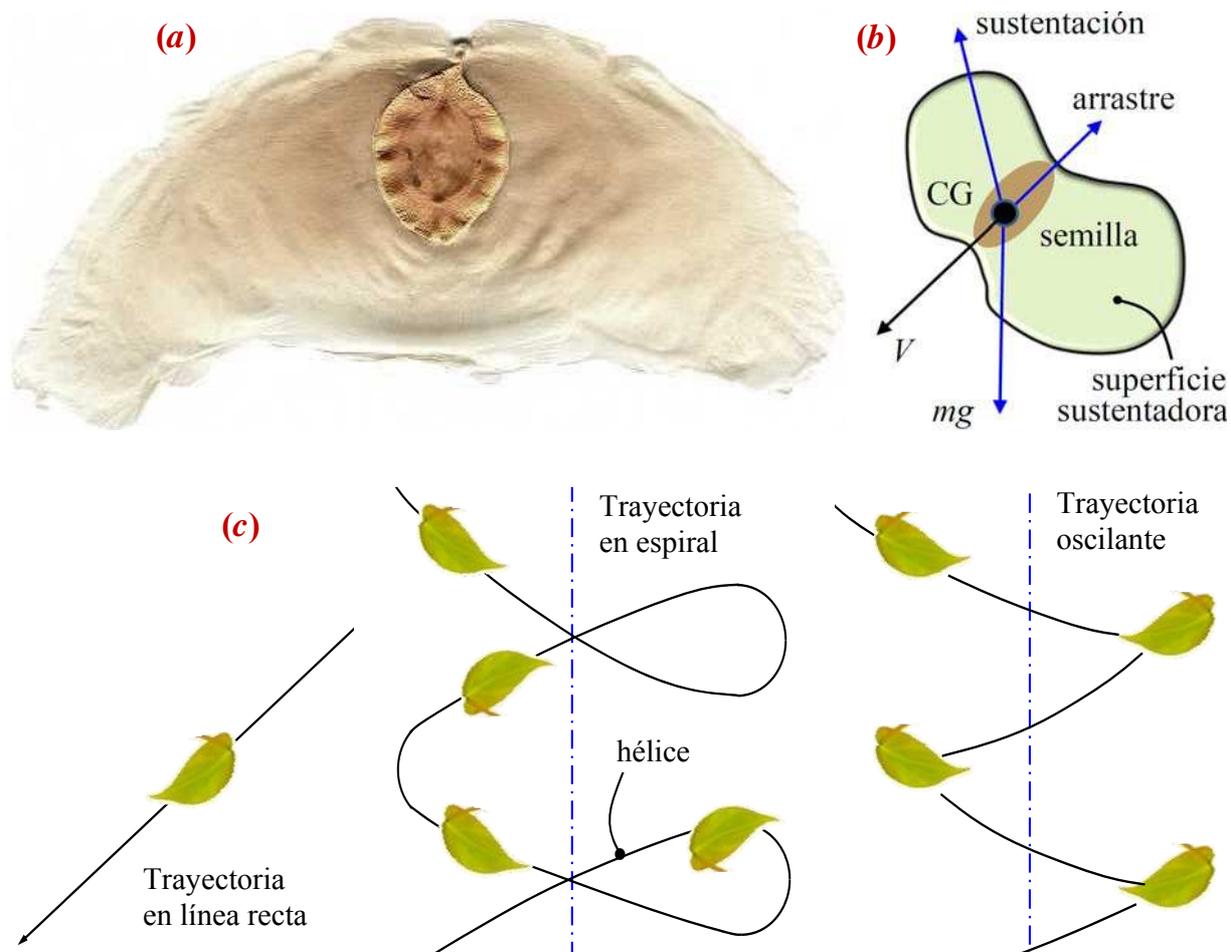


Figura 2: Semillas planeadoras. (a) *Alsomitra Macrocarpa* <http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/etrich.html>; (b) Aerodinámica del vuelo de una semilla en planeo (c) Ejemplos típicos de descenso de semillas planeadoras.

Las trayectorias que ejecutan las “*semillas planeadoras*” son muy variadas, siendo las más usuales: *i*) el descenso en línea recta; *ii*) el descenso en espiral; y *iii*) el descenso oscilante (o balanceo) (Minami and Azuma, 2003), ver Figura 2c. Al igual que en el estudio de aeronaves no propulsadas, las trayectorias que siguen las semillas de este grupo son determinadas por medio del balance de tres fuerzas: el peso, la fuerza de sustentación, y la fuerza de arrastre. En aire tranquilo, y para una trayectoria lineal, la distancia recorrida por la semilla es directamente proporcional a la altura desde la cual ésta es liberada.

Aquellas semillas que no pueden alcanzar la distancia suficiente para caer fuera de la “sombra” del árbol padre debido a una pobre relación sustentación/arrastre o porque exhiben una trayectoria en espiral u oscilante, difícilmente podrán germinar. Este punto evidencia nuevamente la gran importancia que tienen los mecanismos aerodinámicos en la dispersión de las semillas (Ward-Smith, 1984).

2.3 Semillas rodantes (*tumbleweeds*)

Esta estrategia de dispersión se presenta cuando grandes piezas de la planta (que tienen las semillas) se desenganchan de su raíz y comienzan a ser transportadas por el viento (Van der Pijl, 1982). Este método de dispersión es característico de especies de plantas generalmente esféricas que crecen en desiertos, praderas, estepas y otras áreas abiertas sujetas a vientos fuertes. Un mecanismo similar de dispersión es usado por las plantas que se desarrollan en las dunas de arena cerca de la orilla del mar. Mientras son empujadas por el viento, ruedan por el suelo liberando miles de semillas sobre amplias zonas (ver Figura 3a). Algunos ejemplos de este tipo de plantas son el cardo ruso (*Salsola Kali*, Figura 3b) y aquellas que crecen en las colinas de arena de Florida (*Baptisia lanceolata*).

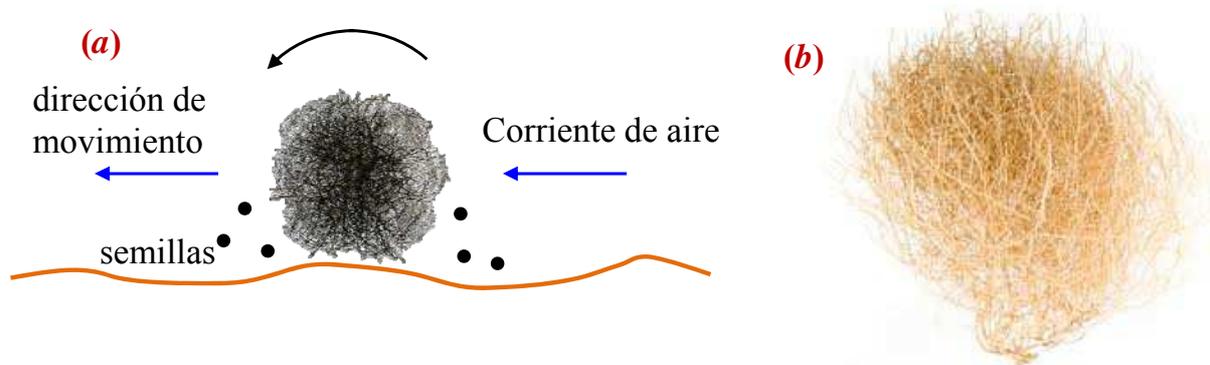


Figura 3: (a) Mecanismo de dispersión rodante (*tumbleweed*); (b) Cardo ruso <http://www.feedagg.com/feed/6567727/Buy-TumbleWeed-Now>.

2.4 Semillas autorrotantes (*spinning flight*)

Sin duda, uno de los diseños evolutivos más fascinantes dentro del reino vegetal son las semillas aladas que exhiben un movimiento de autorrotación mientras caen hacia el suelo. Como consecuencia de esta rotación las “semillas autorrotantes” (sámaras) descienden con una velocidad terminal mucho menor que el resto de las semillas que utilizan otros medios de dispersión aéreos. Específicamente, las diferencias más importantes entre las semillas que planean y aquellas que utilizan la autorrotación son: *i*) el centro de gravedad de toda la semilla está localizado en un extremo de la misma; y *ii*) el área del ala S es pequeña, pero el área del disco (o de barrido) A generada por la rotación del ala es grande (ver Tabla 2). La primera propiedad favorece el rápido inicio de la autorrotación, mientras que la segunda permite alcanzar un descenso estable de la semilla en su camino hacia el suelo.

Numerosos experimentos han mostrado que en una atmósfera tranquila ciertas sámaras (por ejemplo las semillas de arce, Figura 4a) pueden seguir dos tipos de trayectorias distintas. En el modo de vuelo más frecuente, el centro de rotación describe una línea vertical recta y coincide aproximadamente con la trayectoria descrita por el centro de masa; por otra parte, la curva espacial que traza la punta del ala mientras rota y desciende es una hélice simple (ver Figura 4c). Además de este tipo de vuelo, existe un segundo tipo más complejo que el anterior (ver Figura 4d), caracterizado por un movimiento compuesto en el cual el centro de rotación del ala también ejecuta un movimiento helicoidal (Ward-Smith, 1984).

A diferencia de los tipos de vuelo explicados anteriormente, las semillas del fresno (ver Figura 4b), por ejemplo, manifiestan un estilo de vuelo aún más complicado. Al igual que las sámaras del arce, el centro de masa de la semilla del fresno está muy próximo, o casi coincide con el centro de rotación de la semilla; punto alrededor del cual la punta de la sámara describe una curva tridimensional en forma de hélice. Sin embargo, observaciones detalladas han revelado que este tipo de sámaras rotan, además, alrededor de su eje longitudinal (McCutchen, 1977) (ver Figura 4e). Esta segunda rotación está caracterizada por una velocidad de giro que puede ser más grande que el movimiento de rotación principal; típicamente por cada vuelta completa alrededor del eje vertical, la sámara realiza entre una y seis revoluciones girando respecto de su eje longitudinal. Se debe destacar, que actualmente no es bien entendido que influencia tiene este movimiento adicional sobre la aerodinámica del sistema y más profundamente sobre la capacidad de dispersión de la semilla; Ward-Smith (1984) lo establece como un punto a considerar en futuras investigaciones.

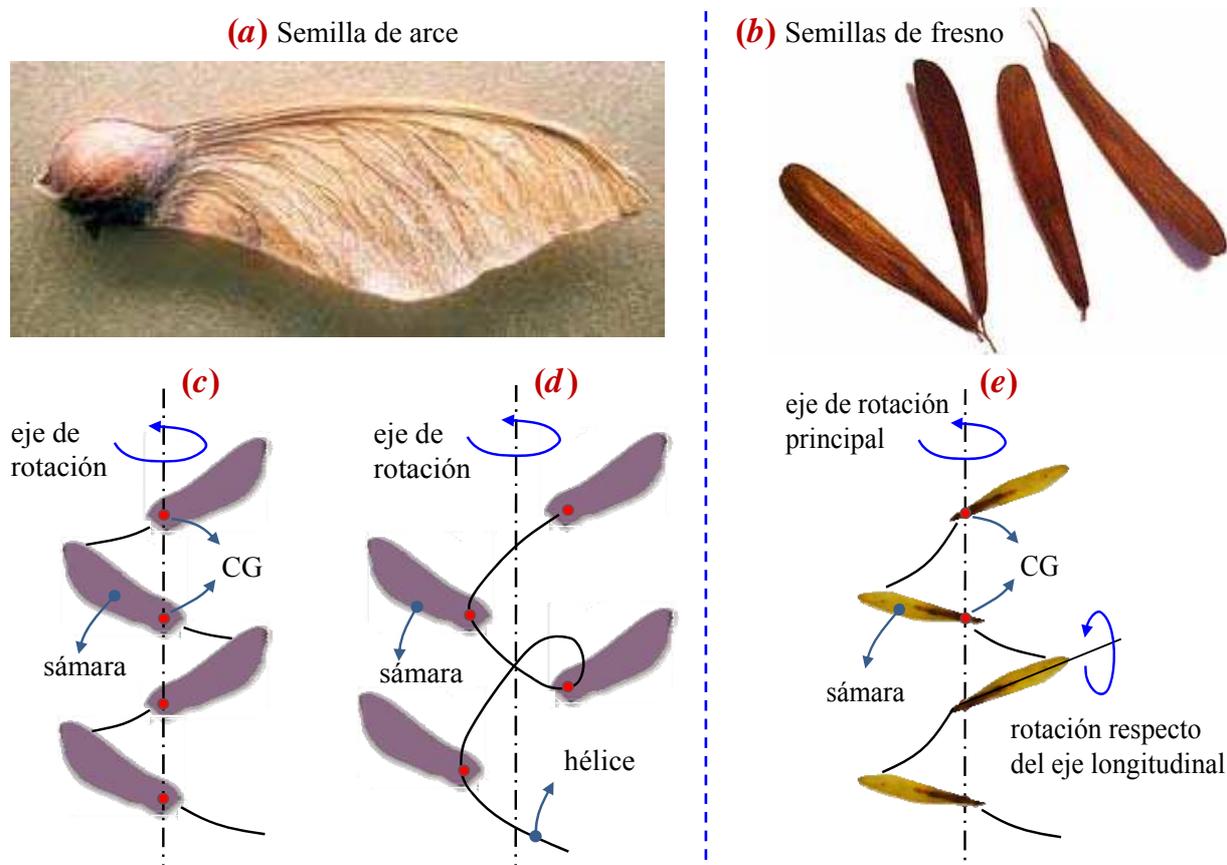


Figura 4: Semillas autorrotantes. (a) Semilla de arce; (b) Semilla de fresno; (c) Movimiento simple; (d) Movimiento compuesto; (e) Configuración de rotación respecto de dos ejes.

Por último, se debe mencionar que la notable similitud entre los movimientos que realizan las semillas autorrotantes y aquellos que describen las aspas de los helicópteros y autogiros, permite aplicar las teorías concebidas para estudiar rotores de helicópteros al análisis del comportamiento aerodinámico de las sámaras (Norberg, 1973).

3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

La geometría del modelo adoptado en este trabajo para estudiar la cinemática de las semillas autorrotantes se basa en la semilla del arce (*griseum pax*), dicho modelo se elaboró completamente en MATLAB[®], y se utilizó una técnica de parametrización con el fin de construir modelos de diferentes tamaños conservando las proporciones de la semilla (ver Figura 5). Se utilizaron elementos cuadriláteros simples de cuatro nodos para discretizar la superficie plana que modela el ala de la sámara.

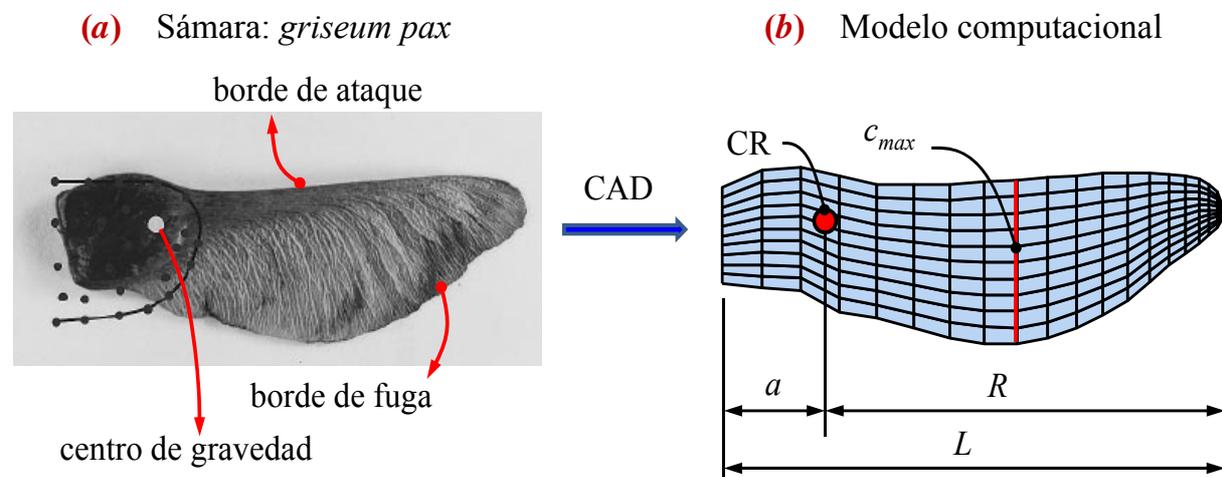


Figura 5: Geometría espacial del modelo adoptado;
(a) Fotografía de una sámara real; (b) Modelo construido en MATLAB[®].

La construcción del modelo computacional por medio de elementos cuadriláteros tiene por objetivo facilitar una futura implementación del método de red de vórtices no lineal y no estacionario (*unsteady vortex-lattice method*, UVLM) para conducir un estudio aerodinámico del vuelo de estas semillas (Roccia *et al.*, 2013). El modelo computacional implementa la formulación desarrollada en: *i*) el punto 3.1 sobre sistemas de referencia, *ii*) la sección 4 sobre parámetros cinemáticos y *iii*) la sección 5 referida a la cinemática del movimiento de la semilla en el espacio tridimensional.

En la Tabla 2 se presentan valores concernientes a la morfología y cinemática tanto para las sámaras que exhiben sólo un movimiento de rotación como en el caso de la semilla de arce como para aquellas que ejecutan dos movimientos de rotación mientras descienden como por ejemplo la semilla del fresno.

3.1 Sistemas de referencia

Los sistemas de referencia comúnmente utilizados para estudiar el movimiento del ala de una semilla voladora en ausencia de deformaciones son dos (Azuma y Yasuda, 1989): *i*) un sistema de referencia fijo al cuerpo, el cual se ubica en el centro de rotación de la semilla (CR); y *ii*) un sistema de referencia fijo a la tierra o inercial.

Propiedad	Semilla de arce	Semilla de fresno
		
Área del ala, S [cm ²]	3.04	1.84
Radio de rotación, R [cm]	2.85	2.67
Longitud del ala, L [cm]	3.62	3.64
Área barrida por el ala, A [cm ²]	25.5	22.4
Relación de aspecto, AR	4.33	7.22
Masa, $m \times 10^{-4}$ [Kg]	0.58	0.58
Velocidad angular principal, Ω [rpm]	977	889
Velocidad angular secundaria, ω [rpm]	-	877
Taza de descenso, V [m/seg]	0.82	1.72
Ángulo de cono, β [°]	23.7	31.7
Ángulo de ataque, α [°]	1.17	-
Número de Reynolds, Re	1370	790

Tabla 2: Características morfológicas y cinemáticas de la semilla de arce (*griseum pax*) y semilla de fresno (*fraxinus japónica blume*).

En este trabajo el sistema inercial sobre el ala es denotado por $\mathbf{B} = \{\hat{\mathbf{b}}_1, \hat{\mathbf{b}}_2, \hat{\mathbf{b}}_3\}$ y el sistema de referencia inercial por $\mathbf{N} = \{\hat{\mathbf{n}}_1, \hat{\mathbf{n}}_2, \hat{\mathbf{n}}_3\}$ (ver Figura 6).

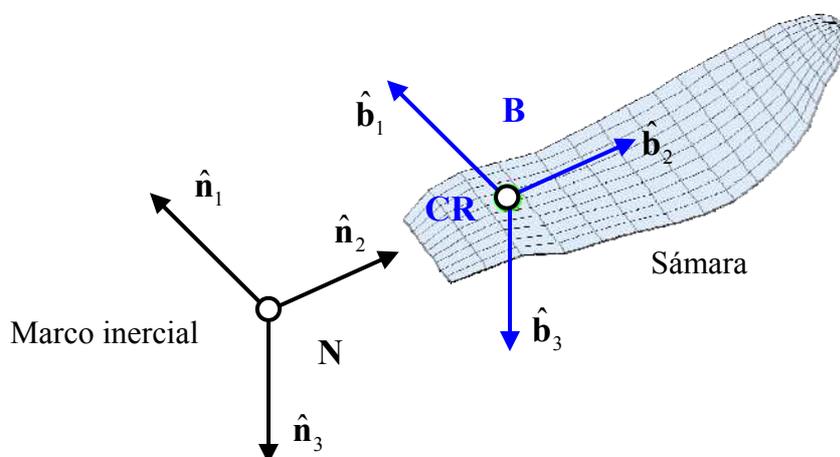


Figura 6: Definición de los sistemas de referencia.

Los vectores unitarios $\hat{\mathbf{n}}_i$ y $\hat{\mathbf{b}}_i$ para $i = 1, 2, 3$ cumplen con las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} [\hat{\mathbf{n}}_1, \hat{\mathbf{n}}_2, \hat{\mathbf{n}}_3] &= \hat{\mathbf{n}}_1 \cdot (\hat{\mathbf{n}}_2 \times \hat{\mathbf{n}}_3) = +1; \text{ y} \\ [\hat{\mathbf{b}}_1, \hat{\mathbf{b}}_2, \hat{\mathbf{b}}_3] &= \hat{\mathbf{b}}_1 \cdot (\hat{\mathbf{b}}_2 \times \hat{\mathbf{b}}_3) = +1. \end{aligned} \quad (1)$$

donde: \cdot indica producto interno, y \times indica producto vectorial.

Las condiciones impuestas por las ecuaciones (1) indican que el conjunto de vectores que forman los marcos de referencias \mathbf{N} y \mathbf{B} generan bases ortonormales y dextrógiras (cumplen con la regla de la mano derecha) (Shuster, 1993).

4 PARÁMETROS CINEMÁTICOS

El movimiento de la semilla en el espacio tridimensional está caracterizado por un conjunto de variables denominadas “parámetros cinemáticos”. A continuación se describen los principales parámetros cinemáticos que influyen tanto en el tipo de vuelo realizado por las semillas voladoras como en el movimiento del ala mientras desciende hacia el suelo.

4.1 Ángulo de cono (*conning angle*)

Cuando las sámaras descienden en un ambiente tranquilo, no adoptan una posición perfectamente horizontal, la punta del ala tiene una elevación significativa con respecto al otro extremo del ala (ver Figura 7). Específicamente, se define como ángulo de cono, β , al ángulo formado por el eje longitudinal de la sámara y el plano horizontal y es positivo cuando el ala se encuentra por encima del plano horizontal. Este ángulo tiene una influencia directa en la estabilización del movimiento rotacional de la sámara. De hecho, la aceleración centrípeta tiende a mover el ala hacia una posición horizontal, por el contrario, el momento generado por las fuerzas aerodinámicas tiende a mover el ala hacia el eje vertical. El ángulo de cono es la consecuencia de una condición de equilibrio entre el momento generado por las fuerzas no inerciales y el momento debido a las fuerzas aerodinámicas (Ward-Smith, 1984).

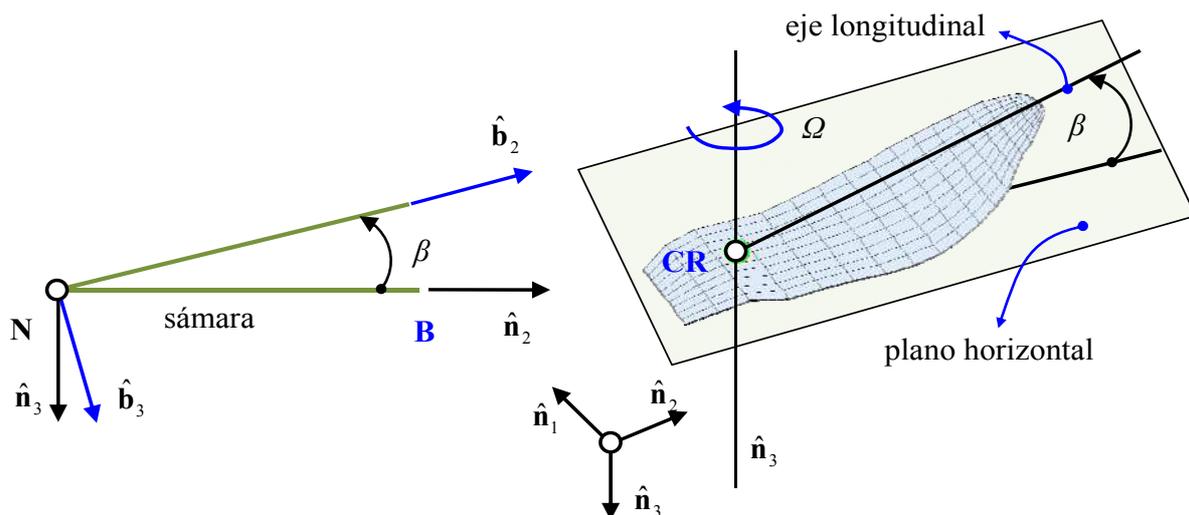
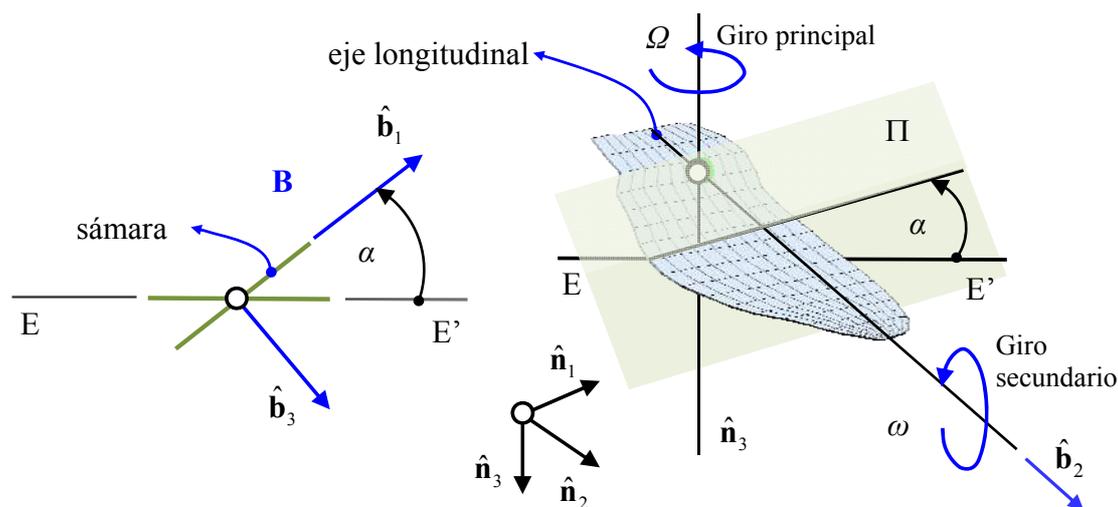


Figura 7: Definición del ángulo de cono (β)

4.2 Ángulo de ataque (*angle of attack*)

El ángulo de ataque, $\alpha(t)$, que especifica la rotación del ala respecto de su eje longitudinal, se mide sobre un plano, Π , perpendicular al vector unitario “ $\hat{\mathbf{b}}_2$ ” fijo al eje longitudinal del ala, y se define como el ángulo que forma la cuerda del ala con la recta $\overline{EE'}$ (ver Figura 8). La definición del sentido positivo de este ángulo responde a la regla de la mano derecha, es positivo cuando el ala rota en la dirección positiva del vector unitario $\hat{\mathbf{b}}_2$.

Existe otra definición para este ángulo que considera el ángulo formado por la cuerda del ala y el plano horizontal, $\theta(t)$. Esta manera de medir el ángulo de rotación fue utilizada en numerosos trabajos, en particular por Azuma y Yasuda (1989) en su tratado del vuelo de las semillas autorrotantes. En el caso de las semillas del fresno que exhiben un movimiento de rotación respecto de su eje longitudinal, el parámetro especificado es la velocidad angular.

Figura 8: Definición del ángulo de ataque (α).

5 CINEMÁTICA

La metodología empleada para escribir la cinemática de una semilla autorrotante que puede, o no, exhibir un movimiento de rotación alrededor de su eje longitudinal está basada en el trabajo de Roccia *et al.* (2011).

5.1 Transformación de coordenadas

Este enfoque consiste básicamente en definir dos marcos de referencias adicionales: *i*) un marco de referencia **A** que inicialmente coincide con el sistema de referencia inercial, **N**; y *ii*) un marco **Z** cuya orientación resulta de aplicar una sucesión de rotaciones sobre el marco **A**. Finalmente, el marco fijo al cuerpo de la semilla, **B**, tiene una traslación en la dirección \hat{n}_3 que varía con el tiempo; ésta dependencia está asociada a la tasa de descenso con la que la semilla se mueve hacia el suelo.

Para obtener la orientación del marco de referencia **Z** respecto del marco de referencia **A**, se utiliza una secuencia de ángulos de Euler (3–1–2) mediante el ángulo Ωt (ángulo generado por la velocidad angular asociada a la rotación principal en el tiempo t , ver Figura 7), y los ángulos β (ángulo de cono) y α (ángulo de ataque) previamente definidos. Cuando la semilla analizada pertenece al grupo de las sámaras que exhiben, además, una rotación respecto de su eje longitudinal, el ángulo de ataque α es reemplazado por el ángulo generado por la velocidad angular que caracteriza tal rotación, ωt (ver Figura 8).

A su vez, cada transformación tiene asociada una matriz ortogonal de rotación, de modo tal que la secuencia descrita anteriormente puede escribirse como el siguiente producto matricial,

$$[\mathbf{T}_{ZN}] = [\mathbf{T}_{ZA'(\alpha)}] [\mathbf{T}_{A'A(-\beta)}] [\mathbf{T}_{AN(-\Omega t)}]. \quad (2)$$

Si existe un movimiento de rotación alrededor del eje longitudinal, la ecuación (2) toma la siguiente forma:

$$[\mathbf{T}_{ZN}] = [\mathbf{T}_{ZA'(\omega t)}] [\mathbf{T}_{A'A(-\beta)}] [\mathbf{T}_{AN(-\Omega t)}]. \quad (3)$$

donde,

$$[\mathbf{T}_{ZN}] = \begin{bmatrix} c\alpha c\Omega t - s\alpha s\beta s\Omega t & -c\alpha s\Omega t - s\alpha s\beta c\Omega t & -s\alpha c\beta \\ c\beta s\Omega t & c\beta c\Omega t & -s\beta \\ s\alpha c\Omega t + c\alpha s\beta s\Omega t & -s\alpha s\Omega t + c\alpha s\beta c\Omega t & c\alpha c\beta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

donde s y c significan $\sin(\cdot)$ y $\cos(\cdot)$. Para tener en cuenta una velocidad de rotación respecto del eje longitudinal de la sámara se debe reemplazar α por ωt en la ecuación (4).

El marco de referencia \mathbf{B} tiene una traslación respecto del marco \mathbf{Z} , por lo tanto,

$$[\mathbf{T}_{BN}] = [\mathbf{T}_{ZN}]. \quad (5)$$

5.2 Velocidades y aceleraciones

El vector posición de un punto material contenido en el ala (ver Figura 9) está dado por,

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 + \mathbf{r}, \quad (6)$$

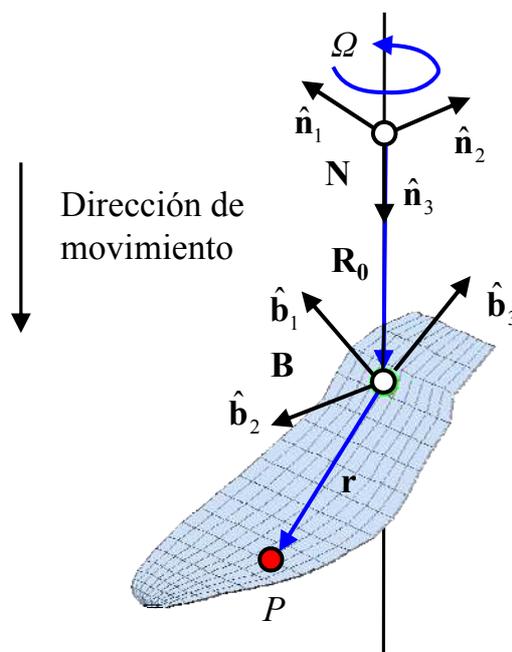


Figura 9: Vector posición de un punto genérico P sobre el ala.

En este trabajo solo expondremos la expresión final para la velocidad y la aceleración de un punto arbitrario P sobre el ala. El lector puede derivar dichas fórmulas siguiendo el procedimiento descrito en (Roccia *et al.*, 2011).

El vector velocidad angular del marco \mathbf{B} respecto del marco inercial \mathbf{N} es calculado mediante el teorema de adición (Kane, 1968). Teniendo en cuenta la secuencia de ángulos de Euler presentada anteriormente se tiene,

$$\boldsymbol{\omega} = \Omega \hat{\mathbf{n}}_3 + \omega \hat{\mathbf{b}}_2, \quad (7)$$

Para el grupo de semillas que no exhiben un giro alrededor de su eje longitudinal, la expresión (7) se reduce a $\boldsymbol{\omega} = \Omega \hat{\mathbf{n}}_3$.

Finalmente, la velocidad respecto del marco \mathbf{N} de un punto genérico P sobre el ala resuelta en términos del marco de referencia \mathbf{N} es,

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{R}} &= \dot{\mathbf{R}}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}, \\ &= V_D \hat{\mathbf{n}}_3 + \bar{\boldsymbol{\omega}} \mathbf{r}.\end{aligned}\quad (8)$$

donde el punto sobre la variable indica derivada con respecto al tiempo, V_D es la tasa de descenso definida en la Tabla 2, y $\bar{\boldsymbol{\omega}}$ es un tensor antisimétrico asociado al vector axial velocidad angular $\boldsymbol{\omega}$. Las componentes de $\bar{\boldsymbol{\omega}}$ referidas al marco inercial \mathbf{N} son:

$$\bar{\boldsymbol{\omega}} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

donde,

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \cos(\beta) \sin(\Omega t) \omega, \\ \omega_2 &= \cos(\beta) \cos(\Omega t) \omega, \quad y \\ \omega_3 &= -\sin(\beta) \omega + \Omega t\end{aligned}\quad (10)$$

Por último, la aceleración respecto del marco \mathbf{N} de un punto genérico P sobre el ala resuelta en términos del marco de referencia \mathbf{N} es,

$$\ddot{\mathbf{R}} = \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \mathbf{r}.\quad (11)$$

Finalizamos esta sección remarcando que el presente trabajo constituye un nexo entre el lenguaje descriptivo usado por los biólogos y el lenguaje predictivo utilizado por los ingenieros. El modelo desarrollado en este esfuerzo es la base sobre la cual se pretende posteriormente acoplar un modelo aerodinámico no estacionario y un modelo dinámico no lineal, como se describe en la sección 6, con el objeto de estudiar un fenómeno que presenta aún muchos interrogantes como por ejemplo la transición entre la caída libre de la semilla y el inicio de la autorrotación. Otro aspecto muy poco comprendido es la intrincada relación que existe entre el flujo 3D y las propiedades inerciales que dan lugar a un descenso estable.

6 SIMULACIONES NUMÉRICAS

Como caso de estudio, en esta sección se presentan resultados numéricos relativos a las trayectorias espaciales que describen diferentes puntos pertenecientes al ala de una semilla autorrotante. Además, se presentan curvas para el módulo de la velocidad de tales puntos. En este trabajo se limita el estudio al tipo de semilla que ejecuta sólo un movimiento de rotación (el principal, Ω), siendo la velocidad angular secundaria ω idénticamente igual a cero.

El código computacional para simular la cinemática de las sámaras fue desarrollado íntegramente en MATLAB® y permite ingresar funciones en forma discreta para representar la evolución temporal del ángulo de cono β , y el ángulo de ataque α . El programa cuenta con una rutina de preprocesamiento que interpola los datos discretos.

El post-procesamiento de los datos permite obtener: *i*) visualizaciones de las trayectorias que siguen las alas a lo largo de un ciclo de descenso, *ii*) proyecciones 2D de las trayectorias 3D que describen puntos seleccionados sobre el ala, como así también, *iii*) gráficos de la velocidad y aceleración de dichos puntos.

6.1 Trayectorias y velocidades de puntos genéricos sobre el ala

En la figura 10 se presenta la trayectoria tridimensional de dos puntos pertenecientes al ala de una sámara: uno ubicado sobre la punta del ala (trayectoria en color azul) y otro localizado sobre el eje longitudinal del ala en una estación ubicada al 50% de la longitud del ala (trayectoria en color rojo). Los datos utilizados para llevar a cabo las simulaciones numéricas están expuestos en la Tabla 2 y se listan a continuación en la Tabla 3 por conveniencia.

Propiedades	Semilla de arce
Radio de rotación, R [cm]	2.85
Longitud del ala, L [cm]	3.62
Velocidad angular principal, Ω [rpm]	977
Tasa de descenso, V_D [m/seg]	0.82
Ángulo de cono, β [°]	23.7
Ángulo de ataque, α [°]	1.17

Tabla 3: Características morfológicas y parámetros cinemáticos del modelo de semilla de arce utilizado.

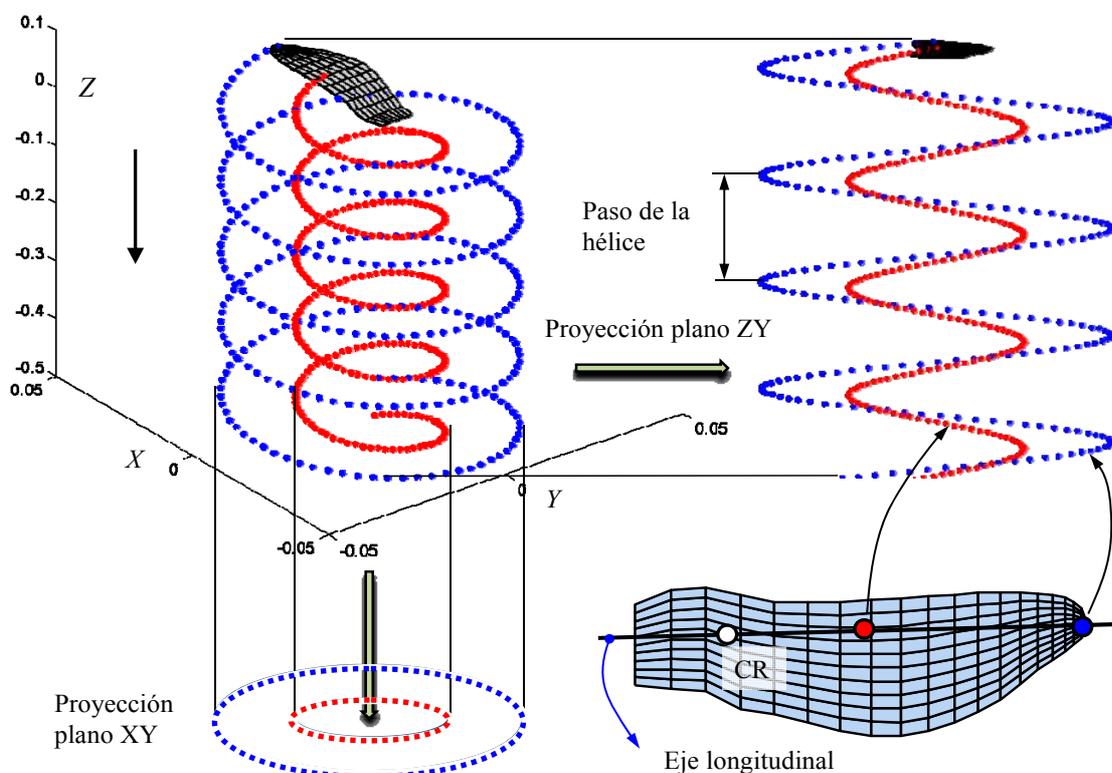


Figura 10: Trayectorias 3D y proyecciones 2D de dos puntos arbitrarios sobre el ala.

Para el estudio de trayectorias y velocidades de puntos genéricos sobre el ala es necesario definir formalmente, el ángulo de ataque efectivo, $\alpha_e(t)$, que es el ángulo formado entre una línea de referencia sobre el cuerpo (generalmente la cuerda del ala) y la dirección de la corriente de aire incidente. No se debe confundir este ángulo con el ángulo de ataque descrito en la Subsección 4.2 el cual es puramente geométrico y su definición tiene por objetivo contribuir al cálculo de la orientación del ala en cada instante de tiempo. El cómputo de $\alpha_e(t)$ requiere el conocimiento de la velocidad con la cual la corriente de aire incide sobre la planta alar. Tal información puede extraerse del cálculo de la velocidad para un punto arbitrario P , V_P , contenido en el ala. Se debe remarcar, además, que el ángulo de ataque efectivo cambia a medida que nos movemos en la dirección de la envergadura del ala como consecuencia del movimiento de autorrotación.

En la Figura 11 se presenta una simulación numérica de la sámara definida en la Tabla 3 en movimiento descendente (Figura 11a), Además se muestran las curvas de velocidad (Figura 11b) para la punta del ala, y un punto situado al 50% de la envergadura, y un esquema (Figura 11c) que muestra como se determina el ángulo de ataque efectivo $\alpha_e(r,t)$. En la Figura 11c se puede observar que el ángulo de ataque efectivo se incrementa hacia el centro de rotación donde vale 90° y disminuye hacia la puntera, mientras que el ángulo de cono, β , y el ángulo de ataque geométrico, $\alpha(t)$, permanecen constantes a través de todo el movimiento de descenso de la sámara. El parámetro aerodinámico $\alpha_e(r,t)$ tiene una influencia directa en la producción de sustentación.

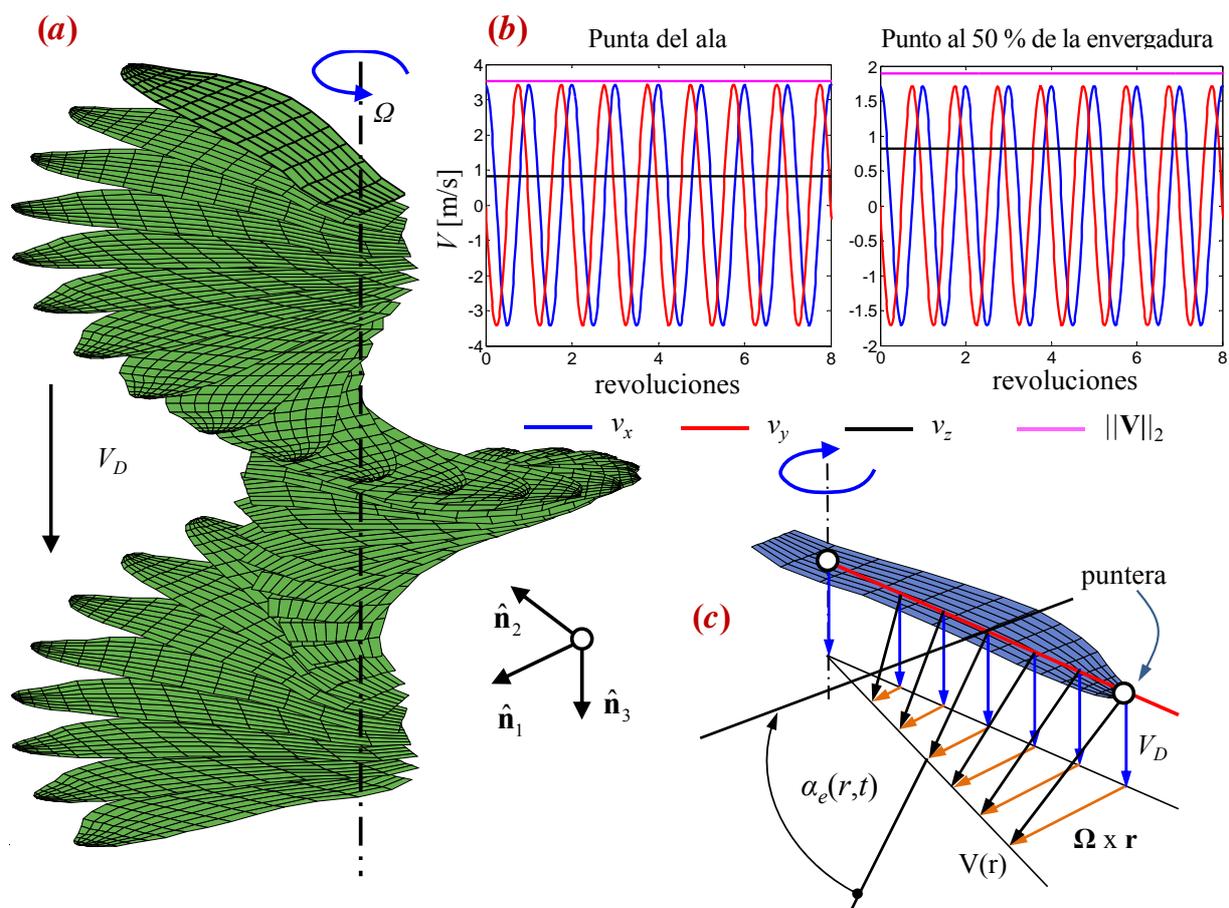


Figura 11: (a) Simulación numérica del descenso de la sámara; (b) Velocidad de dos puntos pertenecientes al ala; (c) Variación del vector velocidad como función de r y definición del ángulo de ataque efectivo $\alpha_e(r,t)$.

En aeronaves convencionales y palas de helicóptero, la fuerza de sustentación aumenta con el ángulo de ataque hasta un valor crítico. Un aumento del ángulo de ataque efectivo más allá de ese punto produce una separación continua del flujo, el cual es transportado por el fluido corriente abajo cubriendo toda la superficie superior del ala. Esto causa un descenso brusco de la velocidad, un aumento de la presión, y por consiguiente una pérdida catastrófica de las fuerzas de sustentación. Este fenómeno es conocido frecuentemente como “entrada en pérdida” en la terminología de aerodinámica de aviones. Sin embargo, se sabe que los insectos voladores generan altos niveles de sustentación incluso cuando ellos operan a ángulos de ataque mayores al valor crítico; efecto que se debe a la generación de un vórtice sobre el borde de ataque (LEV). Lentink *et al.* (2009) conjeturaron que este fenómeno se produce también en las semillas autorrotantes.

Los resultados numéricos presentados en esta sección sólo cubren el caso de trayectorias de sámaras autorrotantes y la velocidad de algunos puntos ubicados sobre la semilla mientras ésta describe una cinemática preestablecida (prefijada). El estudio está limitado al tipo de semilla que ejecuta sólo un movimiento de rotación (el principal, Ω), siendo la velocidad angular secundaria ω idénticamente igual a cero.

Es importante destacar que en este trabajo sólo se presentan resultados preliminares de un proyecto de investigación más ambicioso que está en pleno desarrollo y cuyas objetivos se describen en la sección 8 referida a trabajos futuros.

7 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una pormenorizada revisión bibliográfica sobre el estado del arte concerniente a la cinemática y aerodinámica de las “*semillas voladoras*” y se desarrolló una formulación matemática que permite estudiar en detalle la cinemática en el caso particular de las “*semillas autorrotantes*” en su movimiento de descenso hacia el suelo. A partir de esa formulación se implementó un código computacional interactivo que sirve como nexo entre el lenguaje “descriptivo” utilizado por los biólogos y el lenguaje “predictivo” usado por los ingenieros.

El código desarrollado facilita el estudio y análisis de los patrones cinemáticos asociados al vuelo de diferentes “*semillas aladas*” y está previsto continuar su desarrollo para incluir en el modelo el sistema de ecuaciones que gobiernan la aerodinámica de la caída de las semillas autorrotantes hasta llegar al suelo. Ese modelo aerodinámico permitirá caracterizar los principales parámetros cinemáticos que intervienen en la transición entre la caída libre y el inicio de la autorrotación y estudiar la influencia de esos parámetros en la tasa de descenso.

La geometría del modelo adoptado en este trabajo para estudiar la cinemática de las semillas autorrotantes se basa en la semilla del arce, dicho modelo se elaboró completamente en MATLAB[®], y se utilizó una técnica de parametrización con el fin de construir modelos de diferentes tamaños conservando las proporciones de la semilla. Se utilizaron elementos cuadriláteros simples de cuatro nodos para discretizar la superficie plana que modela al ala de la sámara para facilitar una futura implementación del método de red de vórtices no lineal y no estacionario (*unsteady vortex-lattice method*, UVLM) para conducir un estudio aerodinámico del vuelo de estas semillas autorrotantes.

Como resultado preliminar de los estudios en desarrollo y a través de una simulación numérica se mostró que cuando se prescribe la velocidad de rotación y los ángulos de cono y de ataque, el código computacional aquí presentado es capaz de calcular correctamente las trayectorias espaciales que describen diferentes puntos pertenecientes al ala de semillas autorrotantes, y también la velocidad y la aceleración de tales puntos.

Como tarea a futuro y dentro de la misma línea de investigación seguida en este trabajo está previsto desarrollar herramientas de simulación para estudiar la dinámica y aerodinámica de semillas autorrotantes, y desarrollar sistemas dinámicos finitos para estudiar la aeroservoelasticidad de micro-vehículos aéreos basados en esta nueva filosofía de diseño.

8 TRABAJOS FUTUROS

El modelo desarrollado en este esfuerzo es la base sobre la cual se pretende posteriormente acoplar un modelo aerodinámico no estacionario y un modelo dinámico no lineal con el objeto de estudiar un fenómeno que presenta aún muchos interrogantes. Uno de ellos es la transición entre la caída libre de la semilla y el inicio de la autorrotación. Otro aspecto muy poco comprendido es la intrincada relación que existe entre el flujo 3D y las propiedades inerciales que dan lugar a un descenso estable.

El modelo aerodinámico que se prevé implementar sobre la base del modelo cinemático aquí desarrollado es una versión modificada y ampliada del método general de red de vórtices no-lineal e inestacionario (*unsteady vortex lattice method* o UVLM) que permite modelar correctamente no linealidades aerodinámicas asociadas con grandes ángulos de ataque, deformaciones estáticas y flujos dominados por vorticidad en los que el fenómeno conocido como vortex bursting no ocurre.

Si bien el número de Reynolds que caracteriza el flujo real en las semillas voladoras es relativamente bajo puede considerarse que tiene un valor lo suficiente alto como para asumir que los efectos viscosos están confinados únicamente a las capas límites que envuelven al sólido inmerso en el fluido y a las estelas que se desprenden desde los bordes filosos del ala de la sámara, el flujo se considera irrotacional fuera de estas dos regiones. Este hecho permitirá utilizar un modelo basado en el método de red de vórtices inestacionario y no-lineal. Por otro lado, el método basado en el UVLM, se ha utilizado en numerosas y variadas aplicaciones produciendo predicciones precisas de las fuerzas aerodinámicas de sustentación inestacionarias y no-lineales (Preidikman, 1998; Roccia *et al.*, 2013).

Como resultado del movimiento relativo entre el ala y el aire en reposo, se generan gradientes de velocidad que originan vorticidad concentrada en una delgada región adherida a la superficie del ala (capa límite). Esta sábana vorticiosa se separa desde los bordes filosos, y es convectada hacia el seno del fluido para formar la estela. Estas se representan mediante sábanas vorticosas libres, y sus posiciones no son especificadas ya que pueden deformarse libremente hasta adoptar configuraciones libres de fuerzas, esto es, no se produce ningún salto de presiones a través de las estelas.

Con respecto al modelo dinámico que se implementará, en una primera etapa la sámara se modelará como cuerpo rígido. Las propiedades másicas: masa, posición del centro de masa y tensor de inercia se calcularán respecto de un marco de referencia fijo a cada cuerpo, B.

Las ecuaciones de movimiento de la semilla se escribirán siguiendo una formulación energética basada en las ecuaciones de Lagrange. La energía cinética y potencial se derivarán utilizando un conjunto de seis coordenadas absolutas $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_6)$ respecto de un marco de referencia inercial, \mathbf{N} , (3 coordenadas para definir la posición de un punto fijo al cuerpo, y 3 coordenadas para definir su orientación). Esto dará un total de seis coordenadas generalizadas. Las fuerzas externas aplicadas al sistema se originan en dos fuentes diferentes: las fuerzas generalizadas no-conservativas provenientes de la aerodinámica y las fuerzas conservativas debidas a la acción del campo gravitatorio terrestre.

Por último, en una etapa posterior se considerará a la sámara como deformable y el acoplamiento entre los dos modelos será del tipo fuerte debido a que las cargas aerodinámicas “deforman” la sámara, y a su vez, esta “deformación” modifica las cargas aerodinámicas actuantes sobre las superficies alares.

REFERENCIAS

- Azuma, A., and Yasuda, K., Flight performance of rotary seeds. *Journal of Theoretical Biology*, 138:23-53, 1989.
- Azuma, A., and Yasuda, K., The autorotation boundary of the flight of samaras. *Journal of Theoretical Biology*, 185:313-20, 1997.
- Birch, J.M., and Dickinson, M.H., Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings. *Nature*, 412:729-733, 2001.
- Burke, J.D., Atmospheric autorotating imaging device, NASA Patent NPO-17390, 1989.
- Burrows, F.M., Wind-borne seed and fruit movement. *New Phytol.*, 75:405-418, 1975.
- Dickinson, M.H., Lehmann, F.O. and Sane, S.P., Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight. *Science*, 284:1954-1960, 1999.
- Dickinson, M.H., Insect flight. *Current Biology*, 16(9):309-314, 2006.
- Elimelech, Y., and Ellington, C.P., Analysis of the transitional flow field over a fixed hummingbird wing. *Journal of Experimental Biology*, 216:303-318, 2013.
- Ellington, C.P., The aerodynamics of hovering insect flight. IV. Aerodynamics Mechanisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 305(1122):79-113, 1984.
- Ellington, C.P., The Novel Aerodynamics of Insect Flight: Applications to Micro-Air vehicles. *Journal of Experimental Biology*, 202(23):3439-3448, 1999.
- Fredericks, W.J., Conceptual design of a vertical takeoff and landing unmanned aerial vehicle with 24-HR endurance. NASA Technical Report, *AUVSI Unmanned Systems North America 2010*; Denver, USA, 24-27 August, 2010.
- Fregene, K., Sharp, D., Bolden, C., King, J., Stoneking, C., and Jameson, S., Autonomous guidance and control of a biomimetic single-wing MAV, AUVSI, 2011.
- Green, D.S., The terminal velocity and dispersal of spinning samaras. *Amer. Journal Bot.*, 67(8):1218-1224, 1980.
- Horn, H.S., Nathan, R., and Kaplan, S.R., Long-distance dispersal of tree seeds by wind. *Ecological Research*, 16:877-885, 2001.
- Jameson, S., Allen, N., and Youngren, H., SAMARAI nano air vehicle: A revolution in flight. *AUVSI Unmanned Systems North America Conference Proceedings*, Washington, D.C., Aug. 2007.
- Kane T.R., *Dynamics*. Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1968.
- Lentink, D., Dickson, W.B., van Leeuwen, J.L., and Dickinson, M.H., Leading-edge vortices elevate lift of autorotating plant seeds. *Science*, 324:1440-1438, 2009.
- McCutchen, C.W., The spinning rotation of ash and tulip tree samaras. *Science*, 197:691-692, 1977.
- Minami, S., and Azuma, A., Various flying modes of wind dispersal seeds. *Journal of Theoretical Biology*, 225:1-14, 2003.
- Mueller, T.J. and Delaurier, J.D., An overview of micro air vehicle aerodynamics. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 195:1-10, 2001.
- Nathan, R., Long-distance of dispersal plants. *Science*, 313:786-788, 2006.

- Norberg, R.A., Autorotation, self-stability, and structure of single-winged fruits and seeds (samaras) with comparative remarks on animal flight, *Biol. Rev.*, 48:561-96, 1973.
- Pandolfi, C., and Izzo, D., Biomimetic on seed dispersal: survey and insights for space exploration. *Bioinspiration & Biomimetics*, 8:025003 – 9pp, 2013.
- Preidikman, S., Numerical simulations of interactions among aerodynamics, structural dynamics, and control systems, Ph.D. Dissertation, Department of Engineering Science and Mechanics, Virginia Tech, 1998.
- Ridley, H.N., On the dispersal of seeds by wind. *Ann. Bot. Lond*, 19:351-363, 1905.
- Ridley, H.N., *The Dispersal of Plants Throughout the World*, Reeve, Ashford, 1930.
- Roccia, B.A., Preidikman, S., Massa J.C. and Mook, D.T., Development of a kinematical model to study the aerodynamics of flapping-wings. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 3(2):61-88, 2011.
- Roccia, B.A., Desarrollo de simulaciones numéricas para el estudio del vuelo de micro vehículos aéreos de alas batientes inspirados en la biología, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba, pp. 6-8, 2013.
- Roccia, B.A., Preidikman, S., Massa, J.C., and Mook, D.T., Modified unsteady vortex-lattice method to study flapping wings in hover flight. *AIAA Journal*, In Press, 2013.
- Salcedo, E., Treviño, C., Vargas, R.O., and Martínez-Suástegui, L., Stereoscopic particle image velocimetry measurements of the three-dimensional flow field of a descending autorotating mahogany seed (*Swietenia macrophylla*). *The Journal of Experimental Biology*, 216:2017-2030, 2013.
- Seter, D., and Rosen, A., Stability of the vertical autorotation of a single-winged samara. *Journal of Applied Mechanics*, 59:1000-1008, 1992.
- Shuster, M.D., A survey of attitude representations. *Journal of the Astronautical Sciences*, 41(4):439-517, 1993.
- Ulrich, E.R., Humbert, J.S., and Pines, D.J., Pitch and heave control of robotic samara micro air vehicles. *Journal of Aircraft*, 47(4):1290-1299, 2010.
- Usherwood, J.R. and Ellington, C.P., The Aerodynamics of Revolving Wings I. Model Hawkmoth Wings. *Journal of Experimental biology*, 205:1547-1564, 2002.
- Van der Pijl, L., *Principles of Dispersal in Higher Plants*, Springer London, Limited, 1982.
- Varshney, K., Chang, C., and Wang, Z.J., The kinematics of falling maple seeds and the initial transition to helical motion. *Nonlinearity*, 25:C1-C8, 2012.
- Ward-Smith, A.J., *Biophysical Aerodynamics and the Natural Environment*. John Wiley & Sons, New York, 1984.
- Webber, M.L., Fruit dispersal. *Malayan Forester*, 3:18-19, 1934.