

# **REVISIÓN DE MÉTODOS UTILIZADOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL VIENTO EN CULTIVOS (2019-2023)**

Rodolfo Dematte<sup>1,2</sup>; Facundo Olea<sup>1</sup>; Josefina Huespe<sup>1</sup>y Ernesto Gandolfo Raso<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unidad Investigativa: Epistemología, Lógica y Ciencias Básicas.  
Grupo IEMI Grupo orientado a la realización de Investigaciones en Matemática Aplicada  
a la Ingeniería y Gestión.  
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza Coronel Rodríguez 273,  
M5500 Mendoza, Argentina

<sup>2</sup> Instituto de Energías Naturales Renovables. Centro de Investigación e Innovación  
Tecnológica. SeCyT. UNLaR. Gdor. Luis Vernet y Apóstol Felipe, M5300, La Rioja,  
Argentina

\* [rdematte@gmail.com](mailto:rdematte@gmail.com)

**Resumen:** Se realizó una revisión sistemática que abarca las publicaciones de los últimos 5 años (2019-2023). Se relevaron las distintas técnicas experimentales y las teóricas utilizadas en el examen de la dinámica del viento dentro de los doceles vegetales protegidos con cortinas rompevientos. Materiales y métodos: se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en los repositorios académicos ScienceDirect® y Google Scholar®, empleando palabras clave específicas relacionadas con estudios del comportamiento del viento en contextos agrícolas. El alcance temporal de la búsqueda se limitó al período comprendido entre 2019 y 2023. Se recopilaron y analizaron los avances más recientes en el campo de la investigación de la interacción viento - planta. Los hallazgos obtenidos muestran los progresos realizados, además de revelar líneas potenciales de investigación aún no exploradas. Se destacan nuevas técnicas emergentes que aún están en etapas de desarrollo.

**Palabras claves:** Viento, cultivos, cortinas rompevientos, túnel de viento, Fluido Dinámica Computacional.

## **INTRODUCCIÓN**

El viento puede influir de manera significativa en los doceles de los cultivos. Entre los aspectos positivos, el viento ayuda a transportar el polen y las semillas, contribuye a regular la temperatura de los cultivos y favorece a la difusión de los gases que generan, a su vez influye en el fortalecimiento de la resistencia mecánica de las plantas como respuesta adaptativa. Si bien el viento tiene aspectos beneficiosos en los cultivos, también influye de manera negativa, dependiendo de la velocidad del viento puede producir en las plantas: desecación, daño físico, dispersión de enfermedades, pérdida de floración y caída de frutos; además afectar el ambiente circundante a causa de la erosión eólica y la pérdida de nutrientes en el suelo. En paralelo, la acción del viento moviliza las partículas de suelo que permanecen en el aire (Golberg, 2010) y su permanencia en el ambiente afectan a la salud humana (Miri, Dragovich & Dong, 2017).

Algunas de las investigaciones apuntan a estudiar sólo el efecto del viento en los cultivos (Miri, Dragovich & Dong, 2017; Sherman, 2020), pero esta metodología también sirve para analizar los fenómenos de dispersión en la aplicación de agroquímicos y evaluar la cantidad de erosión del suelo (Golberg, 2010; Miri, Dragovich & Dong, 2017). Por otra parte, existen diversas investigaciones que se focalizan en el análisis de la incidencia del viento sobre las cortinas forestales utilizadas desde hace mucho tiempo para mitigar los efectos adversos del viento (Oberschelp et al., 2020).

Como punto de partida se analizó la revisión Turbulent Flow in Plant Canopies: Historical Perspective and Overview (Brunett, 2020) en el que hace un análisis histórico ex post facto sobre el estudio del flujo turbulento en el dosel de las plantas y arboledas. Esta revisión histórica abarca el periodo de 50 años (1970-2020), evalúa las diferentes variantes del estudio del comportamiento del viento sobre los cultivos vegetales, este análisis está focalizado en cultivos con doceles homogéneos. Mucho se ha investigado sobre el tema, pero la información se encuentra dispersa, por ello el presente review surge de la necesidad de sintetizar el conocimiento generado en los últimos 5 años.

A partir de la investigación de Brunett (2020) se propone en el presente Review evaluar cuál es el estado actual de las investigaciones sobre los métodos de evaluación del impacto de viento en cultivos en el periodo 2019-2023.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura científica utilizando varios repositorios y bases de datos académicas, incluidos en ScienceDirect ® y Google Scholar ®. Se utilizaron palabras clave específicas relacionadas con el estudio del viento en cultivos, incluyendo "*wind tunnel*", "*CFD*", "*windbreakers*", "*crops*", y "*canopy*". La búsqueda se limitó al período de tiempo comprendido entre 2019 y 2023 para asegurar la inclusión de los estudios más recientes. Los artículos seleccionados fueron evaluados en base a criterios predefinidos. Se incluyeron aquellos estudios que abordaban específicamente el estudio del viento en cultivos utilizando técnicas como túneles de viento, dinámica de fluidos computacional (CFD) y/o evaluaciones de la efectividad de barreras cortavientos. Se excluyeron los artículos que no estaban disponibles en texto completo, y aquellos que no abordaban directamente el tema de interés.

## **RESULTADOS**

Solamente 34 artículos superaron esta instancia. Se resumieron y analizaron los hallazgos clave de cada artículo, centrándose en los métodos utilizados para estudiar el viento en cultivos y su impacto en los cosecheros. Se identificaron tendencias emergentes, lagunas en la investigación y áreas de interés para futuros estudios en el campo (Tabla 1).

**Tabla 1**

*Detalle de las publicaciones evaluadas en la presente revisión*

Autores	Tema del artículo	Metodología	Objeto analizado	Método de contrastación
Año 2019				
Gonzales, et al.	Drag coefficients	CFD OpenFOAM	Vegetation canopy	Empirical models
Phillips & Soligo	Wind flow dynamics	Review	Buildings and crops	Comparatives studies
Cheng, et al.	Wind flow dynamics	Wind-tunnel	Vegetation canopy	Experimental dataset
Shnapp et al.	Lagrangian wind flow dynamics Additive manufacture technology models	Real-time image analysis system	Vegetation canopy	Wind tunnel experiment
Zhu	Wind flow dynamics	CFD OpenFOAM	Objects	Wind tunnel experiment
Hesp, et al.	Wind flow dynamics	Wind-tunnel	Vegetation canopy	Experimental dataset
Año 2020				
Gonçalves, Linhares & Yojo	Drag coefficients	Review		Comparatives studies
Gough et al.	Wind pressure	Wind-tunnel	Buildings	CFD OpenFOAM
Ismail et al.	Wind turbulence models	CFD OpenFOAM	Turbulence models	Wind tunnel experiment
Kim et al.	Wind flow dynamics	CFD OpenFOAM	Green	HNVR-SYS
Kučera et al.	Wind erosion	Optical porosity in windbreaks	Agricultural landscape	Empirical models
Makedonas et al.	Wind flow dynamics	Wind-tunnel	Vegetation canopy	Experimental dataset
Qin, et al.	Wind flow dynamics in seeds	Wind-tunnel	Vegetation canopy	Experimental dataset
Zhang	Wind pressure	Wind-tunnel	Buildings	Experimental dataset
Brunet	Wind flow dynamics	Review	Vegetation canopy	Comparatives studies
Sherman et al.	Wind flow dynamics	Review	Objects	Comparatives studies

**Tabla 1 (Continuación)**

Autores	Tema del artículo	Metodología	Objeto analizado	Método de contrastación
Año 2021				
Guo, et al.	Vegetative windbreaks	CFD OpenFOAM	Vegetation canopy	Wind tunnel experiment
Gardiner et al.	Wind flow dynamics	Review	Vegetation canopy	Comparatives studies
Año 2022				
H'ng, et al.	Wind flow dynamics	Wind-tunnel	Vegetation canopy	Empirical models (continua...)
Ismail et al.	Design wind tunnel	Wind-tunnel	Wind tunnel	Wind tunnel experiment
Mo et al.	Drag coefficient	Wind-tunnel	Vegetation canopy	Wind tunnel experiment
Qin, et al.	Wind flow dynamics in seeds	Wind-tunnel	Vegetation canopy	Experimental dataset
Scagnellato et al.	Spraying in canopy	Algorithm	Vegetation canopy	Simulations
An et al.	Permeability windbreaks	Wind tunnel experiment	Vegetation canopy	Phonics software
Torkelson, Price & Stoll	Wind flow dynamics	Wind-tunnel	Vegetation canopy	Experimental dataset
Yan et al.	Wind flow dynamics	Wind-tunnel	Vegetation canopy	Empirical models
Año 2023				
Cintolesi, et al.	Wind flow dynamics	CFD OpenFOAM	Isolated forest	Experimental dataset
Chockalingam, Afshari & Vogel	Wind profiles in objects	CFD OpenFOAM	Objects	Machine learning
Yusof et al.	Modelling flow for vegetated channel	CFD OpenFOAM	Vegetation canopy	Experimental dataset
BenMoshe, et al.	Wind flow dynamics	Machine learning	Buildings	Comparatives studies
Ru et al.	Permeability windbreak - spraying	Wind-tunnel	Vegetation canopy	Experimental dataset
Ulmer, et al.	Wind flow dynamics	simulation-winds	Vegetation canopy	Empirical models
Lincango Casa	Design wind tunnel	Ansys	Objects	Wind tunnel experiment
Renault, et al.	Wind flow dynamics	Quick canopy model	Vegetation canopy	Model WFT
Wang et al.	Windbreak effectiveness	CFD	Vegetation canopy	Wind tunnel experiment

De acuerdo con los resultados analizados en la bibliografía estudiada para el presente trabajo, se puede observar una evolución temporal desde 2019 hasta 2023, en el cual las técnicas de simulación numérica cobran importancia a partir de comparar los datos con las técnicas

experimentales. En el análisis de los artículos evaluados en la presente revisión (Tabla 1), el túnel de viento (40%) y las simulaciones CFD (29%) son las principales metodologías para evaluar el comportamiento del viento en cultivos.

En el estudio del comportamiento del viento en dosel vegetal, tanto los ensayos en túneles de viento como las simulaciones en CFD han producido resultados coincidentes (Rosenfeld et al, 2010; Shnapp, 2019). La simulación numérica es indispensable para la investigación, se deduce que ambos métodos son complementarios, aunque algunos autores sostienen que el CFD podría reemplazar algunas pruebas de túnel de viento (Phillips & Soligo, 2019; Zhu, 2019).

En los últimos años hace su aparición el uso del machine learning como nueva técnica para evaluar el comportamiento del viento en cultivos. Los algoritmos de machine learning utilizan datos que provienen de CFD y de túnel de viento para predecir el comportamiento del viento (BenMoche et al, 2023; Chockalingam, Afshari & Vogel, 2023) se presenta como variante al CFD ya que el cálculo computacional se hace muy costoso y demora mucho tiempo a la hora de hacer simulaciones computarizadas. Estos autores utilizan Redes Neuronales Artificiales (ANN) y otros autores el algoritmo K-Veinos más Cercanos (k-NN) son técnicas utilizadas en el campo del aprendizaje automático del machine learning. Ambos son enfoques que caen dentro de la categoría de aprendizaje supervisado, donde se utilizan datos etiquetados para entrenar modelos y realizar predicciones.

En cuanto a las simulaciones tanto en túnel de viento como en OpenFOAM las predicciones obtenidas por medio de machine learning son coincidentes con los datos obtenidos en túnel de viento como así también las simulaciones CFD.

### **Aplicación y uso de las técnicas utilizadas para el estudio de la influencia del viento en cultivos**

El estudio del viento es importante para conocer su comportamiento dentro de estructuras y doseles vegetales, en función de las estrategias de análisis utilizadas se clasificó los artículos analizados en función de:

#### **1. Enfoque de análisis del viento dentro del dosel**

El 98% de las investigaciones en las que se analiza el movimiento del fluido en puntos fijos donde se evalúan diferentes parámetros en el dosel

(Afshari & Vogel, 2023; Chockalingam, Renault, et al. 2024; Gonzales et al., 2019, Guo et al, 2021; Hesp, et al., 2019, entre otros). Como una alternativa novedosa se propone el estudio del comportamiento del viento y de la turbulencia en viñedos desde el punto de vista lagrangiano, siguiendo la trayectoria de las partículas (Shnapp et al, 2019) en su análisis hace un estudio pormenorizado de la distribución de la velocidad en túneles de viento validados con CFD. Con éxito se miden trayectorias lagrangianas de partículas trazadoras dentro de una capa de dosel modelada en un túnel de viento ambiental a gran escala como resultado se obtienen resultados que representan el flujo turbulento lagrangiano en el modelo del dosel homogéneo.

## **2. Las características de la estructura del dosel**

La estructura en la que se organiza el cultivo es importante al momento del estudio del comportamiento del viento, en la actualidad debido al alto grado de tecnificación de la producción agrícola muchos de los cultivos se organizan en parcelas o cercas organizados de forma homogénea donde los cultivos tienen distribuciones específicas, lo que permite mejor aireación de las plantas, manejos agrícolas uniformes (cosecha, poda y fumigaciones). El modelo de dosel homogéneo es una aproximación simplificada de la geometría donde se asume que la vegetación es uniforme en términos de altura y densidad (Guo, 2021; Ulmer et al., 2023).

Para plantaciones de viñedos surgen nuevos modelos teóricos que estudian el comportamiento del viento de un entorno completo de respuesta rápida para simular el transporte escalar en los doseles homogéneos organizados en filas (Ulmer et al., 2023).

Se han estudiado en los doseles homogéneos, la mecánica de la erosión eólica y su efecto en la vegetación en pie. Para distintas configuraciones se determinó la cantidad de abrasión que se produce dentro de un dosel vegetal simulado. Los resultados de las simulaciones en CFD y su validación en túnel de viento demuestran que los coeficientes de arrastre efectivos no muestran diferencias significativas entre los resultados experimentales y simulados (Gonzales et al., 2019; Phillips & Soligo, 2019)

En contraposición, Torkelson, Price & Stoll (2022) evaluaron el efecto de la heterogeneidad del dosel de viñedos, analizando la velocidad del viento, los procesos de transporte y las turbulencias generadas. En base a los datos obtenidos se identificaron las distintas zonas de la turbulencia en superficies vegetales dispersas y organizadas. Cintolesi et al. (2023) hace su análisis en áreas con heterogeneidad forestal, en

esa área se evaluó el flujo de viento y su turbulencia para determinar las regiones de movimiento del viento en base a los parámetros dinámicos del sistema. A partir de esos datos tomados *in situ*, se validaron exitosamente en simulaciones en OpenFOAM. El estudio determinó las distintas capas de movimiento del viento vertical en el dosel arbóreo no homogéneo

### **3. Los estudios relacionados con la variedad, sus características físicas y morfológicas del dosel**

La variedad y tipo de planta determinan el nivel de frondosidad del dosel y está relacionado con la porosidad del mismo. Estudios demuestran que es de importancia el análisis del grado de porosidad de la cortina forestal y su impacto, ya que es una medida de densidad de dosel, para determinar este parámetro, la técnica más utilizada es mediante el análisis de fotografías de la superficie frontal del cultivo donde incide el viento, lo que permite determinar el grado de porosidad óptica de las barreras de viento (Kučera et al., 2020). Otros autores proponen nuevos métodos para calcular la porosidad óptica de un cultivo con un sistema de escaneo láser móvil en túneles de viento donde se evalúa la variación de velocidad, estos nuevos métodos tienen un mayor grado de validación (Ru et al., 2023).

### **4. Los estudios orientados a la mitigación de los efectos nocivos del viento**

En los últimos 5 años, las investigaciones están orientadas a evaluar la disposición, dimensiones y eficiencia de las cortinas rompevientos. (Cheng et al., 2019 ; Guo et al., 2021, Hesp et al., 2019; Ulmer et al., 2023).

Las grandes estructuras vegetales sirven de barrera para los flujos turbulentos, las cuales pueden disipar tanto partículas como el momento del viento dentro de un dosel y también funcionan como método de prevención para la erosión eólica dentro de los campos de cultivo (Qin et al., 2022).

### **5. Evaluación de los coeficientes de arrastre**

Otra de las variables de análisis es el cálculo de la resistencia al viento de la vegetación, diversos autores estudian el coeficiente de arrastre. Para profundizar un poco más sobre ese aspecto Gonçalves, Linhares & Yojo (2020) hace una revisión de las publicaciones entre los años 1957 y 2018 en el que hace un estudio histórico pormenorizado sobre los coeficientes de arrastre en árboles urbanos comparando diversos estudios para comprender la interacción de los cultivos con el viento,

resaltando aspectos claves y consideraciones a tener en cuenta en las próximas investigaciones.

## **6. Avances en el estudio del comportamiento del viento**

Se presentan nuevos modelos de simulación a través de softwares creados ad hoc (Renault et al., 2024). Otros autores han desarrollado modelos teóricos que describen el comportamiento del viento y la distribución de la velocidad del aire alrededor de cada planta, y modeliza la transición de la velocidad del flujo de aire de plantas individuales a plantas múltiples (Cheng et al., 2019).

Además de las variables estudiadas, se analiza el efecto de refugio, si bien aún no se comprende del todo, se cree que parte de esta reducción de la resistencia general parece ser una disminución de la presión y desaceleración del viento cuando grandes ráfagas impactan en las plantas. Se continúa con el estudio y evaluación de un sistema cortavientos en zonas con riesgo de erosión eólica para determinar el grado de protección como influye la porosidad óptica y la altura de los cortavientos

## **7. Otros estudios de interés**

Cabe destacar que hay avances en la búsqueda de aumentar la eficiencia de los trabajos agronómicos, particularmente para el caso de viñedos se ha diseñado un algoritmo computacional que predice en función de la dirección del viento cómo se realiza la pulverización de fertilizantes y agroquímicos (Scagnellato et al., 2022). Algunas investigaciones evaluaron por diferentes métodos el nivel de pulverización y penetración de gotas en un dosel arbóreo (Ru et al., 2023). Estudios relacionados a la temática también evalúan los efectos de dispersión de semillas por el viento a través de cortinas forestales (Qin et al., 2022). Otros autores se dedican al estudio de la dirección de incidencia del viento (H'ng et al., 2022) y la presión en los flujos de viento que inciden en los obstáculos que encuentra a su paso (Zhang, 2021). Estos estudios podrían tener aplicabilidad en la agricultura, en el análisis del comportamiento del viento en los cultivos. Se presenta una recopilación de la evolución del estudio del impacto del viento en los cultivos desde el punto de vista de los procesos de transporte y la resistencia aerodinámica del cultivo. Además, se ofrecen nuevas perspectivas del estudio del viento que están poco estudiadas o no contempladas en estudios previos. En la modelación del flujo turbulento se abordan los métodos teóricos de simulación computarizada y experimentales como el uso de túneles de viento. Entre las ventajas de uso del CFD se destacan la rapidez, reducción de costos, y proporciona

más información, pero el comportamiento de estos programas son cajas negras y dependen de la construcción de la geometría representada.

## **CONCLUSIONES**

más utilizadas en el estudio del comportamiento del viento. Surge el uso del machine learning para predecir el comportamiento del viento en base a datos obtenidos por datos experimentales de los túneles de viento y datos proporcionados por las simulaciones CFD.

Gran parte de las investigaciones se realizan en díseos homogéneos. Aunque hay autores que avanzan sus investigaciones en díseos heterogéneos. Es necesario avanzar en el estudio en díseos altos y en díseos con variaciones significativas en la altura de sus elementos.

En el análisis del fluido, la mayoría de las investigaciones están orientadas al uso del enfoque euleriano de la trayectoria de las partículas, analizando en general el flujo del viento. Se considera que también es importante analizar el fenómeno desde el enfoque lagrangiano ya que es útil para estudiar el transporte de contaminantes, partículas en suspensión de suelo, polen o semillas, así como para simular el movimiento de objetos arrastrados por el viento ya que esto permite conocer en detalle las trayectorias que siguen las partículas y su deposición final.

En los aspectos relacionados con aplicabilidad de estas metodologías se considera que tienen un gran potencial de uso en el estudio de otras interacciones fluido - cultivos, por ejemplo 1) en la propagación de incendios, 2) en el examen del comportamiento físico de las vegetación con el viento, 3) en la evaluación del comportamiento de los bioaerosoles, 4) en el estudio de microclimas, 5) en la fertilización foliar de vegetales, 6) en el análisis de los flujos de las dispersiones de semillas y polen, 7) en la floración de plantas, y 8) en el estudio de la erosión eólica en cultivos.

A pesar de los avances significativos realizados en los últimos cinco años, es importante continuar con investigaciones que aborden la temática ampliando el estudio desde otras perspectivas tales como las que propusimos en el presente trabajo. Aún sigue siendo necesario indagar el grado de porosidad y la influencia varietal de los elementos que conforman las cortinas rompevientos, ya que aún sigue siendo un

método vigente para la disipación y el control del viento en los campos de cultivos.

## REFERENCIAS

- An, L., Wang, J., Xiong, N., Wang, Y., You, J., & Li, H. (2022). Assessment of permeability windbreak forests with different porosities based on laser scanning and computational fluid dynamics. *Remote Sensing*, 14(14), 3331. <https://doi.org/10.3390/rs14143331>
- BenMoshe, N., Fattal, E., Leitl, B., & Arav, Y. (2023). Using machine learning to predict wind flow in urban areas. *Atmosphere*, 14(6), 990. <https://doi.org/10.3390/atmos14060990>
- BenMoshe, N.; Fattal, E.; Leitl, B.; & Arav, Y. (2023) Using Machine Learning to Predict Wind Flow in Urban Areas. *Atmosphere*, 14(6), Article Number 990. <https://doi.org/10.3390/atmos14060990>
- Brunet, Y. (2020). Turbulent Flow in Plant Canopies: Historical Perspective and Overview. *Boundary-Layer Meteorology* 177, 315–364. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00560-7>
- Cheng, H., He, W., Liu, C., Zou, X., Kang, L., Chen, T., & Zhang, K. (2019). Transition model for airflow fields from single plants to multiple plants. *Agricultural and Forest Meteorology*, 266-267, 29–42. DOI: [10.1016/j.agrformet.2018.11.039](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.039)
- Chockalingam, G., Afshari, A. & Vogel, J. (2023). Characterization of Non-Neutral Urban Canopy Wind Profile Using CFD Simulations—A Data-Driven Approach. *Atmosphere*, 14 (3). Article Number 429. <https://doi.org/10.3390/atmos14030429>
- Cintolesi, C., Barbano, F., Trudu, P. L., Finco, A., Gerosa, G., & Di Sabatino, S. (2023). Characterisation of flow dynamics within and around an isolated forest, through measurements and numerical simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 339, Article Number 109557. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109557>.
- Gardiner, B. (2021). Wind damage to forests and trees: A review with an emphasis on planted and managed forests. *Journal of Forest Research*, 26(4), 248–266. <https://doi.org/10.1080/13416979.2021.1940665>
- Golberg, A. D. (2010). El viento y la vida de las plantas. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 42(1), 221-243. <https://bdigital.uncu.edu.ar/3558>
- Gonçalves, R., Linhares, C., & Yojo, T. (2020). Drag coefficient in urban trees. *Trees*, 37(4), 13-145. DOI: 10.1007/s00468-019-01951-1.
- Gonzales, H. B., Tatarko, J., Casada, M. E., Maghirang, R. G., Hagen, L. J., & Barden, C. J. (2019). Computational fluid dynamics simulation of airflow through standing vegetation. *Transactions of the ASABE*, 62(6), 1713–1722. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.13449>

- Gough, H., King, M.-F., Nathan, P., Grimmond, C. S. B., Robins, A., Noakes, C. J., Barlow, J. F. (2019) Influence of neighbouring structures on building façade pressures: Comparison between full-scale, wind-tunnel, CFD and practitioner guidelines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 189, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.03.011>
- Guo, Z., Yang, X., Wu, X., Zou, X., Zhang, C., Fang, H., & Xiang, H. (2021). Optimal design for vegetative windbreaks using 3D numerical simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 298–299, Article Number 108290. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108290>
- Hesp, P. A., Dong, Y., Cheng, H., & Booth, J. L. (2019). Wind flow and sedimentation in artificial vegetation: Field and wind tunnel experiments. *Geomorphology*, 337, 165–182. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.02>
- H'ng, Y. M., Ikegaya, N., Zaki, S. A., Hagishima, A. & Mohammad, A. F. (2022). Wind-tunnel estimation of mean and turbulent wind speeds within canopy layer for urban campus. *Urban Climate*, 41. Article Number 101064. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101064>.
- Ismail, J. J., Pane, E. A., Suyitno, B. M., Rahayu, G. H. N. N., Rhakasywi, D., & Suwandi, A. (2020). Computational fluid dynamics simulation of the turbulence models in the tested section on wind tunnel. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 1201–1209. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.02.012>
- Ismail, J. J., Pane, E. A., & Rahman, R. A. (2022). An open design for a low-cost open-loop subsonic wind tunnel for aerodynamic measurement and characterization. *HardwareX*, 12, e00352. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00352>
- Kim, R. W., Hong, S. W., Norton, T., Amon, T., Youssef, A., Berckmans, D., & Lee, I. B. (2020). Computational fluid dynamics for non-experts: Development of a user-friendly CFD simulator (HNVR-SYS) for natural ventilation design applications. *Biosystems Engineering*, 193, 232–246. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.03.005>
- Kučera, J., Podhrázská, J., Karásek, P., & Papaj, V. (2020). The Effect of Windbreak Parameters on the Wind Erosion Risk Assessment in Agricultural Landscape. *Journal of Ecological Engineering*, 21(2), 150–156. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/116323>.
- Lincango Casa, W. E. (2023). *Diseño y construcción de un túnel de viento a escala para obtener datos mediante pruebas aerodinámicas* [Tesis de grado, Universidad Internacional SEK]. Repositorio UISEK. <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/5040>
- Makedonas, A., Carpentieri, M., & Placidi, M. (2021). Urban boundary layers over dense and tall canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 181(1), 73–93. <https://doi.org/10.1007/s10546-021-00635-z>

- Kučera, J., Podhrázská, J., Karásek, P., & Papaj, V. (2020). The Effect of Windbreak Parameters on the Wind Erosion Risk Assessment in Agricultural Landscape. *Journal of Ecological Engineering*, 21(2), 150-156. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/116323>.
- Miri, A., Dragovich, D., & Dong, Z. (2017). Vegetation morphologic and aerodynamic characteristics reduce aeolian erosion. *Scientific Reports*, 7, Article Number 12831. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13084-x>.
- Mo, Z., Liu, C. H., Chow, H. L., Lam, M. K., Lok, Y. H., Ma, S. W., & Yip, P. Y. (2022). Roughness sublayer over vegetation canopy: A wind tunnel study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 319, Article Number 108880. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108880>
- Oberschelp, G. P. J., Harrand, L., Mastrandrea, C. A., Salto, C. S., y Florez Palenzona, M. H. (2020). *Cortinas forestales: rompevientos amortiguadores de deriva de agroquímicos*. Ediciones INTA. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/21382>
- Phillips, D. A., y Soligo, M. J. (2019). Will CFD ever replace wind tunnels for building wind simulations? *International journal of High-Rise Buildings*, 8(2), 107-116. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2019.8.2.107>
- Qin, X., Liang, W., Liu, Z., Liu, M., Baskin, C. C., Baskin, J. M., Xin, Z., Wang, Z. & Zhou, Q. (2022). Plant canopy may promote seed dispersal by wind. *Scientific Reports*, 12(1). Article Number 63. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03402-9>
- Renault, M. A., Bailey, B. N., Stoll, R., & Pardyjak, E. R. (2024). A rapid method for computing 3-D high-resolution vegetative canopy winds in weakly complex terrain. *Frontiers in Earth Science*, 11, Article Number 1251056. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1251056>
- Rosenfeld, M., Marom, G., & Bitan, A. (2010). Numerical simulation of the airflow across trees in a windbreak. *Boundary-Layer Meteorology*, 135, 89–107. <https://doi.org/10.1007/s10546-009-9461-8>
- Ru, Y., Hu, C., Chen, X., Yang, F., Zhang, C., Li, J., & Fang, S. (2023). Droplet Penetration Model Based on Canopy Porosity for Spraying Applications. *Agriculture* (Switzerland), 13(2), Article Number 339. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020339>.
- Scagnellato, L., Lecce, M., Bloise, N., Carreno Ruiz, M., Capello, E., & Guglieri, G. (2022). Adaptive path planning for spraying UAS in vineyard under variable wind condition. ICAS PROCEEDINGS 33th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Vol. 7, pp. 5505-5519). International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS). <https://www.proceedings.com/content/068/068439webtoc.pdf>
- Sherman, D. J. (2020). Understanding wind-blown sand: Six vexations. *Geomorphology*, 366, Article Number 107193. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107193>

- Shnapp, R., Shapira, E., Peri, D., Bohbot-Raviv, Y., Fattal, E., & Liberzon, A. (2019). Extended 3D-PTV for direct measurements of Lagrangian statistics of canopy turbulence in a wind tunnel. *Scientific Reports*, 9, Article Number 7405. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43555-2>
- Torkelson, G., Price, T. A., & Stoll, R. (2022). Momentum and turbulent transport in sparse, organized vegetative canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 184(1), 1-24. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00698-6>.
- Ulmer, L., Margairaz, F., Bailey, B.N., Mahaffee, W. F., Pardyjak, E. R., & Stoll, R. (2023). A fast-response, wind angle-sensitive model for predicting mean winds in row-organized canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 329, Article Number 109273. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109273>.
- Wang, J., Patruno, L., Zhao, G., & Tamura, Y. (2024). Windbreak effectiveness of shelterbelts with different characteristic parameters and arrangements by means of CFD simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 344, Article Number 109813. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109813>
- Yan, J., Zhao, L., Zhang, Y., & Zhang, L. (2022). Wind tunnel study on convective heat transfer performance of vegetation canopies with different structures. *Building and Environment*, 223, 109470.
- Yusof, M. A. M., Sharila, S., Wan Mohtar, W. H. M., Idris, A. C., & Yusof, A. M. (2023). The application of OpenFOAM in modelling flow for vegetated channel. *Jurnal Kejuruteraan*, 35(4), 961–973. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35\(4\)-19](https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35(4)-19)
- Zhang, Q. (2021). Experimental study of wind pressure on a long-span canopy roof structure using a wind tunnel. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45, 197-206 DOI: 10.1007/s40996-020-00400-1.
- Zhu, W. (2019). Models for wind tunnel tests based on additive manufacturing technology. *Progress in Aerospace Sciences*, 110, Article Number 100541. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.05.001>

\* \* \* \* \*

