

## INFLUENCIA DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA EN EL EFECTO SHELTER PARA LA PROTECCIÓN DE CULTIVOS

### INFLUENCE OF THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER ON THE SHELTER EFFECT FOR CROP PROTECTION

Rodolfo Dematte<sup>a</sup>, Josefina Huespe<sup>a</sup>, Solange Feldman<sup>b</sup> y Pablo Caron<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Departamento de Ciencias Básicas, Unidad Investigativa de Epistemología, Lógica y Ciencias Básicas. Grupo IEMI, Coronel Rodriguez 273 (M5500) Ciudad Capital, Mendoza, Argentina. <http://www.frm.utn.edu.ar>

<sup>b</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, Grupo de Mecánica de Fluidos, París 532 (B1706EAH) Haedo, Buenos Aires, Argentina. gmf-layf@utn.edu.edu.ar, <http://www.frh.utn.edu.ar>

**Palabras clave:** Efecto shelter, ABL, erosión, cultivos.

**Resumen.** Una de las estrategias más difundidas para la protección de cultivos contra el clima adverso es mediante el uso de cortinas forestales. El presente trabajo analiza, mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), la eficacia del escudo protector de las cortinas forestales frente al viento Zonda en cultivos de vid en Mendoza, Argentina. Las simulaciones por CFD se realizaron en OpenFOAM, comparando escenarios con y sin capa límite atmosférica bajo un viento Zonda tipo 2 ( $25 \text{ m s}^{-1}$ ). En los casos sin capa límite atmosférica, las cortinas forestales redujeron de forma predecible la velocidad del viento en su zona de influencia, confirmando que una PO entre 35 % y 50 % maximiza el *efecto Shelter*. Sin embargo, al incorporar la capa límite, las estructuras de flujo y los procesos de disipación de energía se volvieron significativamente más variables: la forma del escudo protector sufrió alteraciones tanto en la extensión como en la intensidad de la zona de recirculación, lo que puede repercutir en la eficacia de la protección vegetal. Estos hallazgos permiten refinar las estrategias de diseño y disposición de cortinas forestales, mejorando la planificación agronómica en regiones expuestas al viento Zonda.

**Keywords:** Shelter effect, Atmospheric boundary layer (ABL), Erosion, Crops

**Abstract.** One of the most widespread strategies for crop protection against adverse weather is the use of shelterbelts. This study analyzes, through computational fluid dynamics (CFD), the effectiveness of the protective shield provided by shelterbelts against Zonda wind in vineyards in Mendoza, Argentina. CFD simulations were carried out in OpenFOAM, comparing scenarios with and without an atmospheric boundary layer under a type-2 Zonda wind ( $25 \text{ m s}^{-1}$ ). In the cases without an atmospheric boundary layer, the shelterbelts predictably reduced wind speed in their zone of influence, confirming that an OP between 35 % and 50 % maximizes the “shelter effect.” However, when the boundary layer was included, flow structures and energy dissipation processes became significantly more variable: the shape of the protective shield was altered both in the extent and intensity of the recirculation zone, which may affect the effectiveness of crop protection. These findings allow for refining design and layout strategies of shelterbelts, improving agronomic planning in regions exposed to Zonda wind.

## 1. INTRODUCCIÓN

El viento Zonda es un fenómeno meteorológico característico de la región de Cuyo, especialmente en Mendoza, Argentina ([Norte, 1988](#)). Se trata de una corriente descendente, seca y cálida, que puede alcanzar velocidades de hasta  $25 \text{ m s}^{-1}$ , medido a la altura estándar de 10 m para vientos de superficie, provocando daños significativos en los sistemas agrícolas ([Otero, 2018](#)). Su impacto se intensifica en épocas críticas del ciclo fenológico de la vid, como la brotación y la floración, generando pérdidas económicas por daño mecánico en brotes tiernos, reducción del rendimiento y alteraciones en la fisiología vegetal. Además, este viento erosivo contribuye al deterioro de la calidad del suelo, especialmente en zonas vitivinícolas con manejos agronómicos intensivos y suelos expuestos ([Gardiner et al., 2016; Alonso et al., 2024a](#)). El Zonda no sólo representa una amenaza directa para la estabilidad mecánica de la planta, sino que también modifica el microclima del viñedo, alterando procesos de transpiración, fotosíntesis y balance hídrico ([Alonso et al., 2024b](#)). En este contexto, el desarrollo de estrategias de protección frente a eventos de viento extremo se vuelve esencial para la sostenibilidad de la producción vitivinícola en la región.

Entre las alternativas más eficaces y ecológicamente compatibles se destacan las cortinas forestales, estructuras vegetales que actúan como barreras rompeviento ([Oberschelp et al., 2020; Peri, 2003](#)). Estas generan un efecto de resguardo o “efecto shelter” al reducir la velocidad del viento y modificar las condiciones aerodinámicas en la zona protegida. Diversos estudios han demostrado que una adecuada configuración geométrica y una porosidad óptica comprendida entre el 35 % y el 50 % maximizan la capacidad de atenuación del viento, creando zonas de recirculación favorables para el cultivo ([Dematte et al., 2025](#)).

Sin embargo, la eficacia real de estas barreras depende fuertemente de las condiciones atmosféricas locales, en particular del perfil vertical de velocidad con el que el viento incide sobre la barrera ([Peri, 2003](#)). Este perfil está determinado por la capa límite atmosférica, una zona adyacente al suelo donde la fricción con la superficie y la presencia de obstáculos naturales o artificiales afectan profundamente las características del flujo. En general, las simulaciones computacionales en dinámica de fluidos (CFD) que evalúan el desempeño de cortinas forestales han asumido condiciones ideales, considerando un viento uniforme sin capa límite ([Dematte et al., 2025](#)). Aunque estos modelos permiten identificar tendencias generales y patrones de protección, tienden a sobreestimar la eficacia de las barreras al no considerar la variabilidad vertical real del flujo. Incluir la capa límite atmosférica ([Wang et al., 2024](#)) —mediante perfiles de velocidad que varían con la altura, como los definidos por la ley logarítmica, ofrece una representación más realista del escenario aerodinámico al que se enfrentan los cultivos. Esta incorporación permite capturar los efectos de cizalla vertical, interacción turbulenta y estructuras de flujo más complejas que condicionan directamente la distribución espacial del efecto shelter. El presente trabajo se propone comparar el rendimiento de una cortina forestal de triple fila intercalada (4-3-4), ver Fig. 1, bajo dos escenarios: uno con viento uniforme y otro con viento que incorpora la capa límite atmosférica ([Yang et al., 2009; Hargreaves y Wright, 2007](#)). Ambas simulaciones se realizaron en OpenFOAM ([OpenCFD Ltd, 2024](#)), empleando el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  ([Jones y Launder, 1972](#)) en régimen estacionario, y utilizando una velocidad incidente representativa de eventos de Zonda tipo 2 ( $25 \text{ m s}^{-1}$ ). Al estudiar cómo se modifica el efecto shelter en presencia de la capa límite, buscamos contribuir al diseño más preciso y eficaz de sistemas agroforestales capaces de brindar una protección robusta y sostenida en condiciones reales de viento extremo.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló íntegramente mediante simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (CFD), con el propósito de evaluar la influencia de la capa límite atmosférica sobre la eficiencia aerodinámica de cortinas forestales utilizadas como protección en viñedos frente al viento Zonda. Se adoptó un enfoque metodológico estructurado en seis etapas sucesivas: caracterización geométrica del viñedo y barreras, digitalización y modelado tridimensional, definición del dominio computacional, asignación de condiciones de borde y parámetros físicos, ejecución de los casos simulados, y procesamiento de los resultados para su análisis comparativo. Además, se calculó el indicador  $D_{20}$ , definido como la distancia sotavento, expresada en múltiplos de la altura de la cortina ( $H$ ), hasta el punto donde la velocidad horizontal promedio alcanza el 80 % de la velocidad incidente de referencia ( $U_\infty$ ). Este parámetro cuantifica el alcance efectivo del efecto shelter, es decir, la extensión de la zona donde el viento permanece al menos un 20 % atenuado respecto del valor de entrada. En este estudio,  $U_\infty$  se tomó a  $z = 1$  m, altura representativa del follaje de la vid.

El modelo geométrico del sistema agrícola fue construido a partir de un relevamiento in situ de plantaciones reales de *Vitis vinifera L.* bajo conducción en espaldera baja, configuración dominante en la provincia de Mendoza. Se definió un marco de plantación de 1,2 m entre plantas y 3 m entre hileras, con una altura promedio de follaje de 1,2 m. El área representada en las simulaciones corresponde a una parcela de 8,7 m por 13,5 m, con tres hileras de cultivo, resultando en una densidad equivalente a 1700 plantas por hectárea. Estas dimensiones fueron replicadas en el entorno digital mediante el software SketchUp ([Trimble Inc. \(2023\)](#)), herramienta empleada para el modelado tridimensional de los elementos del dominio de simulación. Las geometrías fueron simplificadas mediante cuerpos hexaédricos equivalentes para optimizar el procesamiento numérico sin perder fidelidad en la representación del flujo alrededor de los obstáculos. Ver Fig. 1.

La cortina forestal implementada se basó en la configuración SJ propuesta por [Wang y Takle \(1997\)](#), conformada por tres filas de árboles dispuestas en formación escalonada con alturas diferenciadas: la primera hilera alcanza los 6,0 m y la segunda los 6,6 m, valor que se toma como  $H$  para la normalización espacial de los resultados. Como especie arbórea se utilizó *Populus nigra*, comúnmente utilizada en la región para rompevientos rurales por su morfología y rusticidad. La separación entre la cortina y el cultivo fue establecida en  $2H$  (13,2 m). Además, se añadieron setos arbustivos de 0,85 m de altura en el frente de la barrera, conformando disposiciones de triple fila intercalada (4-3-4), seleccionada como caso de análisis principal. Ver Fig. 1.

El dominio computacional completo se extendió 200 m en la dirección del flujo, 80 m de ancho transversal y 40 m de altura vertical, lo cual permite captar adecuadamente las estructuras de recirculación y recuperar el campo de velocidad a barlovento y sotavento. Ver Fig 2. El mallado del dominio fue generado con `snappyHexMesh` utilizando celdas hexaédricas estructuradas, con refinamientos locales en torno a las cortinas y al área de cultivo.

La simulación numérica fue llevada a cabo con el solver `simpleFoam`, apropiado para flujos estacionarios, junto con el modelo de turbulencia estándar  $k-\varepsilon$ . Las propiedades del fluido se definieron como aire seco de comportamiento Newtoniano, con viscosidad cinemática de  $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Las condiciones de contorno se configuraron como sigue: entrada de velocidad fija, salida de presión constante, y tratamiento de superficies sólidas (vegetación, suelo) mediante funciones de pared estándar para el modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$ . La presión se resolvió con el algoritmo SIMPLE ([Patankar y Spalding, 1972](#)). El régimen de flujo simulado fue

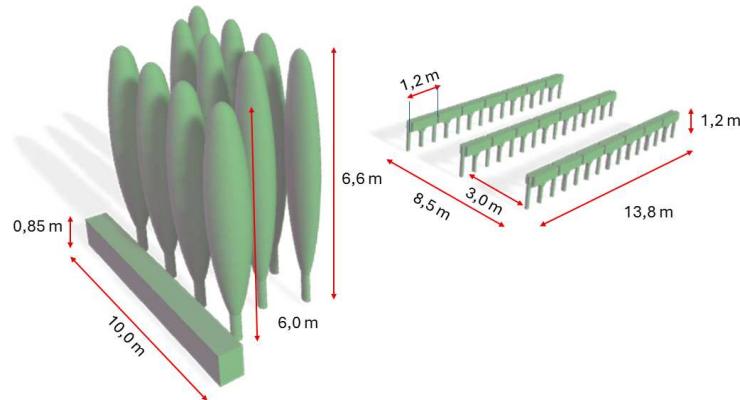


Figura 1: Geometría utilizada para representar la cortina forestal y los viñedos.

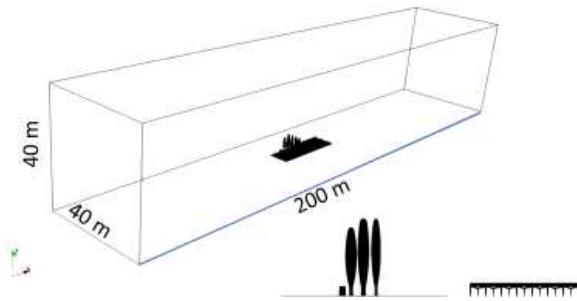


Figura 2: Dominio computacional utilizado.

correspondiente a eventos Zonda tipo 2 con velocidad media de  $25 \text{ m s}^{-1}$  a 10 m de altura, de acuerdo con registros del Servicio Meteorológico Nacional (2019-2023) y la clasificación propuesta por [Norte \(2015\)](#). Las simulaciones se resolvieron hasta cumplir con 2000 iteraciones o una tolerancia relativa de  $1 \times 10^{-4}$  en todas las variables.

Para el caso con capa límite se aplicó la condición de entrada típica de ABL de OpenFOAM. En la entrada se impuso un perfil vertical de velocidad  $U(z)$  correspondiente a una capa límite neutra, junto con perfiles compatibles de energía cinética turbulenta  $k(z)$  y tasa de disipación  $\varepsilon(z)$  generados por la condición de borde `atmBoundaryLayer` de OpenFOAM. Los parámetros principales usados fueron: velocidad de referencia  $U_{ref} = 25 \text{ m s}^{-1}$  (a  $z = Z_{ref}$ ), rugosidad  $z_0 = 0.03$ , y altura de referencia  $H_{ref} = 10 \text{ m}$ . Por otro lado, para el caso de velocidad se tomó un valor promedio entre 0 m y 15 m del perfil de logarítmico, lo que da como resultado  $22.5 \text{ m s}^{-1}$ .

Se realizaron tres simulaciones sin incluir los árboles ni los viñedos, es decir el dominio sin obstáculos, para analizar el correcto modelado de la capa límite atmosférica. La estrategia de mallado fue la misma que luego se utilizó en las simulaciones completas, se mantuvo la discretización en la zona cercana al piso (malla para capturar la capa límite con un distancia constante de la primera celda de  $h = 0.01 \text{ m}$ ), y se modificó el tamaño de las celdas en el seno del fluido (1 m, 2 m, y 4 m). Las mallas se muestran en la Fig 3.

Se utilizó Paraview®6.0.0 ([Kitware, Inc., 2023](#)) para el post-procesamiento de los datos. Se generaron visualizaciones de isolíneas de velocidad, secciones longitudinales, y perfiles ver-

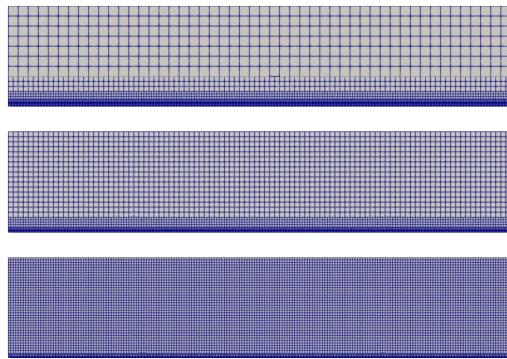


Figura 3: Mallas utilizadas para comparar el desarrollo de la capa límite. Las dimensiones de las celdas son: 1 m, 2 m, y 4 m

ticales de velocidad. El objetivo central del análisis fue identificar patrones de recirculación, zonas de mínima velocidad, y el alcance efectivo de la protección frente a diferentes perfiles de ingreso de viento.

### 3. RESULTADOS

En la Fig. 4 se muestra la velocidad impuesta por la condición de borde y las obtenidas en tres posiciones a lo largo del dominio. Se observa que el perfil obtenido se mantiene en todo el dominio y no depende de la discretización en el seno del fluido. Por este motivo se utilizó la malla con elementos de 4 m en el seno del fluido como base para luego agregar los obstáculos.

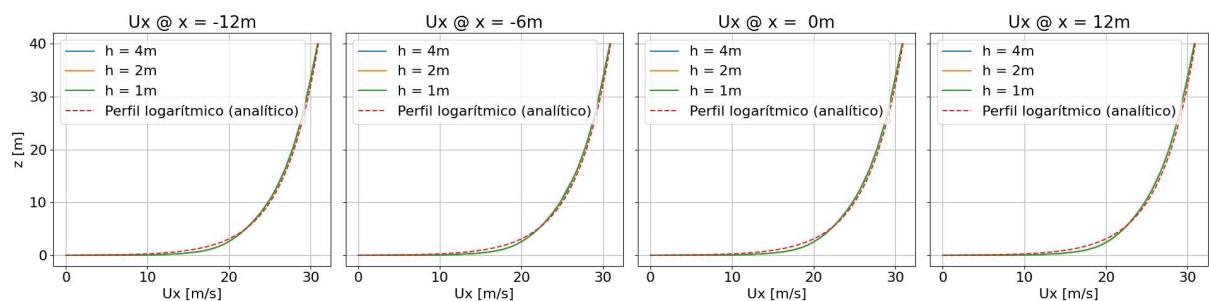


Figura 4: Comparación del perfil de velocidad obtenido en diferentes posiciones. El valor  $x = 0$  m corresponde a donde comienzan los viñedos

Los resultados muestran que la presencia de una capa límite atmosférica realista modifica sustancialmente la estructura de sotavento. En el caso con perfil logarítmico, la zona de recirculación se reduce en longitud y se intensifican gradientes verticales de velocidad cerca del suelo. Este efecto se traduce en una menor extensión de la zona de calma (menor  $D_{20}$ ) y en un aumento de la turbulencia superficial, lo que puede incrementar la erosión eólica. El análisis de las gráficas revela que:

Perfiles de velocidad vertical (Figuras 5, 6, y 7): en  $x = 2H$ , se observa una attenuación significativa de la velocidad en la capa inferior ( $< 2$  m), con una recuperación más rápida hacia  $5H$  cuando se incluye el perfil logarítmico, en contraste con el caso de velocidad uniforme donde el déficit se prolonga. Este comportamiento en el rango  $0-2H$  es crucial porque allí se concentra la interacción crítica entre el viento y el follaje de la vid, cultivo sensible al microclima cercano al suelo.

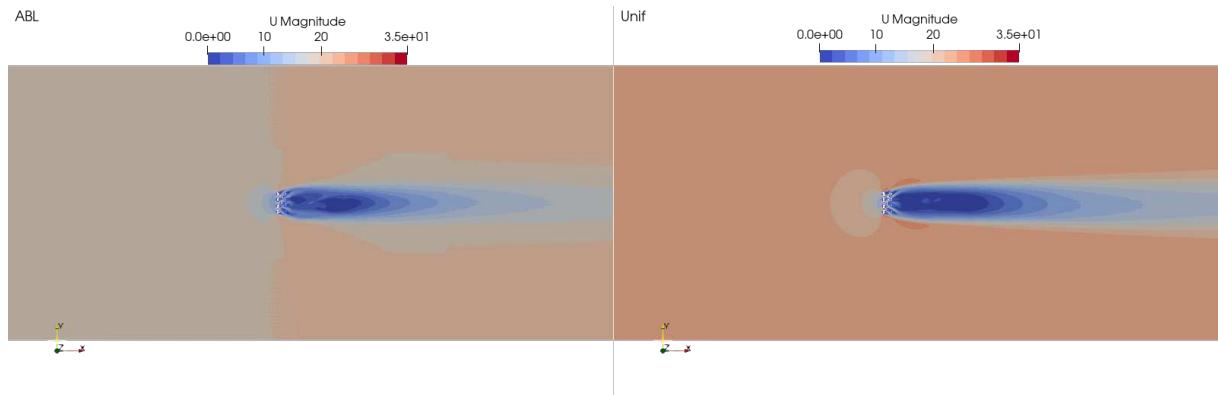


Figura 5: Velocidad - Plano XY  $z = 2 \text{ m}$  - Izquierda: Perfil de velocidades variable, Derecha: Velocidad uniforme  $25 \text{ m s}^{-1}$

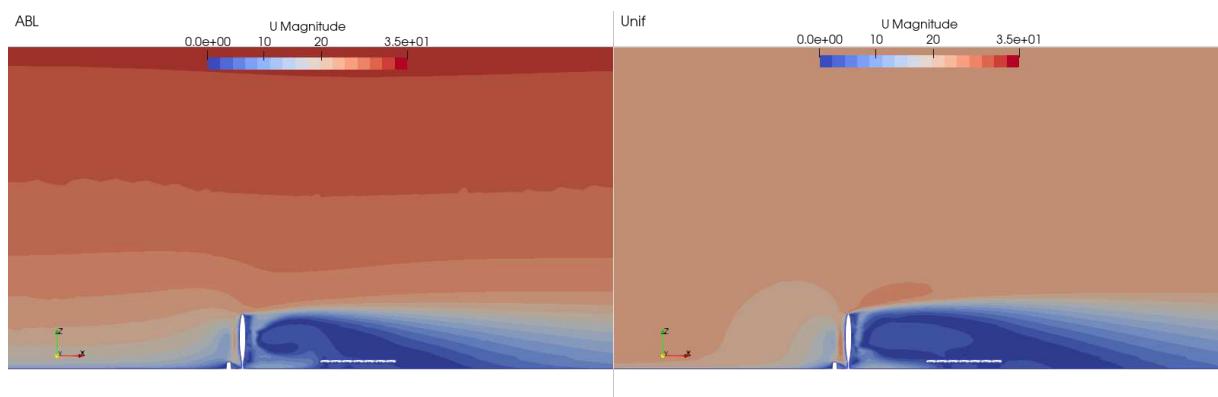


Figura 6: Velocidad - Plano XZ  $y = 0 \text{ m}$ , zoom - Izquierda: Perfil de velocidades variable, Derecha: Velocidad uniforme  $25 \text{ m s}^{-1}$

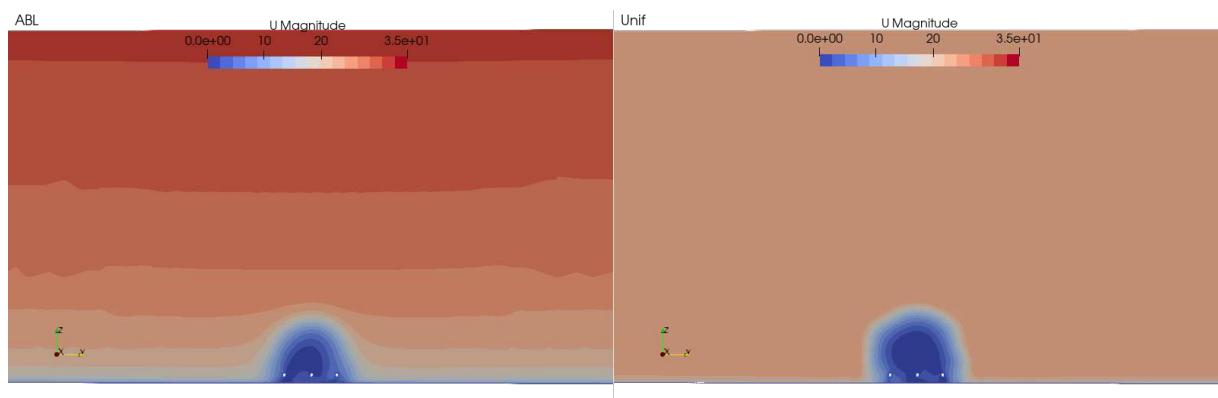


Figura 7: Velocidad - Plano YZ  $x = 8 \text{ m}$  - Izquierda: Perfil de velocidades variable, Derecha: Velocidad uniforme  $25 \text{ m s}^{-1}$

$D_{20}$  y métricas aerodinámicas (Figuras 8y 9): la métrica disminuye entre un 15 % y un 25 % con respecto al caso sin capa límite, indicando que el efecto shelter se acorta. Se identifican además desplazamientos del punto de velocidad mínima y una contracción del campo de recirculación principal. Estos indicadores permiten comparar de manera objetiva escenarios con y sin capa límite.

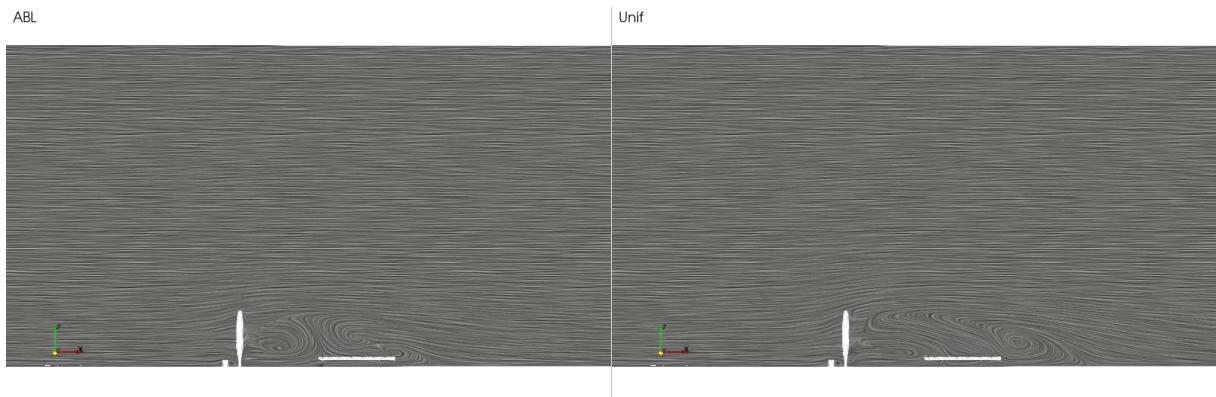


Figura 8: Campo vectorial - Plano XZ  $y = 0$  m, zoom - Izquierda: Perfil de velocidades variable, Derecha: Velocidad uniforme  $25 \text{ m s}^{-1}$

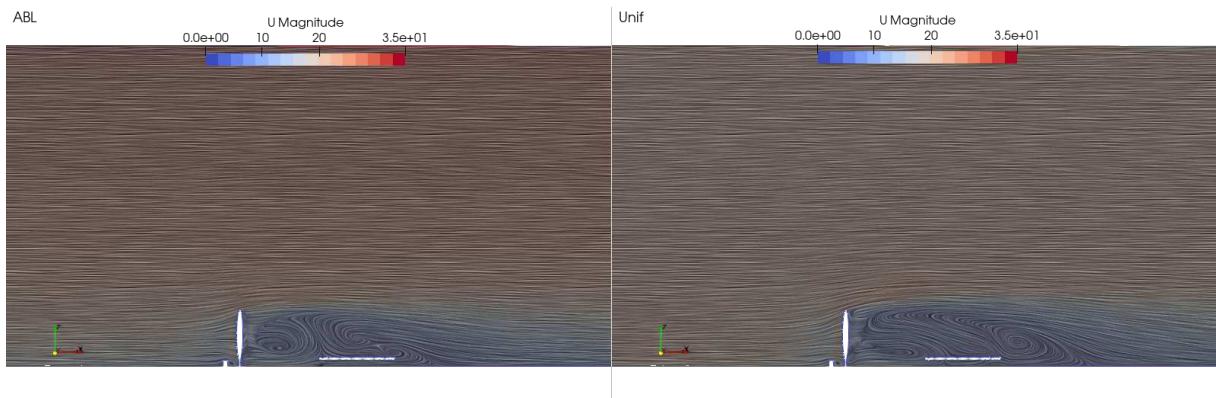


Figura 9: Campo vectorial, Velocidad Plano XZ  $y = 0$  m, zoom - Izquierda: Perfil de velocidades variable, Derecha: Velocidad uniforme  $25 \text{ m s}^{-1}$

Campos de turbulencia ( $k$ ) (Figura 10): las gráfica muestra un máximo de producción turbulenta en la zona de interfase cortina–flujo, con un rápido decaimiento hacia el sotavento. La inclusión del perfil atmosférico intensifica estos picos, lo que sugiere que la cortina interactúa más fuertemente con la cizalla vertical y favorece un transporte energético más activo. Las Figuras 6 comparan los campos de energía cinética turbulenta ( $k$ ) en el plano XZ ( $y = 0$  m) para los casos sin capa límite (Figura 6, izquierda) y con ABL (Figura 7, derecha). En el caso sin capa límite la producción de  $k$  es esencialmente local, concentrada en la interfase cortina–flujo generada por la separación del wake. Al incorporar la ABL, los perfiles verticales incidentes aumentan el gradiente de velocidad sobre la cortina, resultando en picos más intensos de  $k$  en la cima de la barrera y en una mayor heterogeneidad vertical de la turbulencia.

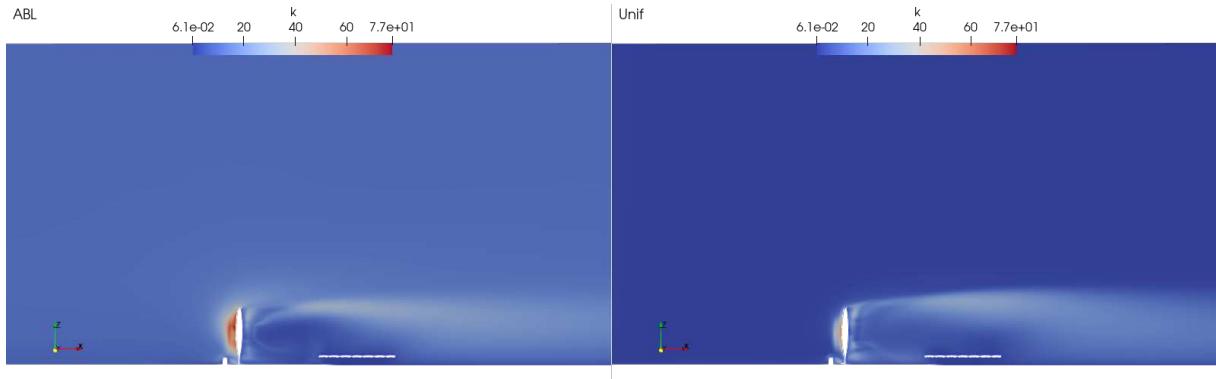


Figura 10: Energía cinética turbulenta ( $k$ ). Plano XZ,  $y = 0$  m. Izquierdo: caso SIN capa límite (entrada de velocidad uniforme,  $25 \text{ m s}^{-1}$ ). Derecha: caso CON ABL (perfil vertical aplicado por la rutina ABL de OpenFOAM). ( $k$  en  $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ).

#### 4. DISCUSIÓN

El presente estudio confirma que la inclusión de la capa límite atmosférica modifica de manera sustancial la eficacia del efecto shelter de las cortinas forestales. Los resultados numéricos muestran que la extensión de la zona protegida, cuantificada mediante el indicador  $D_{20}$ , se reduce entre un 15 % y un 25 % cuando se considera un perfil logarítmico de velocidad en comparación con un flujo uniforme. Esta disminución implica que la cortina protege una menor distancia a sotavento, a la vez que aumenta la heterogeneidad vertical de los perfiles de velocidad. La consecuencia práctica es que la zona crítica cercana al suelo (0-2 $H$ ), donde se localiza el follaje de la vid, queda más expuesta a fluctuaciones turbulentas e incrementos de cizalla superficial que elevan el riesgo de erosión y daño mecánico. Los resultados evidencian que la presencia de capa límite introduce una heterogeneidad en la estructura de flujo sotavento, incrementando la oscilación de la zona protegida y atenuando ligeramente la eficacia máxima del efecto shelter. Esta variabilidad puede comprometer la uniformidad de protección en tramos extensos de viñedo, especialmente bajo vientos Zonda tipo 2. Las simulaciones son RANS estacionarias (simpleFoam,  $k-\varepsilon$  estándar) y, por tanto, los resultados representan estados promedio. No se capturan fluctuaciones transitorias de la vorticidad ni desprendimientos no estacionarios que podrían modificar la extensión y variabilidad temporal del efecto shelter. Para diseños agronómicos, estos hallazgos implican la necesidad de incorporar perfiles de viento reales y dinámicas de capa límite en las simulaciones CFD, ya que las configuraciones basadas únicamente en viento uniforme tienden a sobreestimar la zona eficaz de protección. Asimismo, considerar combinaciones de barreras naturales y artificiales podría ofrecer un balance entre respuesta inmediata y robustez a largo plazo.

#### 5. CONCLUSIONES

La comparación entre los escenarios con y sin capa límite atmosférica revela que, al incorporar un perfil de velocidad vertical realista, la zona protegida por la cortina forestal deja de comportarse como un área homogénea de reducción constante y adquiere una heterogeneidad espacial y vertical que no puede obviarse en el diseño agronómico. En los ensayos sin capa límite, la barrera actúa como un filtro uniforme, generando un recubrimiento predecible y simétrico del flujo. Sin embargo, cuando se introduce la capa límite atmosférica en el modelo, las variaciones de velocidad a distintas alturas desencadenan interacciones turbulentas más amplias,

produciendo oscilaciones en la extensión de la zona protegida y desplazamientos del punto de máxima atenuación. Más allá de la protección de la vid, la erosión eólica constituye un aspecto crítico que se ve directamente influido por la eficacia del efecto shelter. La velocidad y la turbulencia del viento determinan la capacidad de arrastre de partículas del suelo: cuanto mayor es la velocidad cercana a la superficie, mayor es la probabilidad de desprendimiento y transporte de sedimentos. En los casos sin capa límite, la cortina reduce eficazmente el viento en toda la zona sotavento, lo que induce una disminución sustancial de la tensión cortante en el suelo y, por tanto, del potencial erosivo. Sin embargo, la introducción de la capa límite altera el perfil de esfuerzo cortante, generando gradientes más pronunciados en los primeros metros sobre el terreno y áreas de recirculación con elevada turbulencia local. Este hallazgo implica que el diseño de cortinas forestales para control de erosión debe considerar tanto la reducción media de la velocidad como la distribución espacial de la cizalla y las fluctuaciones turbulentas en la zona próxima al suelo. Disposiciones geométricas que atenúen los picos de velocidad—por ejemplo, mediante ajustes moderados en la porosidad óptica o gradientes de altura—pueden reducir los gradientes de esfuerzo cortante y mitigar la formación de zonas erosivas. El hecho de que la posición de la mínima velocidad se desplace hacia sotavento en presencia de capa límite destaca también el riesgo de zonas de sombra insuficientemente protegidas en parches de viñedo contiguos. En grandes extensiones, este efecto puede generar franjas vulnerables intermedias que pasan desapercibidas si se planifica únicamente con datos de viento uniforme. Por ello, resulta recomendable incorporar perfiles de viento obtenidos mediante mediciones meteorológicas *in situ* o a partir de modelos micrometeorológicos regionales en las etapas de planificación, de modo que las simulaciones CFD reflejen fielmente la realidad local. Este trabajo aporta una visión innovadora a la vitivinicultura al demostrar que la inclusión de la capa límite atmosférica en las simulaciones CFD no solo modifica la eficacia del efecto shelter sobre la vid sino que también redefine los patrones de erosión eólica en el suelo del viñedo. Al identificar zonas de erosión y mostrar cómo ajustes en porosidad y altura pueden atenuar picos de cizalla, ofrecemos pautas de diseño de cortinas forestales más precisas y adaptadas a condiciones reales de viento Zonda. Estas innovaciones proporcionan a agrónomos y encargados de manejo del suelo herramientas basadas en datos para optimizar la configuración de rompevientos, garantizar la integridad del manto superficial y, en última instancia, mejorar la sostenibilidad y productividad de los viñedos en regiones expuestas a vientos extremos.

## REFERENCIAS

- Alonso R., Bottini R., Piccoli P., y Berli F.J. Impact of climate change on argentine viticulture: As it moves south, what may be the effect of wind? En M. Gutiérrez Gamboa y M. Fourment, editores, *Latin American viticulture adaptation to climate change*, capítulo 12. Springer Nature Switzerland, 2024a. [http://doi.org/10.1007/978-3-031-51325-1\\_1](http://doi.org/10.1007/978-3-031-51325-1_1).
- Alonso R., Muñoz F., Bottini R., Piccoli P., y Berli F.J. Effects of wind exposure and deficit irrigation on vegetative growth, yield components and berry composition of malbec and cabernet sauvignon. *Plants*, 13(10):1292, 2024b. <http://doi.org/10.3390/plants13101292>.
- Dematte R.A., Gandolfo Raso E., y Huespe J. Protección de viñedos contra el viento zonda: evaluación de cortavientos forestales. *Investigaciones Geográficas*, (83):91–107, 2025. <http://doi.org/10.14198/INGEO.27853>.
- Gardiner B., Berry P., y Moulia B. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science*, 245:94–118, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.01.006>.
- Hargreaves D.M. y Wright N.G. On the use of the k- $\epsilon$  model in commercial cfd software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of wind engineering and industrial*

- aerodynamics*, 95(5):355–369, 2007.
- Jones W.P. y Launder B.E. The production of turbulence energy and its dissipation in a developing turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(2):301–314, 1972.
- Kitware, Inc. Paraview. 2023. Versión 5.11.1. Software de visualización de datos. Disponible en <https://www.paraview.org/>.
- Norte F.A. *Características del viento zonda en la región de Cuyo*. Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 1988.
- Norte F.A. Understanding and forecasting zonda wind (andean foehn) in argentina: A review. *Atmospheric and Climate Sciences*, 5:163–193, 2015. <http://doi.org/10.4236/acs.2015.53012>.
- Oberschelp G.P.J., Harrand L., Mastrandrea C.A., Salto C.S., y Flores Palenzona M.H. *Cortinas forestales: rompevientos y amortiguadoras de deriva de agroquímicos*. Estación Experimental Agropecuaria Concordia, INTA, 2020.
- OpenCFD Ltd. OpenFOAM ®, a cfd toolbox. <https://www.openfoam.com>, 2024. Accessed: [13/9/2025], versión v2412.
- Otero F. *El viento Zonda en Cuyo, características, métodos de clasificación y pronóstico*. Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, 2018.
- Patankar S.V. y Spalding D.B. *A computer procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic and elliptic boundary-layer situations*. Imperial College, London, 1972.
- Peri P.L. *Cortinas forestales cortaviento*. EEA Santa Cruz, INTA, 2003.
- Trimble Inc. Sketchup. 2023. Versión 2023. Software de modelado 3D. Disponible en <https://www.sketchup.com/>.
- Wang H. y Takle E.S. Model-simulated influences of shelterbelt shape on wind-sheltering. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85(1–2):49–64, 1997. <http://doi.org/10.1175/1520-0450-36.6.695>.
- Wang J., Patruno L., Zhao G., y Tamura Y. Windbreak effectiveness of shelterbelts with different characteristic parameters and arrangements by means of cfd simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 344:109813, 2024. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109813>.
- Yang Y., Gu M., Chen S., y Jin X. New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(2):88–95, 2009.