



# UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Tesis de licenciatura en Ciencias de la Atmósfera

## Transporte de $CO_2$ por las estructuras coherentes de la turbulencia en un cultivo en la provincia de Buenos Aires

**Tesista:** Martín Zeitune

**Directores:** Dra. Lucia Curto y Dra. Natalia Tonti.

2024



## Agradecimientos

A la Universidad de Buenos Aires y a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, por brindarme una formación de grado gratuita y de alta calidad.

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, y al Servicio Meteorológico Nacional, por haberme otorgado la Beca de Formación de Recursos Humanos en Ciencias de la Atmósfera.

A los investigadores y profesores del Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos con quienes tuve la oportunidad de cursar, por su profesionalismo y por su siempre generosa disposición a enseñar.

Al INTA Balcarce, por permitir realizar los ensayos, y proveer los datos de la estación INTA-Balcarce y a los integrantes del Grupo de Biometeorología del DCAO que llevaron adelante la campaña experimental.

A los jurados por aceptar evaluar mi tesis y por sus valiosos comentarios y correcciones.

A mis directoras de tesis, Natalia Tonti y Lucia Curto, por su guía, infinita paciencia y buena onda. Es invaluable lo que me aportaron sus correcciones, enseñanzas y consejos en cada una de las reuniones que tuvimos. Gracias por su dedicación y por darme la confianza para desarrollar esta Tesis.

A mi compañera Luna Ficarra por estar a mi lado en este proceso. Por tanto amor y por el ejemplo de fuerza y lucha.

A mi familia por el amor y apoyo en la vida y en cada etapa de mi camino educativo.

A mis compañeros del SMN, y en particular a los de la oficina de CPI por su apoyo incondicional al desarrollo de esta Tesis.

A mis amigos que han aportado de diversas maneras a lo largo del desarrollo de esta Tesis con su aguante, apoyo emocional y conocimientos técnicos.

Gracias a todos por ser parte de este logro.

## Resumen

La presente tesis explora el transporte turbulento de  $CO_2$  en la Capa Límite Atmosférica sobre un cultivo de soja, centrándose en el rol de las estructuras coherentes de la turbulencia. Estas estructuras, caracterizadas por movimientos de eyección y hundimiento, facilitan el transporte eficiente de propiedades en la atmósfera, como cantidad de movimiento y escalares (entre ellos la concentración de  $CO_2$ ). A partir de datos de velocidad del viento, temperatura y  $CO_2$  tomados en alta frecuencia (20 Hz), se calcularon los transportes verticales turbulentos de  $CO_2$  en rondas de media hora de duración. Se observó que estos transportes responden a un ciclo diario: durante el día, la fotosíntesis de las plantas predomina, haciendo que el flujo neto de  $CO_2$  sea hacia la superficie vegetada; mientras que durante la noche, la respiración vegetal genera un flujo neto hacia la atmósfera.

Mediante la Metodología de Cuadrantes se identificaron estructuras coherentes en el 62 % de las rondas estudiadas, con una preponderancia de las eyecciones en condiciones diurnas e inestables, asociadas al desarrollo de “plumas térmicas”, y de los hundimientos en condiciones nocturnas y neutrales, vinculadas a estructuras de tipo “hairpin vortices”. Las estructuras coherentes de tipo “plumas térmicas” en condiciones inestables mostraron alta eficiencia en el transporte de  $CO_2$ , mientras que las estructuras desarrolladas en condiciones neutrales resultaron más eficientes para el transporte de cantidad de movimiento. En condiciones estables hay poco desarrollo de turbulencia, y se da de manera intermitente, por lo cual se pudieron identificar pocos casos con estructuras coherentes.

Este trabajo destaca la influencia de la estabilidad atmosférica como factor modulador del flujo turbulento de  $CO_2$ , y proporciona evidencia sobre cómo la topología de las estructuras coherentes influye en estos transportes. A pesar de ciertas limitaciones, como la falta de mediciones en diferentes alturas, los resultados aportan información valiosa para modelar el transporte de  $CO_2$  en ecosistemas agrícolas.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>i</b>
<b>Resumen</b>	<b>ii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Intercambio de $CO_2$ entre la atmósfera y la vegetación . . . . .	2
1.2. Generalidades de la Capa Límite Atmosférica . . . . .	5
1.3. Ecuación de Energía Cinética Turbulenta . . . . .	10
1.4. Generalidades de las Estructuras Coherentes . . . . .	11
1.5. Topología de las CS y Estabilidad atmosférica . . . . .	15
1.6. Objetivos . . . . .	18
1.7. Objetivos particulares . . . . .	18
<b>2. Datos y Metodología</b>	<b>19</b>
2.1. Metodología de los cuadrantes . . . . .	19
2.2. Estabilidad en la Capa de Superficie . . . . .	22
2.3. Eficiencia del transporte turbulento de $CO_2$ . . . . .	23

2.4. Diseño experimental . . . . .	24
2.5. Preparación y corrección de datos . . . . .	27
2.5.1. Control de calidad de los datos . . . . .	30
<b>3. Resultados</b>	<b>32</b>
3.1. Características meteorológicas generales de la campaña de medición . . . . .	32
3.2. Comportamiento general del transporte $w'CO_2'$ . . . . .	35
3.3. Identificación de CS con el Método de los Cuadrantes . . . . .	36
3.4. Estabilidad . . . . .	41
3.5. Eficiencias de los transportes de $CO_2$ . . . . .	47
<b>4. Conclusiones</b>	<b>50</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>54</b>

# Capítulo 1

## Introducción

Los flujos de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) entre la biósfera y la atmósfera ocurren principalmente a través de mecanismos turbulentos dentro de la Capa Límite Atmosférica (CLA). Desde mediados del siglo XX, se han realizado numerosos experimentos micrometeorológicos para caracterizar estos transportes en diferentes ecosistemas (Baldocchi, 2008). Estos experimentos consisten en mediciones a alta frecuencia que permiten capturar las dinámicas de flujo en una escala local, y cuantificar el intercambio de energía, masa y gases entre la superficie y la atmósfera. En el caso de superficies vegetadas, como plantaciones, los instrumentos se colocan por encima del dosel para obtener datos representativos de los flujos entre la vegetación y la atmósfera. En su tesis doctoral, la Dra. Lucia Curto profundizó en el estudio del transporte de propiedades como el calor sensible y la cantidad de movimiento en un cultivo de soja en la provincia de Buenos Aires (Curto, 2020). En el presente trabajo, aunque se emplean datos de la misma campaña de medición, el enfoque está centrado en el transporte turbulento de  $CO_2$ .

Durante 2021, la cobertura de soja en el país fue de 16.6 millones de hectáreas (Presutti et al., 2023). A pesar de que en los últimos 15 años hubo un retroceso en la dominancia en el área sembrada, pasando de 65 % a 50 %, sigue siendo el cultivo con mayor extensión en la Argentina (Satorre & Andrade, 2021). El territorio argentino se posicionó como exportador dominante de soja, aportando 5 % del grano y 40 % de la harina y 42 % del aceite consumido mundialmente (Jobbágy et al., 2021). Dado este contexto de relevancia económica y agrícola, se resalta la importancia de estudiar los intercambios de  $CO_2$  entre los cultivos de soja y la atmósfera.

---

El  $CO_2$  es un gas de efecto invernadero que desempeña un papel significativo en la acumulación de calor dentro de la atmósfera terrestre. A medida que las actividades humanas se han industrializado, la concentración de  $CO_2$  en la atmósfera ha aumentado drásticamente, contribuyendo al calentamiento global. Desde el inicio de la era industrial en el siglo XVIII, las actividades humanas han incrementado el  $CO_2$  atmosférico en un 50 %, pasando de una concentración media global de alrededor de 220 ppm a cerca de 420 ppm en la actualidad (<https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide>).

Entre las actividades humanas que influyen de manera significativa en las emisiones de  $CO_2$ , la agricultura ocupa un lugar destacado. Pero también presentan potencial para actuar como sumidero de carbono. En la Argentina el sector agrícola-ganadero es responsable del 27.8 % de las emisiones de  $CO_2$  (Hiraishi et al., 2014). Las emisiones en suelos agrícolas dependen de prácticas como la rotación de cultivos o el barbecho (Bernacchi et al., 2005). De esta manera, existen estrategias dentro de la actividad agropecuaria que permiten el control de estas emisiones. Es relevante, por ello, estudiar el rol de los cultivos como fuente o sumidero de  $CO_2$ , para proporcionar información a los tomadores de decisiones.

## 1.1. Intercambio de $CO_2$ entre la atmósfera y la vegetación

El ciclo global de carbono es un ciclo biogeoquímico que describe los intercambios de carbono entre organismos vivos, la atmósfera y la superficie de la Tierra. Es sumamente importante ya que el Carbono es el componente principal de los compuestos orgánicos. Se lo puede dividir en dos componentes: un ciclo lento y un ciclo rápido (Hannah, 2021). El ciclo lento está vinculado con los procesos geológicos que pueden demandar miles de años, como por ejemplo la formación de combustibles fósiles, la formación de rocas sedimentarias, etc. El ciclo rápido, en cambio, implica procesos biológicos como la fotosíntesis o la descomposición de la materia orgánica. En la Figura 1.1 se muestran las distintas componentes del ciclo del carbono y el sentido en el cual actúan. Entre ellas se encuentran tanto los procesos lentos como la transformación del carbono en el suelo a carbono fósil; como los rápidos como son las emisiones humanas, los procesos de fotosíntesis y respiración, y el intercambio de gases entre la atmósfera y el océano, entre otros.

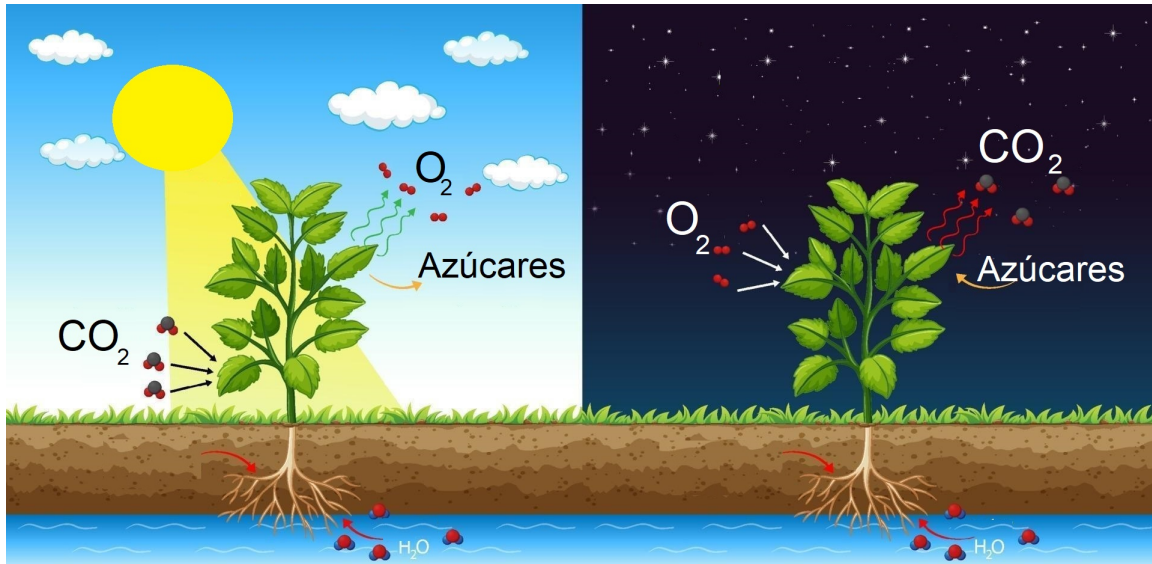




**Figura 1.1:** Esquema del ciclo del carbono en la atmósfera. Extraído de *Ciclos biogeoquímicos: Figura 20.10* de OpenStax College, Biology, CC BY 4.0; modificación de la obra de John M. Evans y Howard Perlman, USGS.

Al centrar este estudio en los intercambios entre la atmósfera y la vegetación, las componentes del ciclo de carbono de nuestro interés serán la fotosíntesis y la respiración. La fotosíntesis es el proceso mediante el cual las plantas convierten el  $CO_2$  en carbono orgánico (azúcares) utilizando la energía solar (lumínica) (Figura 1.2). Este proceso consta de dos etapas: la etapa lumínica y la etapa oscura. Durante la etapa lumínica la planta captura la energía solar y junto con  $H_2O$ , los convierte en energía química y libera  $O_2$  a la atmósfera. Durante la etapa oscura, en la que no se requiere de radiación solar, se dan reacciones que utilizan  $CO_2$  capturado de la atmósfera y la energía química producida en la etapa lumínica para producir glucosa (azúcares) (Nabors, 2004). La tasa a la cual se realiza el procesos de fotosíntesis depende de varios factores, como la disponibilidad de luz, agua, y la concentración de  $CO_2$  en el aire. Estos factores determinan la apertura de los estomas -pequeños poros situados en general en el envés de las hojas—, que permiten el intercambio de gases entre la planta y la atmósfera (Taiz, 2002). A través de los

estomas, las plantas absorben  $CO_2$  necesario para la fotosíntesis y liberan vapor de agua durante la transpiración. Cuando la humedad atmosférica es baja, los estomas tienden a cerrarse para reducir la pérdida de agua, lo que también limita la entrada de  $CO_2$  y, por lo tanto, reduce la fotosíntesis (Farquhar et al., 1980; Morison & Gifford, 1983).



**Figura 1.2:** Esquema de los procesos de fotosíntesis y respiración celular durante el día y la noche respectivamente. En la fotosíntesis las plantas convierten el  $CO_2$  de la atmósfera en azúcares y liberan  $O_2$ . En la respiración celular las plantas utilizan los azúcares almacenados mediante la oxidación para producir energía.

A su vez, las plantas como todo organismo vivo respiran. A través de este proceso, la glucosa generada en el proceso de fotosíntesis es degradada, generando en el proceso dióxido de carbono y agua. De esta manera los procesos de fotosíntesis y respiración son procesos inversos. Para que la glucosa pueda ser utilizada por las plantas, es degradada a través de la oxidación, generando  $CO_2$  y agua como subproductos. Este  $CO_2$  se difunde hacia la atmósfera a través de los estomas que, aunque tienden a cerrarse parcial o completamente durante la noche para minimizar la pérdida de agua, permiten un pequeño intercambio de gases (Lambers et al., 2005).

Durante las horas diurnas, la fotosíntesis predomina sobre la respiración, lo que convierte a la vegetación en un sumidero neto de  $CO_2$ , es decir que absorbe más  $CO_2$  del que libera. De este modo, la vegetación juega un rol crucial en la reducción de las concentraciones de  $CO_2$  atmosférico durante el día. Mientras que en condiciones nocturnas, la ausencia de luz solar hace que la asimilación de  $CO_2$  por medio de la fotosíntesis sea nula (fotosíntesis en fase oscura), por

---

lo que la vegetación se convierte en una fuente neta de  $CO_2$ , liberando este gas a la atmósfera (Nabors, 2004).

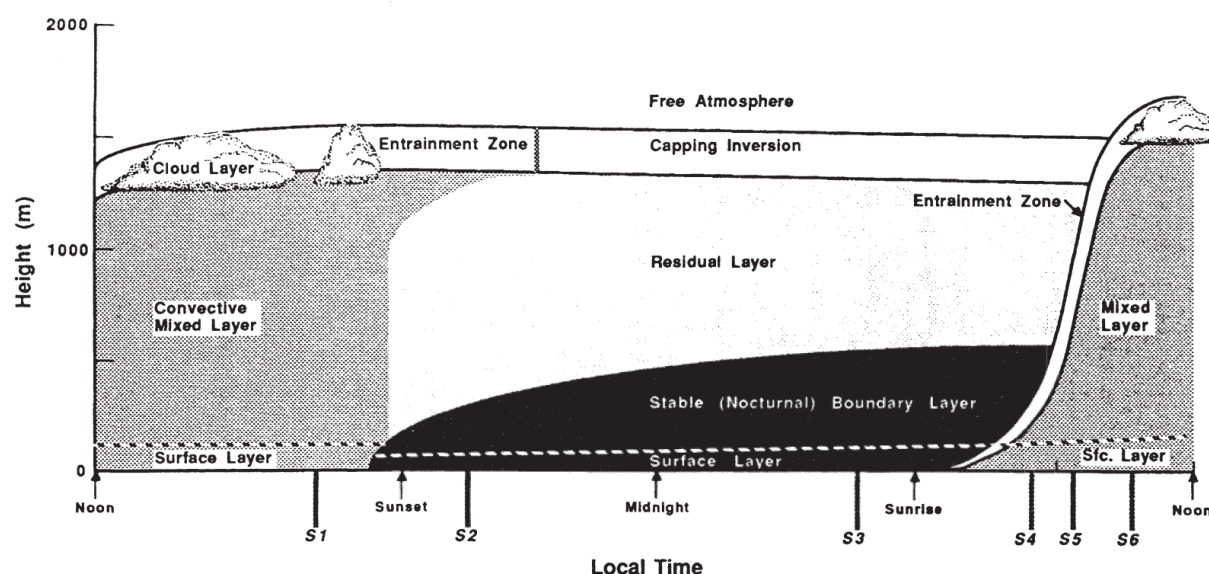
Los intercambios de  $CO_2$  entre las plantas y la atmósfera, a través de la respiración y la fotosíntesis, ocurren en la porción inferior de la atmósfera conocida como la Capa Límite Atmosférica. En esta región, los flujos turbulentos juegan un papel fundamental en el transporte de  $CO_2$ , facilitando el intercambio de gases entre la vegetación y la atmósfera circundante.

## 1.2. Generalidades de la Capa Límite Atmosférica

Se define a la CLA como la porción de la troposfera que esta directamente afectada por la presencia de la superficie terrestre. Esta capa responde a los forzantes de la superficie como la transferencia de calor sensible y latente, la fricción y la modificación del flujo debida al terreno, en una escala temporal típica que va desde los pocos minutos hasta aproximadamente una hora. Su espesor varía considerablemente en el tiempo y el espacio, desde unos pocos cientos de metros durante la noche hasta varios kilómetros durante el día. El perfil vertical de la temperatura en la CLA muestra un marcado ciclo diurno, a diferencia de lo que pasa en la atmósfera a mayores altitudes. Esta diferencia está asociada al ciclo diurno de la radiación, que en mayor parte es transmitida por la atmósfera, y es absorbida por la superficie que, en consecuencia, se calienta y se enfría. El calentamiento y enfriamiento de la superficie desata cambios en los flujos, los cuales permiten cambios en a la CLA a través de los procesos de transporte. La turbulencia juega un papel crucial para estos procesos, ya que es uno de los mecanismos principales que regulan el intercambio de energía, masa y cantidad de movimiento en la CLA. Una característica distintiva de la CLA es la frecuencia e intensidad con la que ocurren estados turbulentos del flujo en comparación con el resto de la atmósfera, marcando una diferencia clave en su dinámica (Stull, 1988).

La CLA se caracteriza por tener una estructura de capas bien definidas tal como muestra la Figura 1.3. Los componentes de mayor extensión vertical de esta estructura son la Capa Mezclada, la Capa Estable, y la Capa Residual. Durante el día la Capa Mezclada es dominante y se caracteriza por tener una fuerte turbulencia asociada al calentamiento desde superficie, lo que resulta en transportes significativos de calor, cantidad de movimiento, contaminantes y gases como el  $CO_2$ . Al caer la noche, el enfriamiento de la superficie genera una inversión térmica en

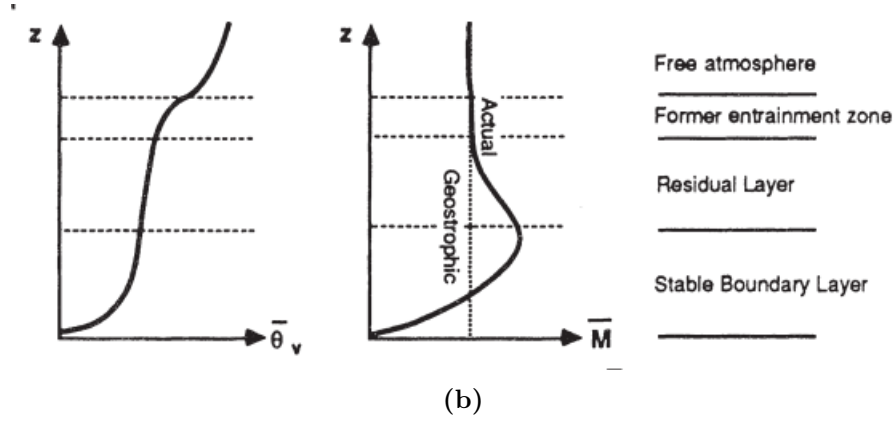
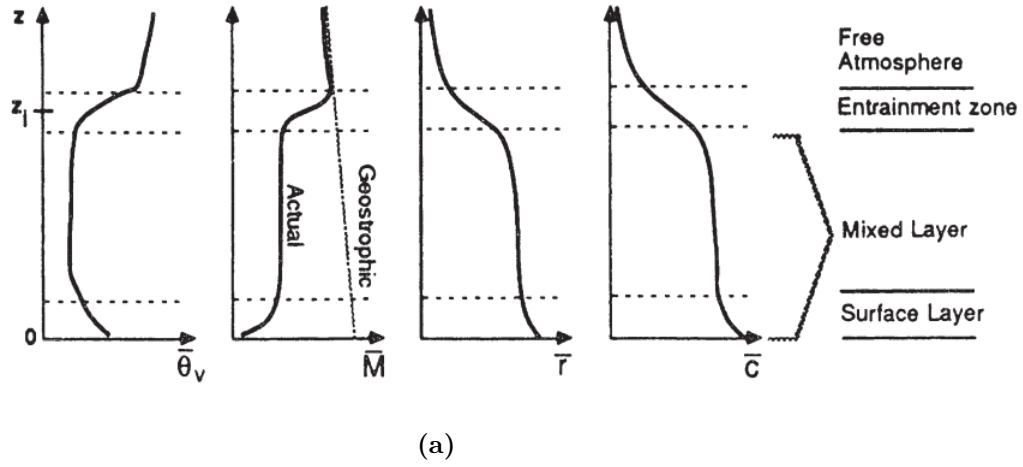
los primeros metros de la CLA, dando lugar a la Capa Estable, donde las condiciones son más estratificadas y menos turbulentas, y los intercambios verticales más limitados. Por encima de la Capa Estable persiste la Capa Residual, que es un remanente de la Capa Mezclada del día anterior, y queda aislada de la superficie durante la noche por lo que no es considerada estrictamente una capa límite. Por encima de estas capas, tanto de día como de noche, se encuentra la zona de entremezcla. Esta zona no responde directamente a la superficie, sino que es una región de la atmósfera en donde las características son tanto de capa límite como de atmósfera libre. En la porción más baja de la CLA se encuentra la Capa de Superficie (CdS), de un espesor en general mucho menor que las anteriores, del orden de los 50 m. En esta capa los flujos varían menos de 10 % con la vertical, por eso también se la denomina la capa de flujos constantes. Limita por encima con la Capa Mezclada durante el día, o la Capa Estable durante la noche. Por debajo de la CdS se encuentra una capa delgada cuyo flujo es laminar, denominada Subcapa Laminar. Allí es donde se producen los intercambios directos con la superficie terrestre, siendo de pocos centímetros de espesor. En esta capa el transporte molecular domina sobre el transporte turbulento (Stull, 1988).



**Figura 1.3:** Evolución y estructura de la CLA a lo largo de un día, donde se muestra la Capa Mezclada bien desarrollada durante el día, y la Capa Residual por encima de la Capa Estable, desarrollada durante la noche. En la porción mas baja de la CLA se encuentra la Capa de Superficie. Extraída de Stull (1988), *An introduction to boundary layer meteorology* (Vol. 13), Springer Science and Business Media.

---

Durante el día las principales variables de la CLA muestran perfiles promedio típicos como se esquematizan en la Figura 1.4 (a), que son aplicables tanto como para una superficie desnuda o una con vegetación baja. En la CdS la temperatura potencial virtual promedio ( $\overline{\theta_v}$ ), la relación de mezcla del vapor de agua promedio ( $\overline{r}$ ) y la concentración de contaminantes promedio ( $\overline{c}$ ) disminuyen con la altura. A su vez, la velocidad del viento horizontal promedio ( $\overline{M}$ ) aumenta de manera logarítmica con la altura (Stull, 1988), siendo nula cerca de la superficie debido a la condición de no-deslizamiento (Figura 1.4 (a)). Observando estos perfiles se puede inferir que la superficie actúa como fuente de  $\overline{\theta_v}$ ,  $\overline{r}$  y  $\overline{c}$  durante el día y, por lo tanto, los flujos turbulentos son hacia la atmósfera. En el caso de  $\overline{M}$  el terreno actúa como sumidero, y los flujos son desde la atmósfera hacia superficie. Por encima de la CdS, en la Capa Mezclada, las variables no presentan gran variación con la altura debido a que la mezcla turbulenta tiende a homogeneizarlas en la vertical. En la Capa de Entremezcla  $\overline{\theta_v}$  y  $\overline{M}$  muestran un marcado aumento con la altura, mientras que  $\overline{r}$  y  $\overline{c}$  disminuyen, dado que esta es una zona de transición hacia la Atmósfera Libre. Durante la noche, en la Capa Estable (Figura 1.4 (b)), el perfil del viento sigue siendo logarítmico y disminuyendo con la altura, pero la variación de  $\overline{\theta_v}$  cambia debido al enfriamiento radiativo de la superficie. En condiciones nocturnas la superficie actúa como un sumidero de calor, lo cual invierte el flujo de temperatura hacia la superficie. En el tope de la Capa Estable se genera un máximo de  $\overline{M}$ , conocido como “Jet Nocturno”, que trae aparejado una fuerte cortante vertical de viento, que tienden a generar turbulencia. Como resultado puede generarse mezcla turbulenta en la Capa Estable. Algunos cientos de metros por encima del jet,  $\overline{M}$  desciende hasta alcanzar valores geostróficos en la Atmósfera Libre. En la Capa Residual  $\overline{\theta_v}$  varía poco con la altura, acorde al comportamiento de un remanente de la Capa Mezclada.



**Figura 1.4:** Perfiles típicos de la temperatura potencial virtual media ( $\overline{\theta_v}$ ), velocidad media del viento horizontal ( $\overline{M}$ ), relación de mezcla del vapor de agua ( $\overline{r}$ ) y la concentración de un contaminante genérico ( $\overline{c}$ ) para condiciones medias diurnas (a) y condiciones medias nocturnas(b). Extraído de Stull (1988), *An introduction to boundary layer meteorology (Vol.13)*, Springer Science and Business Media.

La Capa de Superficie presenta características especiales en el flujo. Para describir los perfiles medios de las variables en esta capa, se suele utilizar la Ley de la Pared (Tritton, 2012; White, 2008), aplicable en casos de números de Reynolds (Re) elevados, en los cuales las fuerzas inerciales predominan sobre las viscosas. Esta ley describe el perfil de velocidad del flujo como una función logarítmica dependiente de la distancia a la superficie, donde la velocidad se reduce a cero debido al arrastre friccional. Sin embargo, cuando las condiciones de estabilidad se desvían de la neutralidad, es necesario corregir esta función logarítmica. La Teoría de la Semejanza de Monin-Obukhov (TSMO) proporciona un marco para ajustar el perfil logarítmico de velocidad, incorporando un parámetro clave: la Longitud de Obukhov ( $L$ ). Este parámetro tiene en cuenta tanto los forzantes



---

mecánicos como térmicos, lo que permite modificar el perfil de velocidad y evaluar la estabilidad estática en la CdS. Los forzantes mecánicos se cuantifican mediante la velocidad de fricción ( $u_*$ ), otro parámetro relevante para la CdS, que está dado por los flujos verticales de cantidad de movimiento horizontal cerca de la superficie. Los forzantes térmicos se encuentran dados por el término de producción por empuje de la ecuación de Energía Cinética Turbulenta, que se detallará en la Sección 1.4. Dado que en esta capa los flujos varían menos del 10 % con la altura, la TSMO asume que estos pueden considerarse constantes mediante una aproximación de primer orden, lo que implica que un flujo medido a un nivel puede ser representativo de toda la capa (Stull, 1988). Esta es una aproximación que resulta muy conveniente a la hora de diseñar experimentos de medición en la CdS ya que, al estimar los flujos turbulentos en un nivel, se puede caracterizar toda la capa.

Dentro de la CdS se pueden identificar dos subcapas: la Rugosa (SR), más cerca de la superficie, y la Inercial (SI) por encima. Mediciones sobre superficies rugosas, como son los casos de superficies cubiertas por vegetación, permitieron encontrar que el flujo y la turbulencia en los primeros metros por encima de la cobertura se comporta de una forma distinta a lo que sucede en la SI. La interacción entre la atmósfera baja y este tipo de superficies es de suma importancia, tanto para el pronóstico del tiempo y el clima, como para los intercambios de escalares entre la atmósfera y los cultivos. Es por eso que varios investigadores se han dedicado al estudio de este tipo de condiciones, dándole el nombre de Subcapa Rugosa a la porción de la CLA adyacente al tope de la vegetación, y que se ve afectada por la misma (Raupach et al., 1996). Dependiendo de la densidad de la superficie vegetada, se ha establecido que la altura de la SR puede variar entre 2 y 5 veces la altura de la cobertura (Finnigan, 2000).

Se ha encontrado que la turbulencia por encima de la canopia vegetal presenta características o comportamientos más o menos universales. En general se observa un perfil de velocidades medias con una cortante intensa en el tope de la vegetación con un punto de inflexión asociado. La turbulencia generada por la cortante vertical del viento está dominada por movimientos verticales ascendentes seguidos de movimientos descendentes, aquí denominados eyecciones y hundimientos. Estos ciclos de eyecciones y hundimientos alternados pueden ser pensados como parte de una estructura de remolinos desarrollada a partir de la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz, inducida justamente por la cortante del perfil de velocidad media (Finnigan, 2000). A este tipo de estructuras se las denomina Estructuras Coherentes (CS, por sus siglas en inglés). Estas estructuras son de interés porque se ha demostrado que son responsables de una gran fracción del

---

transporte de cantidad de movimiento y de escalares (Robinson et al., 1991; Marusic et al., 2010), lo que ha llevado a un cambio de paradigma en los estudios sobre el transporte turbulento, que previamente era considerado mayormente azaroso.

### 1.3. Ecuación de Energía Cinética Turbulenta

Una de las cantidades más importantes para estudiar la turbulencia en la CLA es la Energía Cinética Turbulenta (ECT). Para estudiarla las variables involucradas son separadas en una parte media y una perturbada, según la Ecuación 1.1.

$$\chi = \bar{\chi} + \chi' \quad (1.1)$$

Donde  $\chi$  es la variable a analizar, ya sea alguna de las componentes del viento o un escalar,  $\bar{\chi}$  es el promedio en un intervalo de tiempo, y  $\chi'$  son los apartamientos con respecto a ese valor medio, que representa a la turbulencia.

La ECT está definida por la Ecuación 1.2 en la que se considera un sistema coordinado alineado con el viento medio ( $\bar{v} = 0$ ) (terna micrometeorológica), asumiendo homogeneidad horizontal y considerando despreciable la subsidencia ( $\bar{w} = 0$ ). Esta ecuación esta dada por términos de producción, de perdida, y de redistribución de ECT, y sirve para evaluar en qué casos la CLA se hace más turbulenta, y en qué casos la turbulencia decae (Stull, 1988).

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = \frac{g}{\bar{\theta}} \overline{w'\theta'} - \overline{w'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{w'e'}}{\partial z} - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \overline{w'P'}}{\partial z} - \varepsilon \quad (1.2)$$

Los términos de la Ecuación 1.2, se enumeran a continuación, describiendo su rol en el balance de ECT, mencionados en orden de izquierda a derecha:

1. Variación local o almacenaje de ECT. Describe la tasa de cambio temporal de la ECT en un punto determinado de la CLA.
2. Término de producción/consumo por empuje, dado por el transporte vertical turbulento de temperatura potencial.



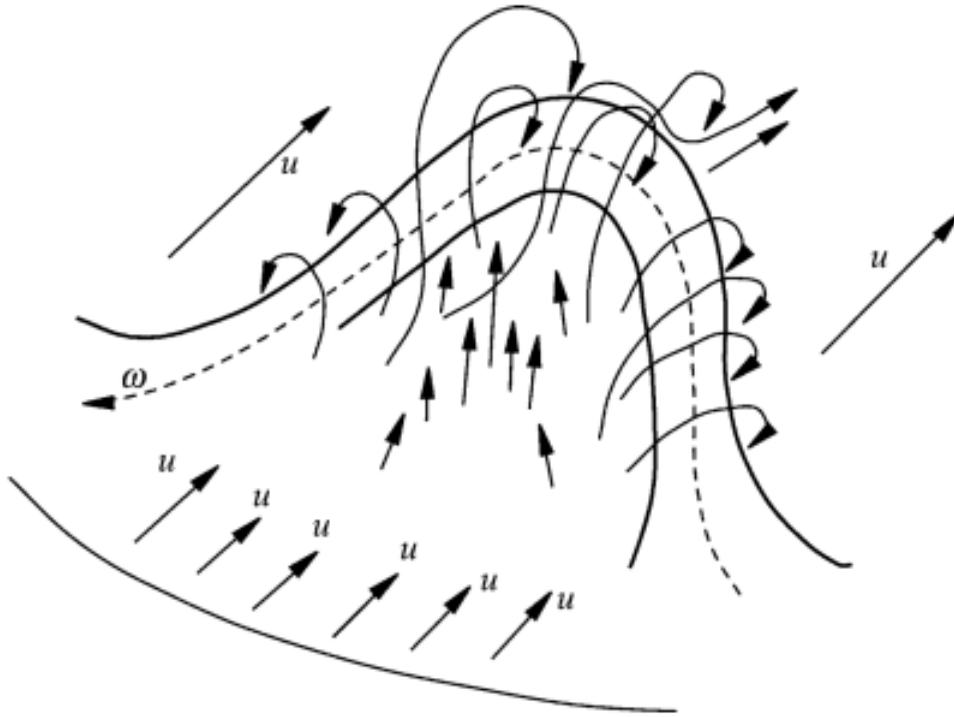
- 
3. Término de producción mecánica o término de la cortante, dada por la cortante del viento y el transporte vertical turbulento de cantidad de movimiento horizontal ( $\overline{u'w'}$ ).
  4. Término de redistribución vertical de transporte vertical turbulento de ECT.
  5. Término de las perturbaciones de presión. Es un término de redistribución, que describe cómo ECT es distribuida por las perturbaciones de presión, asociado generalmente a oscilaciones por empuje u ondas de gravedad.
  6. Disipación viscosa de ECT en forma de calor, producida por los torbellinos más pequeños.

La ECT cobra especial relevancia cuando se quiere estudiar de qué manera la modifican las diferentes condiciones de estabilidad de la CdS, y las formas particulares en las que se organiza la turbulencia. En el presente trabajo, se pondrá especial énfasis en los términos 2 y 3 de la Ecuación 1.2. El término 2, asociado al empuje, será crucial para comprender el rol que tienen los gradientes de temperatura en la vertical, y por lo tanto la estabilidad estática en la CdS en la generación de la turbulencia y formación de diferentes tipos de CS. A su vez, el término 3, relacionado con los forzantes mecánicos, será determinante en el aporte de energía turbulenta a través de los transportes verticales de cantidad de movimiento horizontal. Este proceso va a modular la forma en la que se organiza la turbulencia, cuando las cortantes verticales del viento en la CdS, sean más significativas en la generación de turbulencia que el empuje térmico.

## 1.4. Generalidades de las Estructuras Coherentes

Los primeros estudios sobre CS se remontan a la década del '50, cuando comenzaron estudios de turbulencia en túneles de viento. En 1952, Theodore Theodorsen en su artículo llamado “Mecanismos de la turbulencia” (Theodorsen, 1952), marcó un hito en la comprensión del fenómeno de las CS de la turbulencia, dando los primeros argumentos teóricos para la formación de vórtices en flujos a bajas velocidades, en las inmediaciones de una pared rígida. El tipo de estructura turbulenta propuesta por Theodorsen puede observarse en la Figura 1.5 en la que se muestra una estructura en forma de herradura. A partir de allí otros investigadores, como Kline et al. (1967), comenzaron a usar el término Estructuras Coherentes para referirse a las estructuras con forma de vórtice, que se forman en los flujos turbulentos. Usando burbujas de hidrógeno como marcadores, observaron que en capas límites desarrolladas sobre paredes, la turbulencia se organizaba en

forma de rollos transversales al flujo, levemente alargados en dirección del movimiento medio. Las burbujas se aglomeraban cerca de la pared hasta que se movían en forma perpendicular a ésta, en forma de erupción (eyecciones).

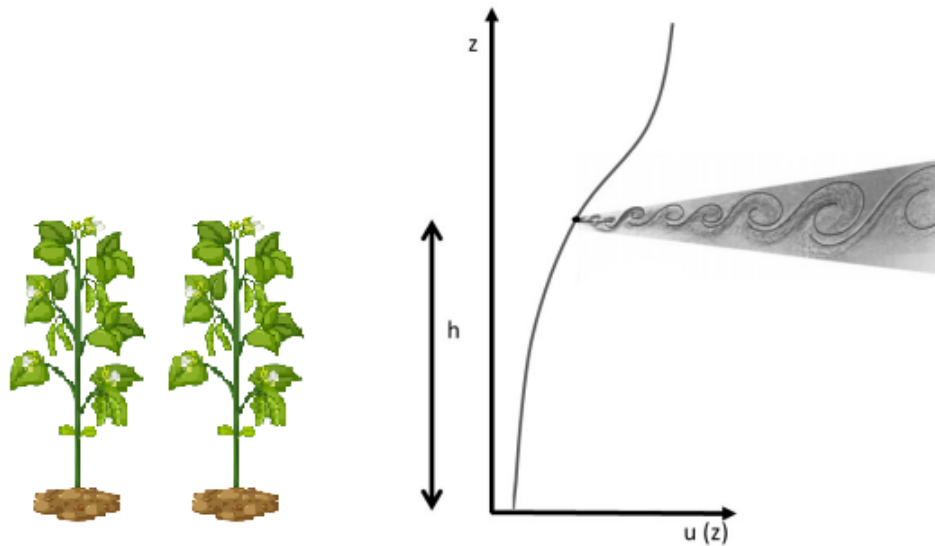


**Figura 1.5:** Estructura de torbellinos en forma de herradura o “Hairpin Vortices” propuesta por Theodorsen (1952) para números de  $Re$  bajos y un perfil de velocidades con un punto de inflexión. La velocidad del flujo medio esta dada por  $u$  y  $\omega$  representa la dirección de la vorticidad.

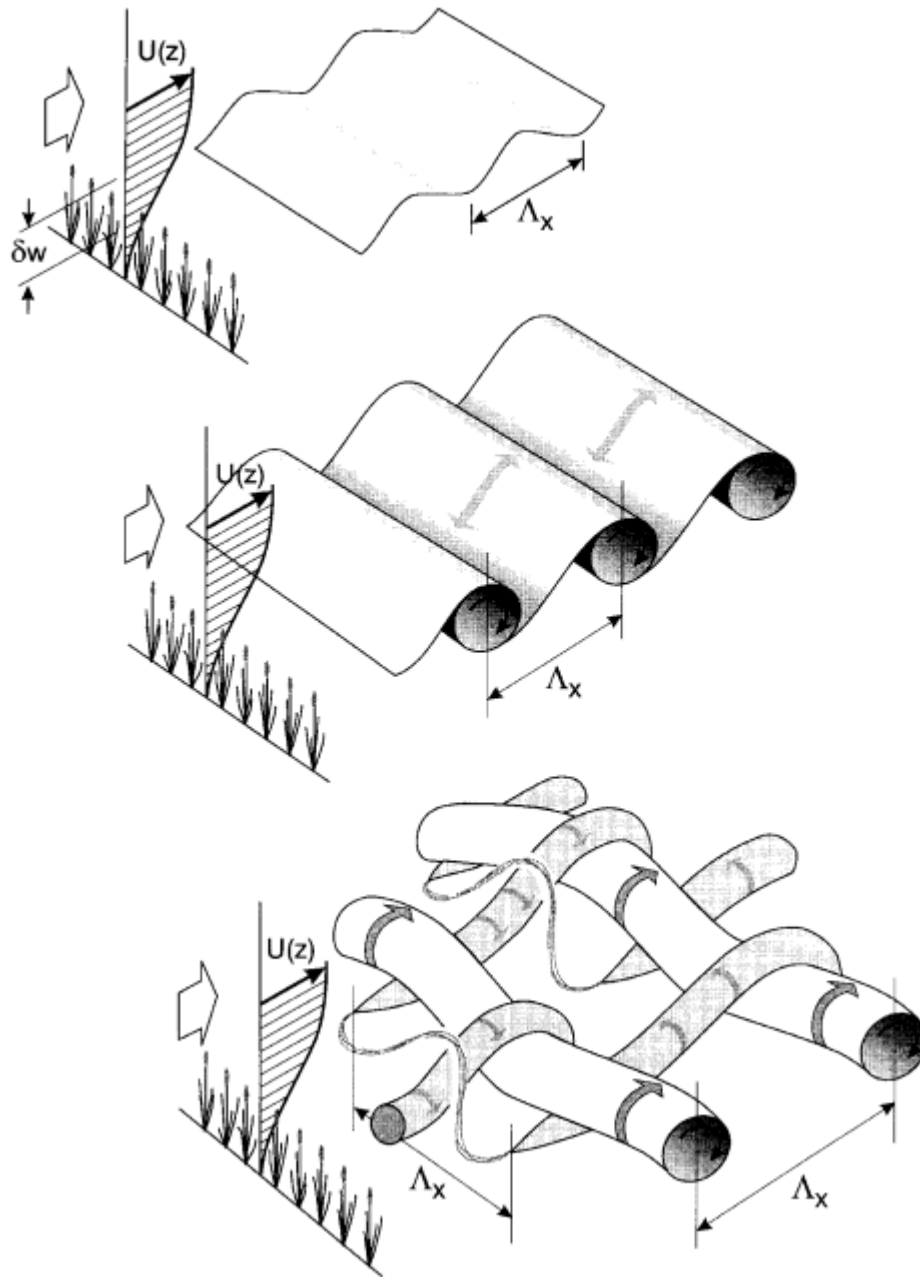
En su trabajo, Raupach et al. (1996) cambia la perspectiva de como es abordado el tema la turbulencia sobre una cobertura vegetal. Propone que hay una analogía con una estructura de “Capa de Mezcla Plana” en la SR, en lugar de ser simplemente una versión perturbada de la turbulencia de la capa límite por encima de la canopia. La Capa de Mezcla Plana es la que se forma cuando dos corrientes de aire con diferentes velocidades, inicialmente separadas por una placa divisoria, se mezclan corriente abajo del borde posterior de la placa. Este tipo de flujos son comunes en aplicaciones de ingeniería y han sido intensamente estudiados (Finnigan, 2000). La comparación se basa principalmente en que hay un punto de inflexión en el perfil de la velocidad media del flujo a la altura del tope de la cobertura vegetal. Esta versión modificada de la CdS debido a la presencia de vegetación fue denominada como “Analogía de la Capa de Mezcla de la

Canopia” (Finnigan, 2000).

El campo de velocidades con su punto de inflexión, como se presenta en la Figura 1.6, tiende a desarrollar inestabilidades del tipo Kelvin-Helmholtz, que favorecen la formación de Estructuras Coherentes en forma de torbellinos organizados. Dicha inestabilidad se produce en la interfase de dos fluidos de diferentes densidades, con una cortante de velocidad entre ellos. Al alcanzar un valor crítico de la cortante, el flujo se vuelve dinámicamente inestable y se forman ondas en la interfase, que tienden a amplificarse hasta su punto de rompimiento. Esta onda “rompiente” se llama onda de Kelvin-Helmholtz (KH) (Stull, 1988). Este tipo de ondas evoluciona rápidamente hacia rollos de vorticidad, conectados entre si por zonas de baja turbulencia. Estas estructuras se amplifican y dispersan por el aire (Huerre & Monkewitz, 1985). La interacción con la vegetación hace que se formen paquetes rollos estirados en forma de lapices o “streak-vortices” (Figura 1.7). Los rollos pierden cantidad de movimiento debido al rozamiento con la vegetación en su parte inferior, lo que provoca un retraso con respecto a su parte superior y una deformación de la estructura, ahora con forma de herradura denominada “Hairpin Vortices”, como se muestra en la Figura 1.5.



**Figura 1.6:** Perfil de Velocidad de viento medio con punto de inflexión en el tope de la cobertura, asociado al desarrollo y dispersión de ondas de Kelvin-Helmholtz. Modificado de Curto (2020), Estudio de las Estructuras Coherentes de la Capa de Superficie sobre una superficie cultivada, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.



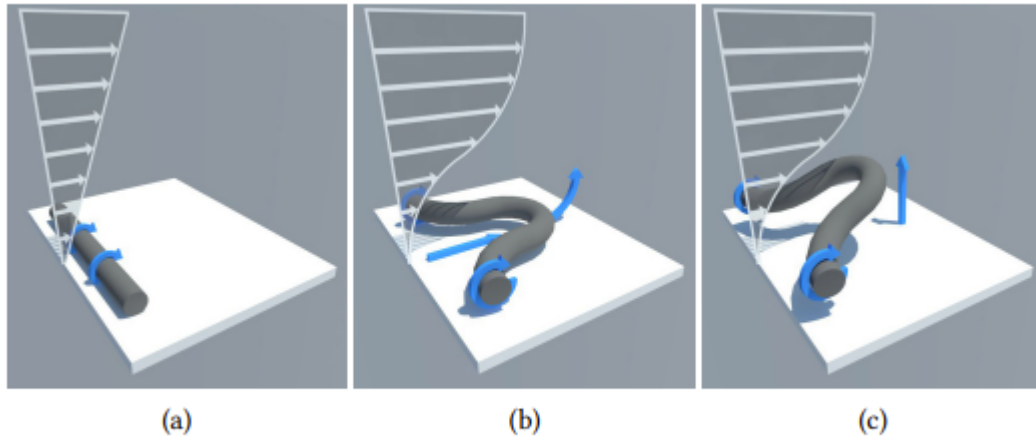
**Figura 1.7:** Diagrama esquemático de las etapas en el desarrollo de estructuras del tipo “streak-vortices” en la Subcapa Rugosa. Extraído de Finnigan (2000), *Turbulence in plant canopies. Annual review of fluid mechanics* , 32(1), 519–571

---

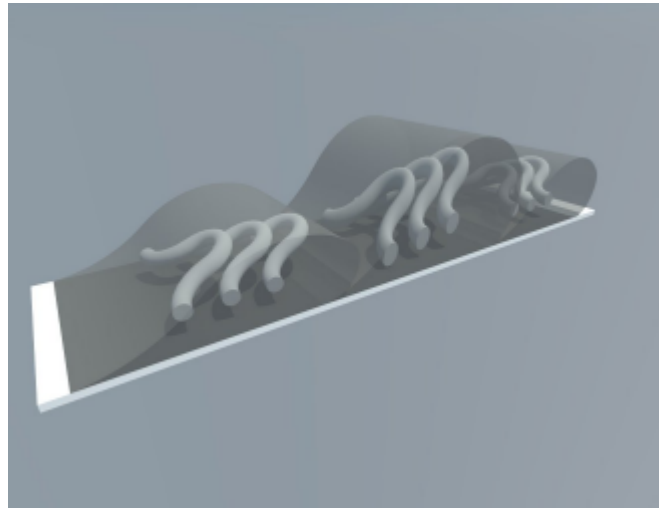
## 1.5. Topología de las CS y Estabilidad atmosférica

Numerosas investigaciones han estudiado el transporte turbulento, utilizando la analogía de Lewis para la turbulencia en la cual se asume que todos los escalares, como vapor de agua, temperatura y  $CO_2$ , se transportan de forma similar (Kays et al., 1980). Al extenderla para el transporte de cantidad de movimiento, toma el nombre de analogía de Reynolds. Sin embargo, se ha probado que no es válida en términos generales, sino que en la CLA esta analogía solo es aplicable para condiciones neutrales, en las cuales tanto cantidad de movimiento como escalares se transportan por el mismo tipo de CS (Li & Bou-Zeid, 2011). A medida que aumenta la influencia del empuje, la relación entre los flujos y las eficiencias en los transportes para cantidad de movimiento y escalares comienzan a diferir significativamente (Brutsaert, 2023; Choi et al., 2004). Los transportes de escalares y cantidad de movimiento en condiciones inestables no se realizan en fase, es decir, son transportadas por diferentes eyecciones y hundimientos, asociados a diferentes tipos de CS (Li & Bou-Zeid, 2011).

Algunos estudios de laboratorio y numéricos revelaron que varias formas de estructuras coherentes, como “streaks vortices”, y movimientos de mayor escala, existen en los flujos de tuberías, flujos en canales y capas límite turbulentas (Kline et al., 1967; Kim & Adrian, 1999). Se han estudiado e identificado el mismo tipo de estructuras en la CLA (Hommema & Adrian, 2003; Inagaki & Kanda, 2010). Se ha reconocido que en general, en condiciones neutrales, la turbulencia evoluciona de la forma descrita por Theodorsen (1952) (Li & Bou-Zeid, 2011), siendo los “hairpin vortices” las CS que dominan la CdS en este tipo de condiciones. Estas estructuras son generadas debido principalmente a la acción de la cortante del viento medio, y están formadas por múltiples rollos con vorticidad alineados según la dirección media del flujo. Una perturbación en el campo medio del viento, ocasionada por ejemplo por una ráfaga, puede causar la elongación de los rollos en forma de herradura o “hairpin vortices” (Figura 1.8). Los “hairpin” se alinean en grupos, y forman paquetes largos, los cuales se alinean para formar movimientos de gran escala “large-scale motions”, como se observa en la Figura 1.9 (Kim & Adrian, 1999).

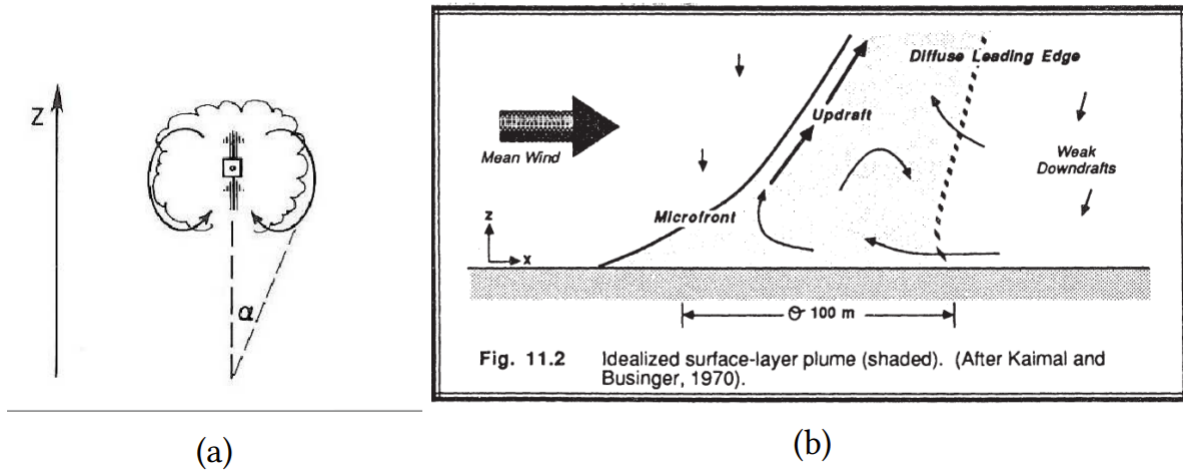


**Figura 1.8:** *Evolución de las estructuras coherentes para condiciones neutrales o levemente inestables. “Low-speed streaks” (a); “horseshoe” (b); “hairpin-vortex” (c).*



**Figura 1.9:** *Estructuras coherentes del tipo “large-scale motions”*

En condiciones inestables, el término de empuje en la ecuación 1.2 tiene preponderancia por sobre la producción por cortante. Bajo estas condiciones, las estructuras coherentes toman forma de “plumas” o térmicas (Stull, 1988). Estas CS presentan una mayor elongación en la vertical, con movimientos verticales ascendentes rápidos e intensos, rodeados por descensos débiles de mayor extensión horizontal (Li & Bou-Zeid, 2011), como se muestra en la Figura 1.10.



**Figura 1.10:** Estructura vertical de una “pluma”, mostrando los ascensos intensos, y débiles movimientos descendentes compensatorios (a), corte horizontal de una pluma con microfrente por delante de la misma, con movimiento ascendente marcado y descensos débiles por detrás (b). Extraído de Stull (2012), *An introduction to boundary layer meteorology* (Vol. 13), Springer Science and Business Media

Para estudiar la transición desde condiciones neutrales a inestables en la CdS, Hommema & Adrian (2003), encontraron evidencia clara de paquetes de estructuras “hairpin” en condiciones neutrales, usando visualizaciones de humo. También observaron que, bajo condiciones moderadamente inestables, estas estructuras se elevan formando un ángulo con la superficie como se muestra en la Figura 1.8. Por otra parte, en condiciones fuertemente inestables, Hommema & Adrian (2003) no detectaron estructuras del tipo “hairpin”, sino solamente plumas térmicas con marcados movimientos ascendentes.

Las diferencias en la forma en que se transportan las propiedades, pueden evaluarse a través del estudio de la eficiencia de los transportes turbulentos, la cual se define por la correlación entre las variables turbulentas. Investigaciones previas han mostrado que, a medida que la inestabilidad atmosférica crece, las eficiencias de transporte de distintas propiedades comienzan a diferir significativamente (Katul et al., 2008; De Bruin et al., 1993). En este sentido, Li & Bou-Zeid (2011) encuentran que, conforme la inestabilidad aumenta, la eficiencia con la que son transportados los escalares se incrementa, mientras que la eficiencia en el transporte de cantidad de movimiento disminuye. Esta disimilitud está relacionada con los distintas configuraciones de CS que se desarrollan en la CdS, los cuales son modulados principalmente por la estabilidad

---

atmosférica (Mack et al., 2024).

## 1.6. Objetivos

Las CS desempeñan un papel fundamental en los procesos de transporte de cantidad de movimiento y escalares, como el vapor de agua y la concentración de dióxido de carbono en la CdS (Katul et al., 1997; Foken & Mauder, 2008). De esta manera, las CS son responsables del transporte vertical de humedad y  $CO_2$  entre la superficie terrestre y la atmósfera libre. Como resultado, juegan un papel crucial en la regulación del estado hídrico y la disponibilidad de humedad de la vegetación, y en la dinámica del ciclo del carbono (Kim & Verma, 1996).

En esta tesis se van a estudiar los transportes turbulentos de las concentraciones de dióxido de carbono medidos sobre una superficie cultivada con soja, bajo condiciones productivas. Se estudiarán cómo varían estos flujos en función de los movimientos ascendentes y descendentes característicos de las CS. Para ello, se va a utilizar la Metodología de los Cuadrantes, que separa la contribución de los flujos según su signo, permitiendo identificar hundimientos ( $w' < 0$ ), eyecciones ( $w' > 0$ ) y otros movimientos de las CS (Shaw et al., 1983). También se evaluará cómo se ve modificada la eficiencia del transporte turbulento de  $CO_2$ .

## 1.7. Objetivos particulares

Con el propósito de mejorar el entendimiento de las CS y su interacción con una cobertura vegetal, se plantean los siguientes objetivos:

1. Estudiar las CS asociadas a los flujos de  $CO_2$  en condiciones diurnas y nocturnas, utilizando el Método de los Cuadrantes.
2. Caracterizar a las CS según el régimen de estabilidad dominante.
3. Cuantificar la proporción entre eyecciones y hundimientos para los transportes de  $CO_2$  en cada tipo de CS.
4. Evaluar la eficiencia de los transportes de  $CO_2$  y cantidad de movimiento, y estudiar sus diferencias.



## Capítulo 2

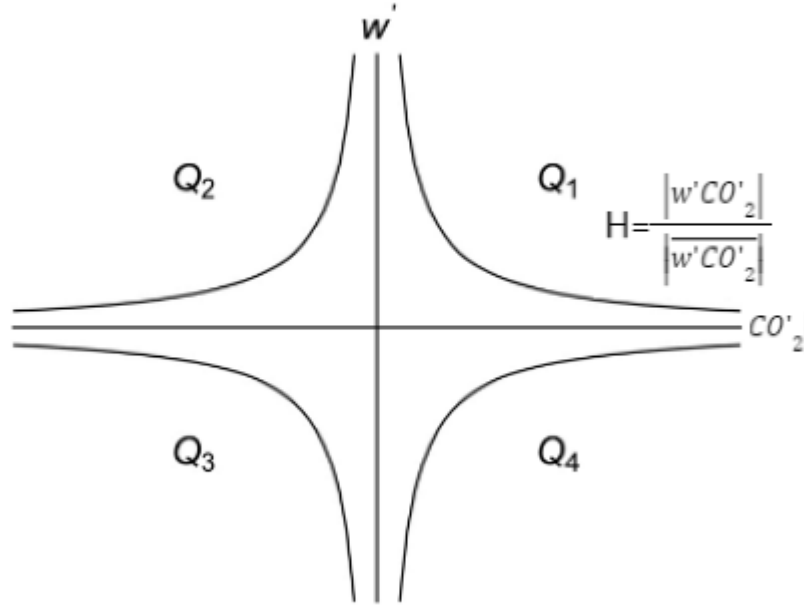
# Datos y Metodología

### 2.1. Metodología de los cuadrantes

La Metodología de los Cuadrantes (MC) fue desarrollada originalmente para entender la generación de ECT (Wallace, 2016). Sin embargo, es posible hacer una analogía metodológica y aplicar el MC para estudiar el transporte turbulento de cualquier escalar, en particular en este trabajo se lo va a emplear para estudiar el transporte de  $CO_2$ . El método consiste en el análisis de las contribuciones de los movimientos verticales perturbados ( $w'$ ) de ascenso y descenso, por separado, al transporte turbulento de las perturbaciones de  $CO_2$  ( $CO'_2$ ). Para ello, el plano definido por las variables  $w'$  y  $CO'_2$  es dividido en 4 cuadrantes ( $Q_i$ , con  $i=1$  a 4), según el signo de  $CO'_2$  y de  $w'$ , tal como muestra la Figura 2.1 y la Tabla 2.1.

Los cuadrantes  $Q_1$  y  $Q_3$ , en los que  $w'$  y  $CO'_2$  tienen el mismo signo ( $\overline{w'CO'_2}$  es positivo), son casos que se corresponden a una superficie actuando como fuente de  $CO_2$ . Estos cuadrantes son los que prevalecen en condiciones nocturnas, debido a que la respiración de las plantas es la que predomina, aportando  $CO_2$  a la atmósfera. Durante la noche el transporte medio de  $CO_2$  es de signo negativo, de manera que las eyecciones ( $w' > 0$ ) transportan perturbaciones positivas de  $CO_2$  y los hundimientos ( $w' < 0$ ) perturbaciones negativas. En cuanto a los cuadrantes  $Q_2$  y  $Q_4$ , corresponden a casos en los que la superficie vegetada actúa como sumidero de  $CO_2$ , pues el flujo  $\overline{w'CO'_2}$  presenta signo negativo. Cuando el flujo medio es negativo, las eyecciones están asociadas a transportes de perturbaciones negativas de  $CO_2$ , y hundimientos están asociados a

perturbaciones positivas de  $CO_2$ . Estos cuadrantes representan a las condiciones diurnas, ya que en estos casos lo que predomina es la fotosíntesis de la vegetación por sobre la respiración.



**Figura 2.1:** Plano definido por las perturbaciones de  $w'$  y  $CO_2'$  divididas en los 4 cuadrantes  $Q_i$  ( $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ ) y las curvas definidas por el agujero hiperbólico  $H$ .

Cuadrante $Q_i$	Signo de $CO_2'$	Signo de $w'$
$Q_1$	$CO_2' > 0$	$w' > 0$
$Q_2$	$CO_2' < 0$	$w' > 0$
$Q_3$	$CO_2' < 0$	$w' < 0$
$Q_4$	$CO_2' > 0$	$w' < 0$

**Tabla 2.1:** Definición de los cuadrantes  $Q_i$  según signos de  $CO_2'$  y  $w'$ .

Se define un agujero hiperbólico ( $H$ ) según la Ecuación 2.1, a fin de cuantificar valores instantáneos de  $w'CO_2'$  asociados a torbellinos de diferentes escalas. Al aumentar el valor de  $H$ , los valores de  $w'CO_2'$  que se cuantifican son cada vez mayores (Figura 2.1), los cuales se asocian a torbellinos más intensos y de mayor escala espacial (Kaimal & Finnigan, 1994). Esto equivale a que al aumentar el valor de  $H$ , aumenta el área del agujero hiperbólico delimitado por las curvas de la Figura 2.1 y por lo tanto se retienen las rondas correspondientes a los torbellinos más energéticos. Siguiendo los análisis de otros autores se utilizaron valores de  $H$  entre 0 y 30

---

para explorar las contribuciones de los cuadrantes en cada caso (Shaw et al., 1983; Curto et al., 2022), sin embargo finalmente se trabajó únicamente con  $H = 0$  para tener en cuenta la totalidad de los transportes.

$$H = \frac{|w'CO'_2|}{\overline{|w'CO'_2|}} \quad (2.1)$$

Las contribuciones de cada cuadrante al transporte vertical turbulento de  $CO_2$  se denominan  $S_{i,H}$ , y se obtienen según las Ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4.

$$S_{i,H} = \frac{\langle w'CO'_2 \rangle_{i,H}}{\overline{w'CO'_2}} \quad (2.2)$$

$$\langle CO'_2 w' \rangle_{i,H} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau w'CO'_2(t) I_{i,H}(t) dt \quad ; \quad \langle CO'_2 w' \rangle_{i,H} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N w'CO'_2 I_i \quad (2.3)$$

$$I_{i,H} = \begin{cases} 1 & \text{si el punto } (w', CO'_2) \text{ pertenece a } Q_i \text{ y } |w'CO'_2| \geq H \overline{|w'CO'_2|} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.4)$$

El promedio condicional que se muestra en la Ecuación 2.3 y que contiene a la función  $I_{i,H}$  (Ecuación 2.4), es el método por el cual se calcula el transporte promedio para cada uno de los cuadrantes, y por fuera del agujero hiperbólico demarcado por la Ecuación 2.1.

Para valores de  $S_{i,H}$  dentro de la región  $H = 0$  se cumple la relación que muestra la Ecuación 2.5, que indica que todas las contribuciones parciales al transporte turbulento suman 1. Se retuvieron sólo aquellas rondas en las que los  $S_{i,H}$  mostraron una variación hiperbólica con  $H$  (Curto, 2020).

$$\sum_{i=1}^4 S_{i,0} = 1 \quad (2.5)$$

---

## 2.2. Estabilidad en la Capa de Superficie

A fin de estudiar cómo cambia la contribución de las eyecciones y hundimientos a los transportes turbulentos de  $CO_2$  según las distintas condiciones atmosféricas, se clasificaron situaciones en función de las condiciones de estabilidad de la CdS. Para esta clasificación se utilizó el parámetro adimensional  $z/L$ , donde  $L$  es la Longitud de Obukhov (Ecuación 2.6). Se puede interpretar a  $L$  físicamente como una magnitud proporcional a la altura sobre la superficie en la cual el término de empuje comienza a dominar sobre la producción mecánica de energía cinética turbulenta. El numerador de la Ecuación 2.6 contiene la variable velocidad de fricción  $u_*$ , dada por la Ecuación 2.7, que representa el transporte vertical turbulento de cantidad de movimiento horizontal. En este trabajo se consideró que  $\theta'$  es aproximadamente igual a  $T'$ , que es una aproximación válida cerca de superficie. En la Ecuación (2.6)  $k$  representa a la constante de von Kármán, a la cual se le asignó un valor de 0.4, acorde a la bibliografía (Stull, 1988).

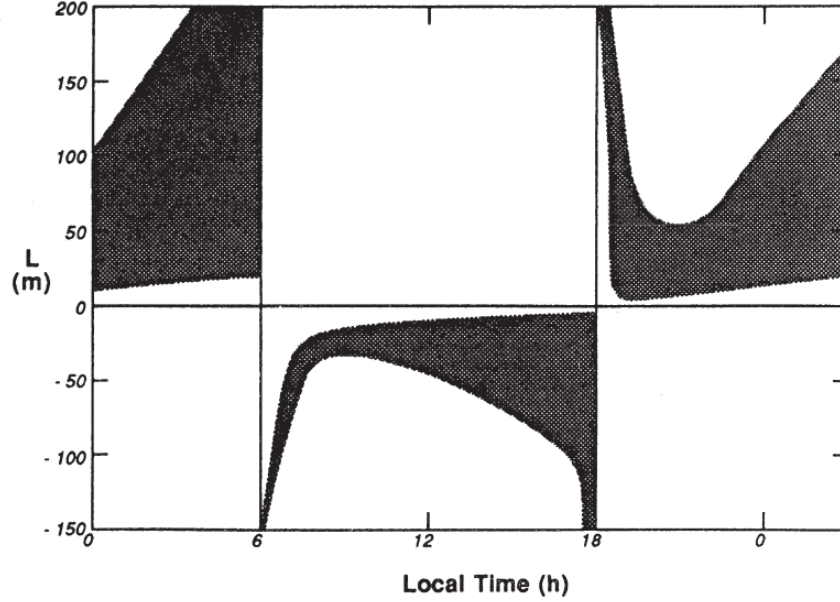
$$L = \frac{-\bar{T}u_*^3}{kgw'T'} \quad (2.6)$$

$$u_*^2 = \left| \overline{u'w'} \right| \quad (2.7)$$

En condiciones inestables los valores de  $z/L$  son negativos, dado que se favorece la producción de energía turbulenta por el término de empuje. Valores de  $z/L < -0.5$  se consideran de libre convección. En condiciones estables los valores de  $z/L$  son positivos y se considera que en condiciones neutrales  $z/L$  son cercanos a 0 (Stull, 1988). En la Figura 2.2 se muestra la evolución de  $L$  a lo largo de un día, según las variaciones típicas de estabilidad (inestabilidad diurna y estabilidad en horarios nocturnos, con estados neutrales en horarios intermedios). En este trabajo se consideró la clasificación de Curto et al. (2022), en la que utiliza 5 categorías de estabilidad utilizando el parámetro adimensional  $z/L$  como se muestra en la Tabla 2.2.

$z/L \leq -0.5$	Fuertemente inestables (convección libre)
$-0.5 < z/L \leq -0.05$	Inestables
$-0.05 < z/L \leq 0.05$	Neutrales
$0.05 < z/L \leq 0.5$	Estables
$z/L > 0.5$	Fuertemente estables

**Tabla 2.2:** Categorías de estabilidad en la Capa de Superficie según valores de  $z/L$ .



**Fig. 5.21** Typical ranges of Obukhov length ( $L$ ) evolution over a diurnal cycle.

**Figura 2.2:** Diagrama de variación de la Longitud de Obukhov ( $L$ ) a lo largo del día. Extraído de Stull 2012, *An introduction to boundary layer meteorology* (Vol. 13), Springer Science and Business Media.

### 2.3. Eficiencia del transporte turbulento de $CO_2$

La eficiencia del transporte de  $CO_2$  puede ser definida como la correlación entre  $CO_2'$  y  $w'$  (Li & Bou-Zeid, 2011), dada por la Ecuación 2.8:

$$r_{wCO_2} = \frac{\overline{w'CO_2'}}{\sigma_{CO_2}\sigma_w} \quad (2.8)$$

donde  $\sigma_w$  y  $\sigma_{CO_2}$  representan los desvíos estándar de las variables  $w$  y  $CO_2$ , respectivamente.

---

La eficiencia se calculó para las rondas categorizadas según los criterios de estabilidad antes mencionados.

## 2.4. Diseño experimental

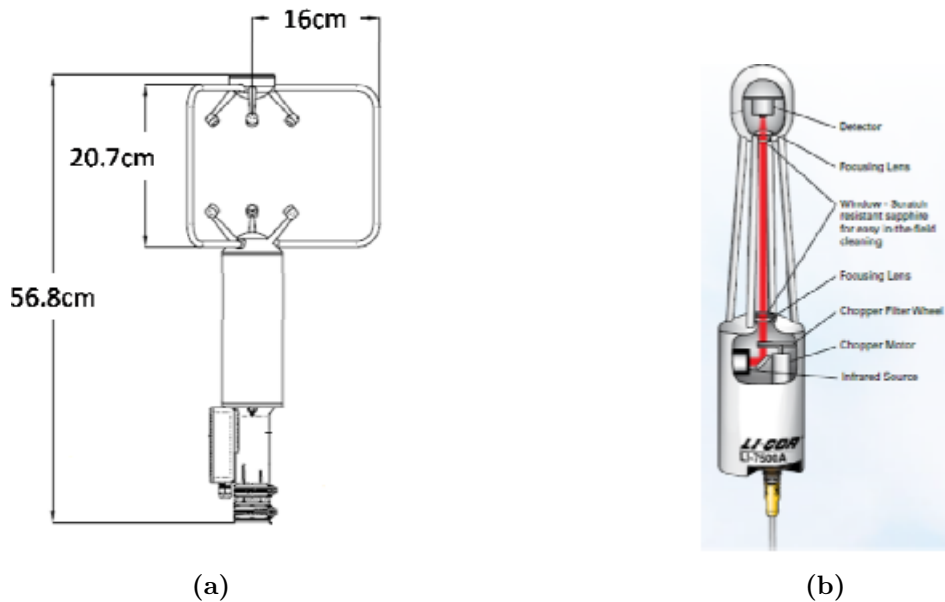
En este estudio, se empleó una base de datos de mediciones micrometeorológicas de velocidad del viento ( $u$ ,  $v$  y  $w$ ), temperatura y concentración dióxido de carbono, tomadas en alta frecuencia (20 Hz), en un campo de cultivo de soja. El sitio experimental se ubicó en la Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP) - EEA INTA de la localidad de Balcarce, ubicada en la provincia de Buenos Aires, Argentina ( $37^{\circ}45'S$ ,  $58^{\circ}18'O$ ) (Figura 2.3). Las mediciones se llevaron a cabo durante la campaña agrícola de verano 2012 - 2013 (desde el 3 de enero hasta el 8 de abril de 2013) en un lote sembrado con un tipo de grano de soja híbrido DM 3810 de crecimiento indeterminado (*Glycine Max*).



**Figura 2.3:** Ubicación del sitio experimental en la Unidad Integrada Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP) - EEA INTA de la localidad de Balcarce, ubicada en la provincia de Buenos Aires, Argentina ( $37^{\circ}45'S$ ,  $58^{\circ}18'O$ ).

Para la adquisición de los datos de alta frecuencia, se utilizaron dos sensores: un anemómetro sónico 3D (RM Young 81000, RM Young, Traverse City, MI, USA) (Figura 2.4 (a)) y un analizador

infrarrojo de gases de camino abierto (IRGA, Li-Cor 7500 A, Li-Cor INC. Lincoln, NE, USA) (Figura 2.4 (b)), instalados en una torre a una altura de 5 metros desde el nivel del suelo. El anemómetro sónico, que mide las tres componentes de la velocidad del viento, funciona emitiendo y recibiendo pulsos ultrasónicos a través de transductores emisores ubicados de a pares enfrentados, creando así tres caminos de medición. En cada uno de estos caminos se calcula el tiempo que tarda en atravesarlo una onda de sonido y en función de ello se puede estimar la velocidad del viento en esa dirección. A su vez, como la velocidad de la onda de sonido depende de la temperatura del aire, se puede estimar una variable denominada Temperatura sónica ( $T_s$ ) que es una buena aproximación a la temperatura real del aire (Cuerva & Sanz-Andrés, 2000).



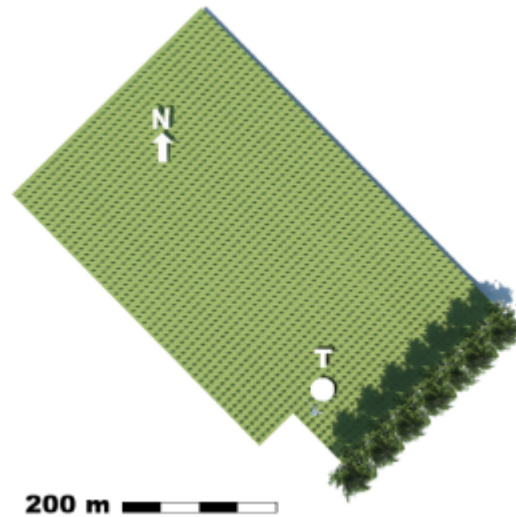
**Figura 2.4:** Diagrama de un anemómetro sónico (Young 81000) (a) y de un analizador de gases infrarrojo de camino abierto (Li-Cor 7500 A) (b).

El analizador de gases de camino abierto, funciona emitiendo un haz de luz infrarrojo y utiliza una serie de filtros para seleccionar la longitud de onda donde se encuentra el máximo de absorción del  $CO_2$ . Al pasar el haz por el camino óptico del instrumento que está en contacto con el medio, es absorbido por el  $CO_2$  siendo su atenuación proporcional a la concentración del gas presente en el volumen de aire, muestreado en ese instante. Si bien no se usaron para esta tesis, el analizador infrarrojo de gases hace también observaciones de la concentración de vapor de agua en el aire.

La torre de medición se instaló en la esquina sur del lote de producción, como muestra la

---

Figura 2.5, de forma de maximizar el fetch en las direcciones de viento predominantes (NO-NE). Se procuró que las mediciones se hicieran dentro de la CdS, ubicando los instrumentos a una altura de al menos 2 a 3 veces la altura del cultivo ( $h$ ), de forma de evitar la Subcapa Rugosa (Stull, 1988). En este experimento  $h$  fue de unos 80 cm en promedio durante la plenitud.



**Figura 2.5:** *Esquema del lote experimental de soja. Hacia el sudeste se muestra la posición de una barrera de árboles. El círculo blanco representa la posición de la torre micrometeorológica (T).*

Por otra parte, se realizaron mediciones en baja frecuencia, utilizando sensores convencionales para registrar la temperatura del aire, la humedad, y la dirección y velocidad del viento a diferentes alturas sobre la cobertura, entre otras observaciones meteorológicas, biológicas y edáficas. Estas observaciones meteorológicas fueron tomadas cada 30 segundos y almacenadas en promedios de 15 minutos, y se realizaron a diferentes alturas: 1.50, 2.10, 2.75, 3.70 y 6.05 m, en una torre de 6.5 m emplazada en el terreno (Figura 2.6). Además, se registraron acumulados diarios de precipitación en la estación INTA-Balcarce, ubicada a 1 km del sitio de estudio.





**Figura 2.6:** Torre micrometeorológica de medición e instrumental complementario situado en el lote experimental, durante la campaña 2012-2013.

El análisis micrometeorológico de los datos se realizó considerando tiempos de promedio de 30 minutos. Durante ese período se supuso válida la Hipótesis de Taylor, que postula que en ese lapso de tiempo las propiedades de los torbellinos turbulentos no varían (Stull, 1988). De esta manera la hipótesis sólo es válida para torbellinos que evolucionan en una escala temporal mayor al tiempo de promedio.

## 2.5. Preparación y corrección de datos

Se plantearon suposiciones para el trabajo en la CdS. Entre ellas se consideró la terna micrometeorológica, lo que implica que el eje  $X$  se alinea con el viento horizontal medio, de forma que  $\bar{v}$  se anula. A su vez se consideró válida la condición de homogeneidad horizontal, que el terreno no tiene pendiente y de que los movimientos verticales medios son nulos ( $\bar{w} = 0$ ) (Stull, 1988).

---

El anemómetro sónico estaba configurado para medir la intensidad del vector viento en el espacio tridimensional ( $U$ ) y sus ángulos azimutal ( $\psi$ ) y de elevación ( $\alpha$ ), por lo que a partir de la intensidad del viento se calcularon las componentes  $u$  y  $w$  para cada ronda y sus componentes medias, utilizando las Ecuaciones 2.9.

$$\begin{aligned} u &= U \cos \alpha & ; & \quad w = U \sin \alpha \\ \bar{u} &= \overline{U \cos \alpha} & ; & \quad \bar{w} = \overline{U \sin \alpha} \end{aligned} \tag{2.9}$$

Debido a que la posición del norte magnético no coincide exactamente con el norte geográfico, se realizó una corrección a los datos de viento horizontal, por desviación entre ellos. Se utilizó un valor de corrección de  $-9.17^\circ$ , la cual se consideró constante para todo el período, ya que para esas fechas las variaciones fueron pequeñas (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc>). Además, se utilizaron límites para el ángulo acimutal medio ( $\bar{\psi}$ ), de entre  $3/4\pi$  y  $5/4\pi$ , para trabajar con las rondas en las que el viento era proveniente del sector NO-NE.

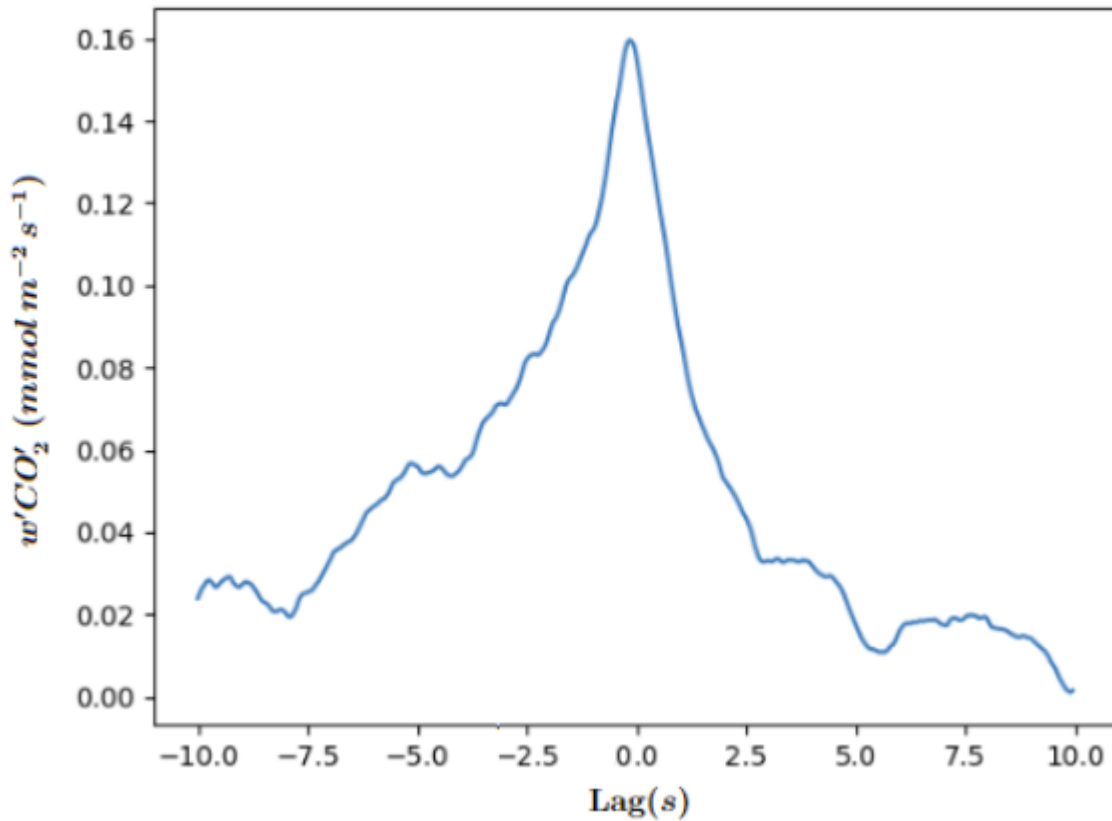
Se calcularon las perturbaciones de las diferentes componentes del viento  $u$ , y  $w$ , así como de la concentración de  $CO_2$  como indican las Ecuaciones 2.10:

$$\begin{aligned} u' &= u - \bar{u} \\ w' &= w - \bar{w} \\ CO_2' &= CO_2 - \overline{CO_2} \end{aligned} \tag{2.10}$$

donde  $u'$  y  $w'$  son las velocidades perturbadas del viento horizontal y vertical respectivamente y  $CO_2'$  es la perturbación de la concentración de  $CO_2$ . El promedio para cada una de las variables ( $\bar{u}$ ,  $\bar{w}$  y  $\overline{CO_2}$ ) fue calculado sobre cada ronda de media hora de duración.

Para calcular los transportes verticales fue necesario previamente hacer una corrección debido al retraso entre la señal de  $CO_2'$  y la de  $w'$ , dado el tiempo que le lleva al torbellino recorrer el camino entre el analizador de gases y el anemómetro sónico. Esta corrección se realizó para cada una de las rondas calculando el valor absoluto de la correlación entre  $CO_2'$  y  $w'$  para diferentes retrasos, y hallando su valor máximo (Aubinet et al., 1999). La Figura 2.7 muestra como ejemplo la correlación entre  $CO_2'$  y  $w'$  en función del retraso para un período de media hora. Como los flujos pueden tener tanto valores positivos como negativos, se trabajó con el valor absoluto de

la correlación entre ambas variables. Para buscar el valor máximo se uso una ventana de  $\pm 10$  segundos. Se consideraron también valores de retrasos negativos por la posibilidad de que un remolino pase primero por cualquiera de los 2 sensores. Ante la necesidad de optimizar el tiempo de cálculo debido al procesamiento de una gran cantidad de datos, se testearon varias funciones de diferentes librerías de Python (<https://www.python.org/>). El mejor tiempo de respuesta se obtuvo utilizando la función “Correlate” de la librería “Scipy”. Los retrasos hallados para cada una de las rondas se encontraron entre -5 s y 5 s.



**Figura 2.7:** Correlación entre  $w'$  y  $CO_2'$  para diferentes lags, para una serie de media hora de duración.

Con los valores perturbados de las variables, se calcularon los transportes verticales turbulentos instantáneos de  $CO_2$  ( $w'CO_2'$ ), de cantidad de movimiento ( $w'u'$ ) y sus promedios ( $\overline{w'CO_2'}$  y  $\overline{w'u'}$ ), para cada ronda de media hora, según las Ecuaciones 2.11 y 2.12.

---


$$w'u' = w' \cdot u' \quad ; \quad w'CO'_2 = w' \cdot CO'_2 \quad (2.11)$$

$$\overline{w'u'} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N w'u'_j \quad ; \quad \overline{w'CO'_2} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N w'CO'_{2j} \quad (2.12)$$

### 2.5.1. Control de calidad de los datos

La metodología utilizada para la obtención de la información requiere, debido a la complejidad de los instrumentos y los cálculos, que se lleven adelante tests de control de calidad que garanticen tanto la calidad de la información como el cumplimiento de las hipótesis planteadas. Para este control de calidad se utilizó el software TK3.11 (por sus siglas Turbulence Knight 3) desarrollado por el Departamento de Micrometeorología de la Universidad de Bayreuth, Alemania (Mauder & Foken, 2015). Las dos suposiciones que el software testea son: las condiciones de estacionariedad de la atmósfera en el tiempo de promedio planteado, y la condición de contar con turbulencia bien desarrollada. El Test de Estacionariedad consiste en dividir las series de datos en 6 intervalos temporales y calcular la covarianza para cada uno de ellos. Luego categoriza según la Tabla 2.3, evaluando la diferencia porcentual entre la covarianza de cada intervalo y la covarianza de la serie en el período de media hora (Foken, 1999).

Clase	Rango
1	0 – 15 %
2	16 – 30 %
3	31 – 50 %
4	51 – 75 %
5	76 – 100 %
6	101 – 250 %
7	251 – 500 %
8	501 – 1000 %
9	> 1000 %

**Tabla 2.3:** *Tabla de categorías de estacionariedad según Foken (1999), en función de las diferencias porcentuales entre la varianza de cada período de 5 min con la varianza del período completo.*

Por otra parte, para evaluar el desarrollo de la turbulencia, se utiliza el Test de Características Integrales de la Turbulencia, o ITC por sus siglas en ingles (Integral Turbulence Characteristics Test). El ITC es un test de similaridad que, para escalares basa en que el cociente entre el desvío

---

estándar de una variable turbulenta  $\sigma_\chi$  y su flujo turbulento es aproximadamente constante, o es una función dependiente de la estabilidad. Estas funciones tienen la forma general que se muestra en la Ecuación 2.13:

$$\frac{\sigma_\chi}{\chi_*} = C_1 \cdot \left(\frac{z}{L}\right)^{C_2} \quad (2.13)$$

donde el desvío estándar es normalizado por el parámetro dinámico característico ( $\chi_*$ ). Las constantes  $C_1$  y  $C_2$  están tabuladas, y dependen de la estabilidad. La diferencia porcentual entre esta función y los valores del cociente calculados con los desvíos observados de cada serie es categorizada según la Tabla 2.4 (Foken, 1999):

Clase	Rango
1	0 – 15 %
2	16 – 30 %
3	31 – 50 %
4	51 – 75 %
5	76 – 100 %
6	101 – 250 %
7	251 – 500 %
8	501 – 1000 %
9	> 1000 %

**Tabla 2.4:** *Tabla de categorías del Test de Características Generales de la Turbulencia según Foken (1999).*

El mayor de los índices resultados de ambos test, es el utilizado para evaluar la ronda de datos. En este trabajo, acorde a las recomendaciones de la documentación del TK3, se decidió trabajar únicamente con las rondas que obtuvieron un índice por debajo de 6 (Mauder & Foken, 2015).

## Capítulo 3

# Resultados

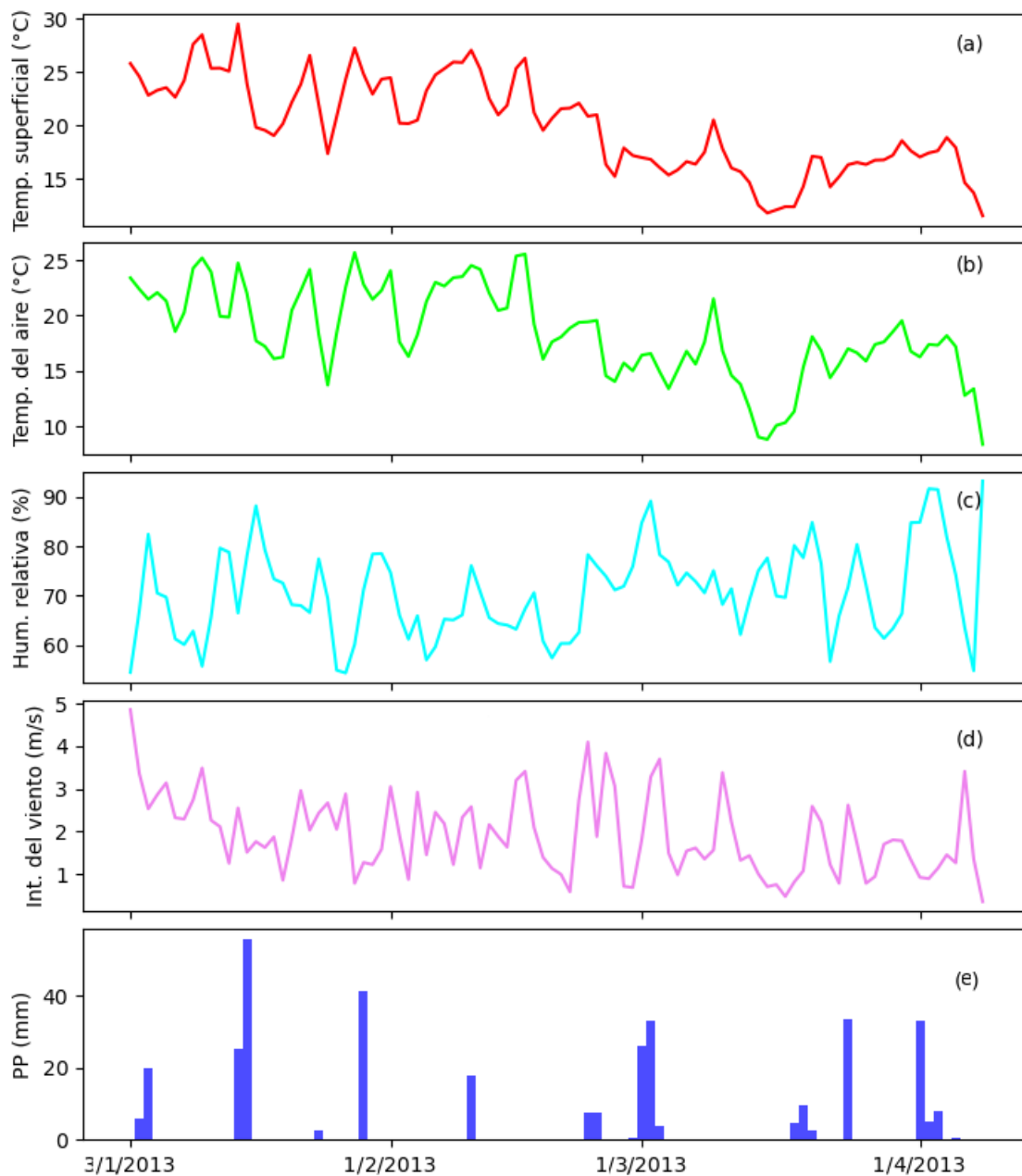
### 3.1. Características meteorológicas generales de la campaña de medición

Para la caracterización general de las variables meteorológicas en el sitio experimental a lo largo del período de estudio se utilizó la climatología de la estación INTA Balcarce para el período 1991-2015. Se compararon los promedios mensuales de la temperatura, la humedad relativa, la precipitación y la intensidad del viento para el período de estudio con la climatología (Tabla 3.1). Para los meses de enero y febrero se observaron temperaturas medias menores a la climatología, con diferencias de entre 1 y 2°C aproximadamente. Para el mes de marzo estas diferencias se incrementan, observándose en promedio valores de casi 4°C por debajo del valor climatológico. En cuanto a la humedad relativa, se halló la mayor diferencia para el mes de febrero, siendo 6 % por debajo del promedio climatológico, mientras que los meses de enero y marzo no mostraron grandes diferencias con respecto a la climatología. En el caso de la precipitación, en el mes de enero se registraron acumulados 15.2 mm por encima de la media, mientras que en febrero y marzo los valores fueron deficitarios con respecto a la climatología, observándose diferencias de 42.1 mm y 29.8 mm respectivamente. Por último, la intensidad del viento tanto en el mes de enero como en marzo registraron diferencias de alrededor de 1 m/s por debajo del promedio climatológico.

**Tabla 3.1:** *Promedios mensuales de temperatura, humedad relativa, acumulados de precipitación e intensidad media del viento medido a 6 m de altura para los meses de enero, febrero y marzo de 2013 en el sitio de observación y para la estación INTA-Balcarce en el período 1991-2015.*

Variable	Mes	Observado	Climatología
Temperatura	Enero	20.7°C	22.1°C
	Febrero	19.9°C	20.8°C
	Marzo	15.4°C	19.2°C
Humedad relativa	Enero	70.5 %	69.3 %
	Febrero	66.3 %	73.9 %
	Marzo	72.1 %	75.3 %
PP mensual	Enero	119.1 mm	103.9 mm
	Febrero	35.7 mm	77.8 mm
	Marzo	50.9 mm	80.7 mm
Int. del viento	Enero	1.9 m/s	3.2 m/s
	Febrero	1.6 m/s	2.6 m/s
	Marzo	1.2 m/s	2.5 m/s

Para una caracterización más detallada del período de estudio, se calcularon promedios diarios de la temperatura del suelo y del aire, la humedad relativa y la intensidad y dirección del viento a 6 m, utilizando los datos medidos en el sitio con sensores de baja frecuencia, a lo largo de toda la campaña. A su vez se calcularon los acumulados diarios de precipitación utilizando las observaciones de la estación INTA-Balcarce. En las Figuras 3.1 (a) y (b) se muestran los valores medios de la temperatura del aire y del suelo respectivamente, en las cuales se observa en líneas generales, una tendencia a la baja a lo largo de toda la campaña, acorde a lo esperado por el ciclo anual de radiación solar. Para la temperatura media diaria del suelo el máximo fue de 29.5°C y se alcanzó el día 15 de enero, mientras que para el del aire fue de 25.7°C y se alcanzó el día 28 de enero. El comportamiento de la serie de la intensidad del viento (Figura 3.1 (d)) también tiene una tendencia negativa a lo largo del periodo, hallándose el máximo valor promedio de 4.9 m/s el día 3 de enero. En cuanto a la humedad relativa (Figura 3.1 (c)) se observa un ciclo diario siguiendo a la serie de temperatura, oscilando entre 55 % y 95 %. A lo largo de estos 3 meses de estudio, se registraron 40 días con precipitaciones. El mes con más días de precipitación registrada fue marzo (Figura 3.1 (e)), con 23 días, mientras que el mes con el mayor acumulado de precipitación fue enero, con 119.1 mm. El acumulado máximo de todo el período se observó el 16 de enero, día en el que la precipitación fue de 48 mm.

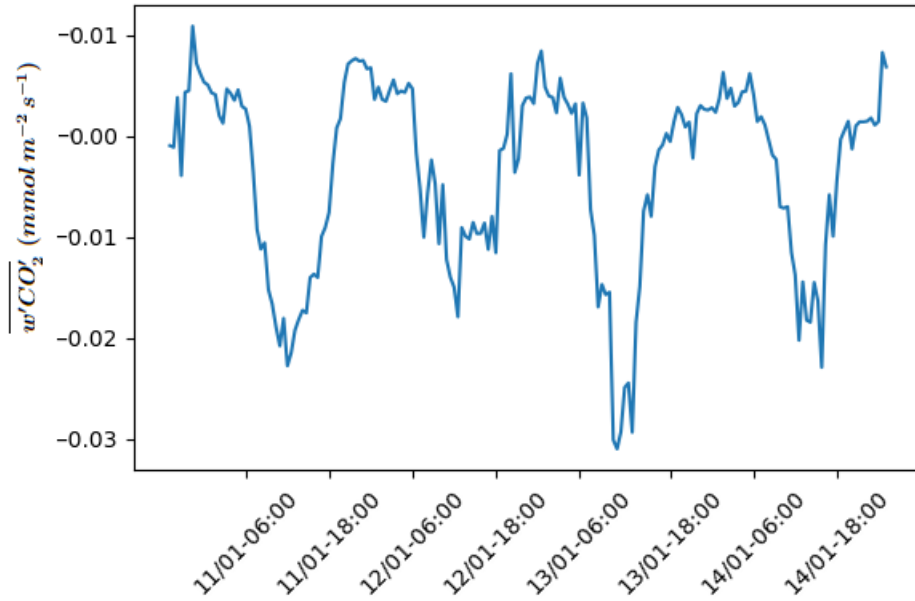


**Figura 3.1:** Promedios diarios de la temperatura superficial del suelo (a), la temperatura del aire (b), la humedad relativa (c) y la intensidad del viento (d), medidas a 6m en en el sitio de observación, y la precipitación diaria acumulada (PP) en la estación INTA-Balcarce a 1 km del sitio de observación (e).



### 3.2. Comportamiento general del transporte $w'CO_2'$

Durante el período de estudio, se calcularon los valores medios del transporte  $w'CO_2'$  para cada ronda de media hora de duración. Estos resultados presentan variaciones diarias siguiendo el ciclo diario de la radiación solar, con máximos en horarios nocturnos y mínimos en horarios diurnos. En la Figura 3.2 se muestra, a modo de ejemplo, el transporte medio de  $CO_2'$  para un período de 78 horas, que va desde el 10 de enero a las 19 h, hasta el 15 de enero a las 01 h. En esta escala temporal se puede observar en detalle las variaciones diarias del transporte, con máximos en horarios nocturnos y mínimos en horarios diurnos. Los transportes negativos más intensos se encuentran aproximadamente entre las 06 h y las 18 h. Durante estas horas prima el proceso de fotosíntesis por sobre la respiración, haciendo que las plantas actúen como sumidero de  $CO_2$ , y por lo tanto los ascensos ( $w > 0$ ) transporten perturbaciones negativas del mismo. Por otra parte, los transportes positivos más intensos se dan en los horarios nocturnos, cuando las plantas actúan como fuente de  $CO_2$ , por la emisión del proceso de respiración. Es por eso que en horas nocturnas los ascensos transportan perturbaciones positivas de  $CO_2$ , mientras que los descensos transportan perturbaciones negativas, con concentraciones más bajas por encima de la vegetación hacia la superficie. En las horas de transición entre las fases diurnas y nocturnas, hay instantes en los que los transportes turbulentos son prácticamente nulos.



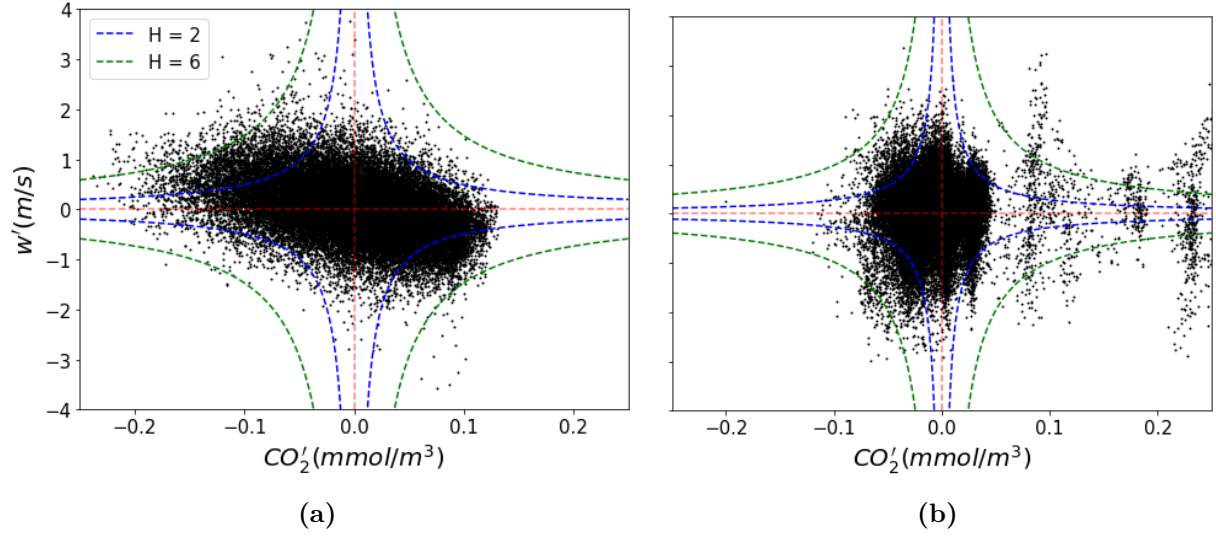
**Figura 3.2:** Transporte vertical de  $CO_2'$  medio (promedio cada media hora) para el período entre el 10/01/2013 a las 19 h hasta el 15/01/2013 a la 01 h.

---

### 3.3. Identificación de CS con el Método de los Cuadrantes

De un total de 4209 rondas de media hora de duración con mediciones micrometeorológicas, solo 1022 son las que tienen direcciones de viento medio del sector NO-NE (28 % de las rondas), que fueron las seleccionadas para el análisis al asegurar un footprint dentro del área de estudio (Sección 2.4). Con estas rondas se realizó un análisis de calidad de los datos, calculado con el programa TK3 (Sección 2.5), donde se descartaron los datos de mala calidad según la clasificación propuesta por Foken (1999). De las 1022 rondas, 786 son las que cumplen con la clasificación, y fueron con las que se trabajó para el posterior análisis.

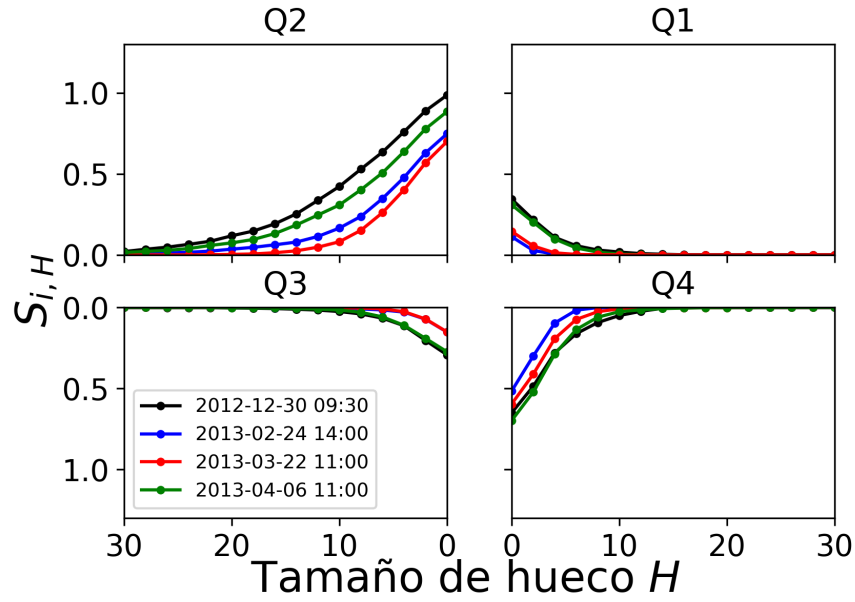
De las 786 rondas, se identificaron 634 con la presencia de CS a través del MC. Esto corresponde a un 62 % del total de rondas con la dirección del viento NO-NE, con presencia de turbulencia organizada. En la Figura 3.3 se muestran los valores medidos a una frecuencia de 20 Hz de  $w'$  y  $CO_2'$ , para dos períodos distintos de media hora de duración. En el caso de la Figura 3.3 (a) se trata de una ronda donde se halló la presencia de CS, en la que se observa que los valores se encuentran alineados con preponderancia de dos cuadrantes. En este caso  $Q_2$  representan a las eyecciones ( $w' > 0$ ), y  $Q_4$  a los hundimientos ( $w' < 0$ ), mientras que  $Q_1$  y  $Q_3$  son los cuadrantes indirectos, y tienen valores más cercanos al 0. Este es el comportamiento típico de las CS, en las que la turbulencia se organiza en los cuadrantes que contribuyen directamente al flujo turbulento, y los torbellinos con sus movimientos de eyecciones ( $w' > 0$ ) y hundimientos ( $w' < 0$ ), son los encargados del transporte vertical de propiedades. Como se trata de una ronda diurna, las eyecciones están asociadas a transportes de  $CO_2$  negativos, mientras que los hundimientos se asocian a transportes de  $CO_2$  positivos. En el caso de la Figura 3.3 (b) se muestra una ronda en la cual no se encuentra presencia de CS, y que presenta un movimiento turbulento, aleatorio y sin organización. Se puede ver que en este caso los puntos no se encuentran alineados en dos cuadrantes, si no que hay un gran cúmulo alrededor del origen de coordenadas, con algunos valores dispersos más alejados. En un caso como este  $\overline{w'CO_2'}$  es prácticamente nulo. A su vez, se puede ver que, al agrandar el tamaño de hueco  $H$ , cada vez menos puntos quedan por fuera del área de exclusión. Por ejemplo, en la Figura 3.3 (a), se puede ver cómo para  $H = 2$  (azul) la cantidad de puntos fuera del área de exclusión es menor que para  $H = 6$  (verde). Estos puntos son los de mayor contribución al transporte turbulento de  $CO_2$  y, a medida que se agranda  $H$ , son cada vez menos los que contribuyen en cada cuadrante a cada  $S_{i,H}$ .



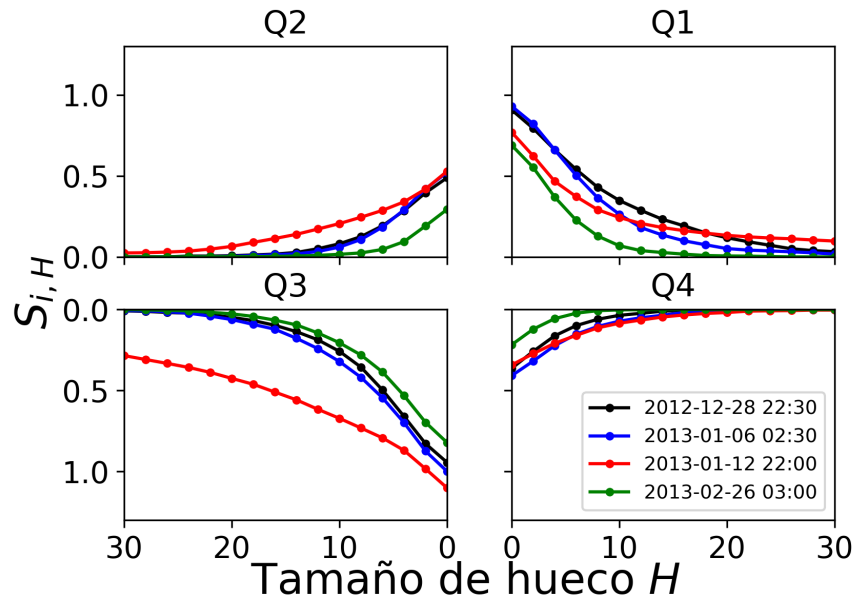
**Figura 3.3:** Valores instantáneos de  $w'$  y  $CO_2'$  para un período de media hora, correspondiente al 22 de marzo del 2013 a las 11:00 hs, con presencia de CS (a), y correspondiente al 17 de febrero del 2013 a las 16:00 hs, sin presencia de CS (b). También se muestran curvas asociadas al agujero hiperbólico  $H$ , para tamaños de  $H = 2$  (azul) y  $H = 6$  (verde).

En las Figuras 3.4 y 3.5 se grafican algunas rondas con presencia de CS, en las que se observan los aportes de los  $S_{i,H}$  para diferentes tamaños de  $H$ . Se presentan sus valores absolutos, pero debe tenerse en cuenta que  $S_{1,H}$  y  $S_{3,H}$  tienen signo positivo en las rondas nocturnas y negativo para las rondas diurnas, mientras que en  $S_{2,H}$  y  $S_{4,H}$  sucede lo contrario, son positivos en las rondas diurnas y negativo en las rondas nocturnas.

En horarios diurnos (Figura 3.4), los cuadrantes que más aportan al transporte turbulento son  $Q_2$  y  $Q_4$ . Mientras que en este caso los transportes contra-gradiente son los correspondientes a los cuadrantes  $Q_1$  y  $Q_3$ , y por lo tanto son los que aportan en menor cantidad al transporte medio. Los transportes contra-gradiente pueden deberse a efectos no locales (Eder et al., 2013). Durante el día, las contribuciones del cuadrante  $Q_2$  ( $S_{2,0}$ ) son cercanas a 1 para  $H = 0$ , superando así en magnitud a los de  $Q_4$  ( $S_{4,0}$ ), que rondan los valores de 0.7. Es decir que las eyecciones están aportando en mayor proporción a los transportes verticales turbulentos de  $CO_2$  que los hundimientos. Asimismo, los valores de  $S_{4,H}$  decaen más rápido que los de  $S_{2,H}$ . Para  $H = 4$  todos los  $S_{4,4}$  se encuentran por debajo de 0.3, mientras que para ese mismo valor de  $H$ ,  $S_{2,4}$  se encuentran por encima. Para  $H = 10$ , los valores de  $S_{2,H}$  se encuentran entre 0.1 y 0.4, mientras que los valores de  $S_{4,H}$  son todos menores a 0.1. Estos resultados sugieren que son las eyecciones las que más aportan al transporte turbulento de  $CO_2$ , incluso en los torbellinos más grandes,



**Figura 3.4:** Contribuciones  $S_{i,H}$  para los cuadrantes  $Q_i$  para 4 rondas diurnas en función del tamaño de  $H$ .



**Figura 3.5:** Contribuciones  $S_{i,H}$  para los cuadrantes  $Q_i$  para 4 rondas nocturnas en función del tamaño de  $H$ .

---

representados por los casos en los que los apartamientos del promedio  $\overline{w'CO_2'}$  son mayores. A mayor valor de  $H$ , menor es la cantidad de valores instantáneos de  $w'CO_2'$  que están por encima del producto entre  $H$  y  $\overline{w'CO_2'}$  y, por lo tanto, los valores de  $S_{i,H}$  son menores. Este decaimiento con  $H$  se observa en las Figuras 3.4 y 3.5, y es característico de las CS, dado que  $\overline{w'CO_2'}$  no se anula en presencia de este tipo de estructuras.

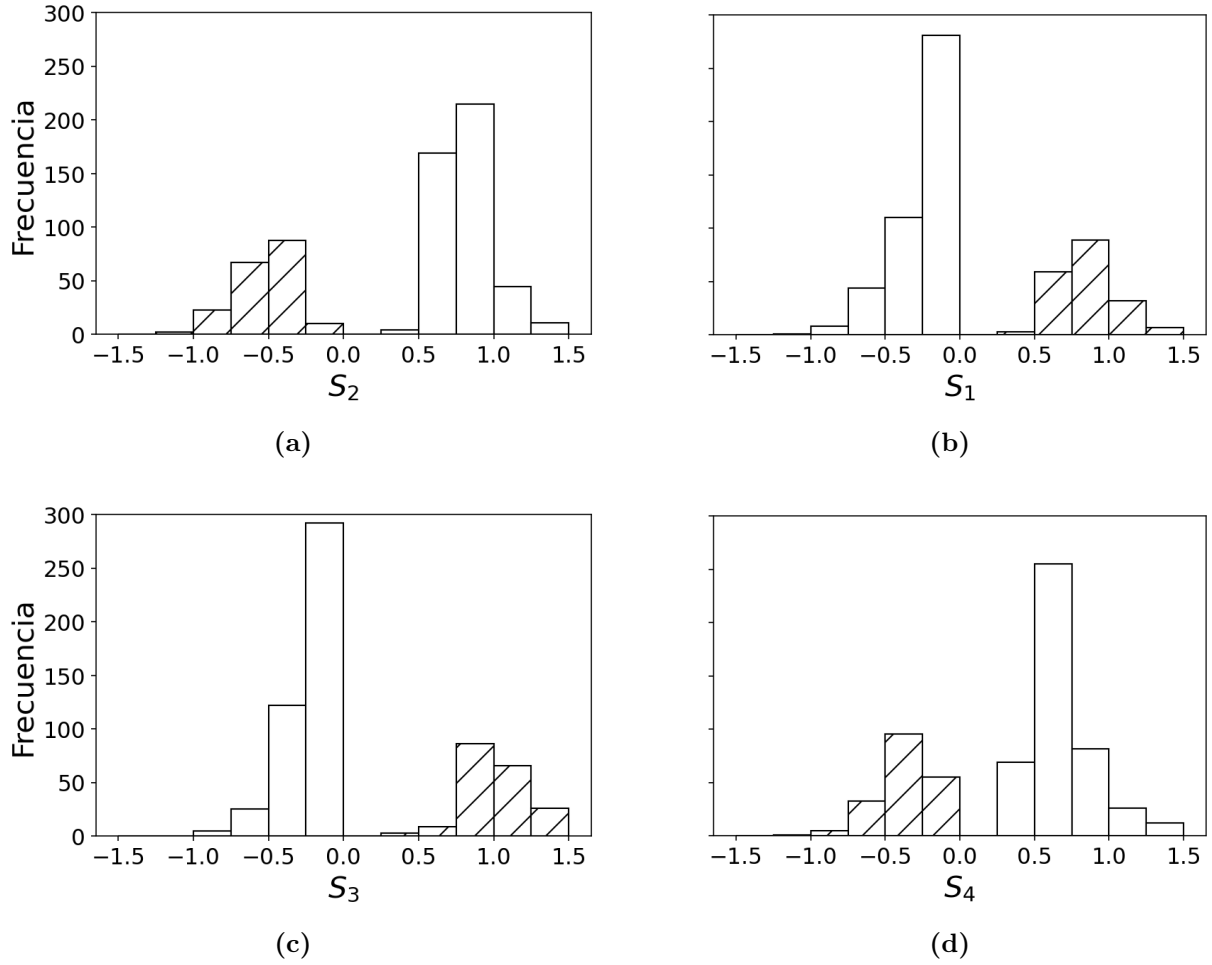
En los casos nocturnos (Figura 3.5) la superficie actúa como fuente de  $CO_2$ . Los aportes de los cuadrantes  $Q_1$  y  $Q_3$  ( $S_{1,H}$  y  $S_{3,H}$ ), que corresponden a los transportes de valores positivos, son los que muestran valores más altos, por lo tanto son los que más aportan al transporte vertical turbulento, acorde a lo esperado según el gradiente vertical de  $CO_2$  en condiciones nocturnas. Se puede ver también que los cuadrantes  $Q_2$  y  $Q_4$  tienen valores menores, y todas las rondas presentan valores por debajo de 0.5 para  $H = 0$ . Estos cuadrantes son los que explican los movimientos contra-gradiente en las rondas nocturnas. En estos casos nocturnos las contribuciones de las eyecciones ( $S_{1,0}$ ) se encuentran entre 0.7 y 1 para  $H = 0$ , mientras que las contribuciones de los hundimientos ( $S_{3,0}$ ) varían entre valores mayores a 0.75 (Figura 3.5), es decir que son los hundimientos los que aportan levemente en mayor proporción al transporte turbulento de  $CO_2$ . Para  $H = 4$  los valores de  $S_{1,4}$  varían entre 0.4 y 0.7, mientras que  $S_{3,4}$  entre 0.5 y 0.9. Para  $H = 10$  se encontraron valores de  $S_{1,10}$  entre 0.05 y 0.35, y para  $S_{3,10}$  de entre 0.2 y 0.67. Eso muestra que los hundimientos dominan el transporte también para los torbellinos de mayor tamaño. En particular la ronda del 12 de enero a las 22:00 h es la que muestra el comportamiento más diferenciado del resto en cuanto al decaimiento con  $H$ . Esto es más notorio en el cuadrante  $Q_3$ , donde el  $S_{3,H}$  presenta un decaimiento con  $H$  mucho menos marcado. Para este caso se encontró que el valor de  $z/L$  fue de 0.77, haciéndola comparativamente más estable que el resto de las rondas que se muestran en la Figura 3.5. Es decir, el empuje negativo se hace mayor y, la turbulencia mecánica, comparativamente menor. Al aumentar la estabilidad, la turbulencia se vuelve menos eficiente para transportar  $CO_2$  (Sección 3.5). Esto puede significar CS menos desarrolladas, lo que hace que el comportamiento de los  $S_{i,H}$  a medida que aumenta el valor de  $H$  se aparte del resto de las rondas, en las cuales se observa el comportamiento típico de las CS. Por otro lado la clasificación de calidad de Foken (1999) indica que es una ronda con menor calidad que el resto de las rondas.

En el siguiente análisis se consideró  $H = 0$  para poder trabajar con todos los transportes, es decir, se trabajará solo con  $S_{i,0}$ . Para mayor simplicidad, desde ahora nos vamos a referir a los  $S_{i,0}$  como  $S_i$ , omitiendo el subíndice correspondiente al valor de  $H$ .

---

En la Figura 3.6, se presentan los histogramas de frecuencias para cada uno de los  $S_i$ . La mayor frecuencia para  $S_1$  y  $S_3$  se encuentra en valores entre -0.25 y 0, mientras que para  $S_2$  los valores más frecuentes están entre 0.75 y 1, y en el caso de  $S_4$  las mayores frecuencias se encuentran entre 0.5 y 0.75. Esta diferencia de signo entre los valores más frecuentes de  $S_2$  y  $S_4$ , y los de  $S_1$  y  $S_3$ , se debe a que las rondas diurnas (barras lisas en la Figura 3.6) son las que cumplieron, en su mayoría, las condiciones mencionadas en la Sección 2.1 para ser consideradas con presencia de CS. Por esa razón se trabajó con un número mayor de rondas diurnas que nocturnas. Como se mencionó previamente,  $\overline{w'CO'_2}$  es negativo durante el día, y los cuadrantes que contribuyen con el mismo signo del transporte medio en condiciones diurnas son  $Q_2$  y  $Q_4$  y, por lo tanto,  $S_2$  y  $S_4$  tienen valores positivos. Las contribuciones de los cuadrantes  $Q_1$  y  $Q_3$  son transportes contra-gradiente en condiciones diurnas, son de signo opuesto a  $\overline{w'CO'_2}$ , y por lo tanto  $S_1$  y  $S_3$  son negativos durante el día y cercanos a 0. En el régimen diurno se aprecia que  $S_2$  tiene un máximo absoluto para valores entre 0.75 y 1 de más de 200 rondas, y un segundo rango más frecuente entre 0.5 y 0.75 de más de 150 rondas. Mientras que para  $S_4$  se encuentra un máximo entre 0.5 y 0.75 de más de 200 rondas, y el resto de los rangos tienen frecuencias de menos de 100 rondas. Esto implica que las eyecciones ( $S_2$ ) son las que más aportan al transporte de  $CO'_2$  en horarios diurnos, mostrando mayores frecuencias para valores más altos.

De forma inversa a las condiciones diurnas, en los casos nocturnos (barras en sombreado en la Figura 3.6) las mayores frecuencias de los  $S_2$  y  $S_4$  se encuentran en valores negativos y cercanos a 0, ya que contribuyen de forma opuesta al transporte medio. Mientras que las mayores frecuencias para los  $S_1$  y  $S_3$  están entre 0.75 y 1, que durante la noche tienen el mismo signo que  $\overline{w'CO'_2}$ . Por lo tanto, para analizar el régimen nocturno, se tienen en cuenta solo los valores positivos de  $S_1$  y  $S_3$ . Dentro de estos valores se observa un máximo para  $S_1$  entre 0.75 y 1 de cerca de 100 rondas, y un segundo rango más frecuente entre 0.5 y 0.75 de 70 rondas. Para  $S_3$  se observa el máximo absoluto entre 0.75 y 1 con valores un poco menores a las 100 rondas, y un segundo rango más frecuente entre 1 y 1.25 con cerca de 70 rondas. Esto quiere decir que en los hundimientos ( $S_3$ ) son más frecuentes valores más altos que en las eyecciones, lo que implica que en horarios nocturnos el aporte al transporte por parte de los hundimientos es mayor.



**Figura 3.6:** Histogramas de frecuencia de  $S_2$  (a),  $S_1$  (b),  $S_3$  (c) y  $S_4$  (d), para todas las rondas de media hora. Las barras lisas corresponden a rondas diurnas y las barras con sombreado corresponden a rondas nocturnas.

### 3.4. Estabilidad

Como se describió en la Sección 2.1 las rondas se dividieron según su estabilidad, utilizando como criterio valores de  $z/L$ . De esta manera, las rondas quedaron agrupadas en las categorías: Fuertemente Inestable (FI), Inestables (I), Neutrales (N), Estables (E) y Fuertemente Estables (FE). De un total de 635 rondas, la mayor cantidad de casos correspondieron a la categoría N, con 214 rondas, un 37 % del total. La segunda condición de estabilidad más frecuente fue I, con 197 rondas (31 %). A su vez, 104 rondas (16 %) correspondieron a la categoría E, 89 (14 %) a FI y solo 35 (6 %) dentro de la categoría FE. La predominancia de rondas con condiciones I y FI frente a las E y FE, se debe a que estas últimas fueron mayormente descartadas al aplicar los test

---

de Características Generales de la Turbulencia y de Estacionariedad de la clasificación de Foken & Wichura (1996). Por otro lado mediante el MC se descartaron muchas rondas E y FE que no contaban con la presencia de CS. Es decir que, además de menor desarrollo de la turbulencia, también se encontró que ésta tiene menor capacidad de organizarse en CS bajo condiciones estables. Finalmente, las condiciones FI y FE son más difíciles de alcanzar en comparación con el resto de las condiciones más cerca de la neutralidad, por eso la marcada minoría de rondas dentro de estas categorías. Es necesario remarcar que al contar con muy pocos casos en la categoría FE, esta no se verá completamente representada.

En la Figura 3.7 se muestra una representación del tipo boxplot. En los límites de la “caja” está representando los valores de 1<sup>er</sup> y 3<sup>er</sup> cuartil ( $q_1$  y  $q_3$ ), la mediana con una línea roja y los “bigotes” representan el extremo inferior ( $l_i$ ) y superior ( $l_s$ ) no atípicos, de los  $S_i$  para cada una de las condiciones de estabilidad. El extremo  $l_i$  está calculado como  $q_1$  menos 1.5 veces el intervalo inter-cuartil (IQR), mientras que  $l_s$  está calculado como  $q_3$  más 1.5 veces IQR. Para condiciones E y FE los valores de  $S_1$  y  $S_3$  se encuentra entre 0.4 y 1.5, y los de  $S_2$  y  $S_4$  son negativos y cercanos a 0. Como se mencionó previamente, en esas condiciones  $\overline{w'CO_2}$  es positivo, y es por ello que las mayores contribuciones al transporte corresponden a los cuadrantes  $S_1$  y  $S_3$ . Por el enfriamiento radiativo nocturno de la superficie, suele generarse una inversión térmica que estabiliza los primeros metros de la CLA. Es por esto que dentro de estas categorías de estabilidad estables se cuentan mayoría de rondas nocturnas.

En la Tabla 3.2 se muestran algunos estadísticos correspondientes a la Figura 3.7 para  $S_1$  y  $S_3$ . Los hundimientos ( $S_3$ ) se diferencian de las eyecciones ( $S_1$ ) en los casos E mostrando una mediana de 0.94, mientras que para  $S_1$  se encuentra en 0.74 (Tabla 3.2). Esto implica que los hundimientos contribuyen más frecuentemente con valores más altos que las eyecciones, y por lo tanto son los que más aportan al transporte de  $CO_2$  en condiciones E. Hacia condiciones más estables, para las rondas FE se observa una leve diferencia, mostrando nuevamente que son los hundimientos son los que más contribuyen al transporte turbulento. La mediana de  $S_3$  en los casos FE varía muy poco con respecto a los casos E, hallándose un valor de 0.96, mientras que la de  $S_1$  aumenta con respecto a las E, hacia un valor de 0.88 (Tabla 3.2). Es decir que la diferencia de aporte entre hundimientos y eyecciones al transporte de  $CO_2$  se hace menor.

Bajo condiciones I y FI, la mayoría de las rondas son diurnas, con  $\overline{w'CO_2}$  negativo, por lo que los aportes de  $S_1$  y  $S_3$  son prácticamente nulos, mientras que los valores de  $S_2$  y  $S_4$  son positivos

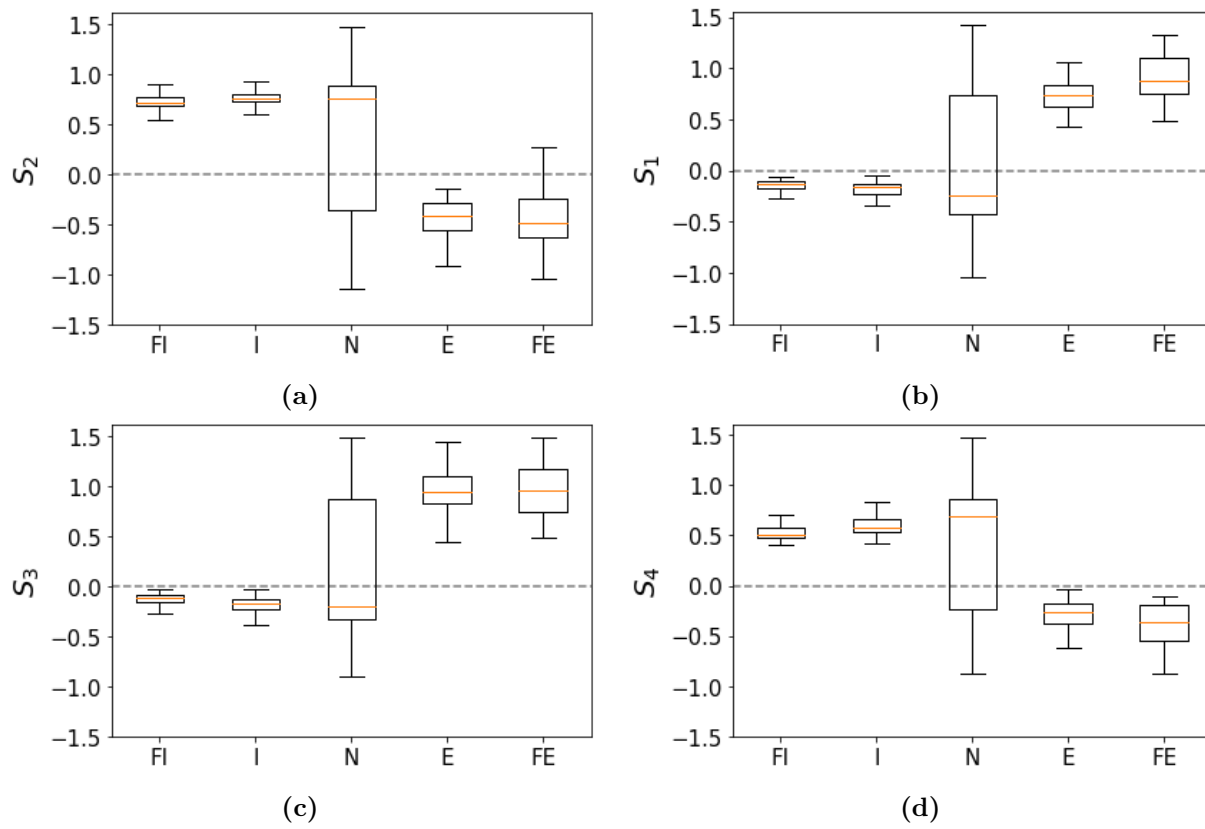


---

(Figura 3.7 y Tabla 3.2). En régimen I la mediana de  $S_2$  es de 0.76, mientras que para  $S_4$  es de 0.58 (Tabla 3.3). Es decir que el aporte de las eyecciones es superior al de los hundimientos para condiciones I. En los casos FI la mediana de  $S_2$  muestra una ligera disminución con respecto a las condiciones I, con un valor de 0.72, y  $S_4$  muestra una disminución aún mas marcada con un valor de 0.51 (Tabla 3.3). En este caso la diferencia indica que la contribución de las eyecciones aumenta para condiciones FI.

En las rondas bajo condiciones N, los valores se encuentran en torno al cero para todos los  $S_i$  (Figura 3.7). Las condiciones N representan el traspaso de condiciones E a I, por lo que su comportamiento no es tan marcado como el de las condiciones de estabilidad antes analizadas. Las medianas de  $S_1$  y  $S_3$  tienen valores negativos (Tabla 3.2), debido a que la mayor cantidad de casos son diurnos, donde el aporte de estos cuadrantes es negativo y cercano al 0. Los valores positivos de  $S_1$  y  $S_3$  son los que representan a las rondas nocturnas. El valor de  $q_3$  de  $S_1$  para condiciones N es de 0.74, y de 0.87 para  $S_3$  (Tabla 3.2). Es decir que en condiciones N, y en horas nocturnas, los hundimientos siguen siendo los que más aportan al transporte de  $CO_2$ . En el caso de  $S_2$  y  $S_4$  los valores positivos representan a los casos N en condiciones diurnas (Figura 3.7). La mediana de  $S_2$  es de 0.88 y 0.86 para  $S_2$  (Tabla 3.3). Esto quiere decir que, para condiciones N diurnas, las eyecciones y hundimientos aportan de forma similar al transporte de  $CO_2$ .

Por otro lado se puede ver que, en general, para todos los  $S_i$ , las rondas E y FE tienen una dispersión mayor con respecto a lo que ocurre con los casos I y FI, donde el IQR es menor (Figura 3.7, y Tablas 3.2 y 3.3). Esto indica que en condiciones I y FI la turbulencia se organiza de manera más clara en un tipo de CS, lo que permite contribuciones más significativas de los cuadrantes que aportan de forma directa al transporte turbulento de  $CO_2$ .



**Figura 3.7:** Boxplot con valores de 1<sup>er</sup> y 3<sup>er</sup> cuartil (límites de las cajas), mediana (línea roja) y valores extremos (bigotes) de  $S_1$  (a),  $S_2$  (b),  $S_3$  (c), y  $S_4$  (d), para diferentes regímenes de estabilidad: fuertemente estable (FE), estable (E), neutral (N), inestable (I) y fuertemente inestable (FI).

Estabilidad	$S_i$	Min	Media	Max	1 <sup>er</sup> cuartil	Mediana	3 <sup>er</sup> cuartil	IQR
FI	$S_1$	-0.45	-0.11	1.49	-0.17	-0.12	-0.10	0.07
	$S_3$	-0.76	-0.12	1.38	-0.17	-0.11	-0.08	0.09
I	$S_1$	-0.66	-0.18	1.03	-0.22	-0.17	-0.13	0.09
	$S_3$	-0.79	-0.19	1.28	-0.23	-0.18	-0.13	0.10
N	$S_1$	-1.05	0.03	1.42	-0.43	-0.24	0.74	1.17
	$S_3$	-0.91	0.12	1.48	-0.33	-0.21	0.87	1.20
E	$S_1$	-0.88	0.61	1.30	0.63	0.74	0.84	0.21
	$S_3$	-0.84	0.79	1.44	0.82	0.94	1.10	0.28
FE	$S_1$	-0.75	0.71	1.33	0.76	0.88	1.10	0.34
	$S_3$	-0.86	0.76	1.49	0.74	0.96	1.17	0.43

**Tabla 3.2:** Valores mínimos, máximos, primer cuartil, mediana, tercer cuartil y rango intercuartil (IQR) de  $S_1$  y  $S_3$  para condiciones de estabilidad Fuertemente Estables (FE), Estables (E), Neutrales (N), Inestables (I) y Fuertemente Inestables (FI), correspondientes a la Figura 3.7 (a) y (c).

Estabilidad	$S_i$	Min	Media	Max	1 <sup>er</sup> cuartil.	Mediana	3 <sup>er</sup> cuartil.	IQR
FI	$S_2$	-0.83	0.72	1.28	0.68	0.72	0.78	0.10
	$S_4$	-1.04	0.52	1.00	0.47	0.51	0.58	0.11
I	$S_2$	-0.72	0.78	1.47	0.73	0.76	0.81	0.08
	$S_4$	-0.59	0.60	1.09	0.54	0.58	0.66	0.12
N	$S_2$	-1.15	0.42	1.48	-0.35	0.76	0.88	1.23
	$S_4$	-0.87	0.43	1.48	-0.23	0.7	0.86	1.09
E	$S_2$	-0.97	-0.28	1.39	-0.56	-0.41	-0.29	0.27
	$S_4$	-0.70	-0.12	1.45	-0.37	-0.27	-0.18	0.19
FE	$S_2$	-1.05	-0.29	1.20	-0.63	-0.48	-0.24	0.39
	$S_4$	-0.87	-0.18	1.41	-0.55	-0.36	-0.20	0.35

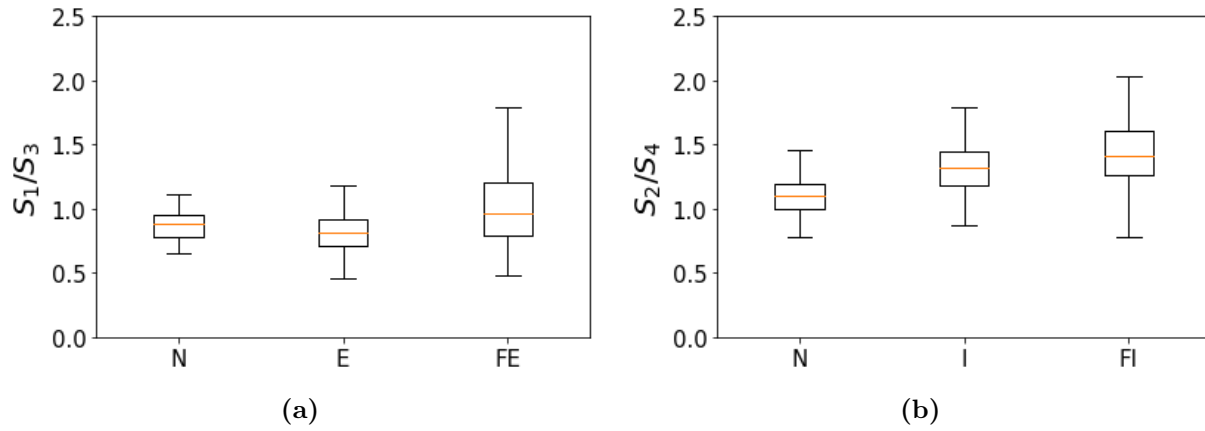
**Tabla 3.3:** Valores mínimos, máximos, 1<sup>er</sup> cuartil, mediana, 3<sup>er</sup> cuartil y rango intercuartil de  $S_2$  y  $S_4$  para condiciones de estabilidad Fuertemente Estables(FE), Estables(E), Neutrales(N), Inestables (I) y Fuertemente Inestables (FI) correspondientes a la Figura 3.7 (b) y (d).

Para comprender mejor la proporción con la que aportan eyecciones y hundimientos al transporte de  $CO_2$ , se obtuvieron los cocientes de la relación entre contribuciones de eyecciones y hundimientos. Se tuvieron en cuenta sólo las rondas con  $S_i$  positivos para calcular los cocientes  $S_1/S_3$  y  $S_2/S_4$ , bajo las distintas condiciones de estabilidad. Con este criterio, en la Figura 3.8 sólo se muestran condiciones N, E, y FE para  $S_1/S_3$ , y N, I y FI para  $S_2/S_4$ , en la cual se muestran  $q_1$  y  $q_3$ , mediana y valores extremos  $l_i$  y  $l_s$  de las proporciones mencionadas. En las Tablas 3.4 y 3.5 se pueden ver algunos estadísticos asociados a la Figura 3.8.

En condiciones N nocturnas la mediana de la proporción  $S_1/S_3$  es de 0.88 (Tabla 3.4). Esto implica que hay una ligera predominancia de aporte de los hundimientos al transporte de  $CO_2$ . Mientras que en condiciones N diurnas la proporción  $S_2/S_4$  tiene una mediana de 1.1 (Tabla 3.5), es decir que el aporte de los movimientos verticales de distinto signo es similar, con una leve predominancia de las eyecciones sobre los hundimientos. Cuando las condiciones se hacen más estables, al ir de N a E, la mediana de  $S_1/S_3$  disminuye a 0.81 (Tabla 3.4 y Figura 3.8(a)). La disminución de los valores de  $S_1/S_3$  implica que el aporte de los hundimientos al transporte de  $CO_2$  se hace aún mayor frente al de las eyecciones. Este comportamiento coincide con CS del tipo “hairpin vortex” o “low speed-streaks”, donde predominan los hundimientos por sobre las eyecciones tanto en frecuencia como en aporte total al transporte (Curto et al., 2022). Acorde a la bibliografía, este tipo de estructura es la que predomina en condiciones neutrales o levemente estables (Li & Bou-Zeid, 2011). Sin embargo al ir de E a FE, los valores de  $S_1/S_3$  aumentan, siendo más cercanos a 1 (mediana en 0.96), es decir, en estos casos tanto hundimientos como eyecciones

aportan en cantidades similares. Esto se puede deber a que la influencia de la estabilidad provoca que las CS se hagan más intermitentes y débiles (Dupont & Patton, 2012), y los movimientos verticales no sean tan organizados.

El aporte de las eyecciones sobre los hundimientos en condiciones diurnas aumenta a medida que aumenta la inestabilidad. La mediana de la proporción  $S_2/S_4$  aumenta de 1.1 en condiciones N a 1.32 en condiciones I. Sigue esa misma tendencia al aumentar la inestabilidad hacia condiciones FI, donde la mediana de  $S_2/S_4$  es 1.60. Esta tendencia se condice con el desarrollo de CS del tipo “plumas térmicas”. Estas estructuras presentan eyecciones intensas rodeadas de hundimientos más débiles y, a medida que aumenta la inestabilidad, se organizan mejor, con movimientos verticales de ascenso aún más intensos (Curto et al., 2022).



**Figura 3.8:** *Boxplot con valores de 1<sup>er</sup> y 3<sup>er</sup> cuartil (extremos de las cajas), mediana (línea roja) y valores extremos (bigotes) de las proporciones  $S_1/S_3$  (a) y  $S_2/S_4$  (b), para diferentes regímenes de estabilidad: Fuertemente Estable (FE), Estable (E), Neutral (N), Inestable (I) y Fuertemente Inestable (FI).*

---

$S_1/S_3$							
Estabilidad	Min	Mean	Max	1 <sup>er</sup> cuart.	Mediana	3 <sup>er</sup> cuart	IQR
N	0.66	0.91	2.75	0.78	0.88	0.95	0.17
E	0.34	0.86	2.06	0.71	0.81	0.92	0.21
FE	0.48	1.05	2.04	0.79	0.96	1.21	0.42

**Tabla 3.4:** Valores mínimos, máximos, primer cuartil, mediana, tercer cuartil y rango intercuartil de  $S_1/S_3$  para condiciones de estabilidad Fuertemente Estables(FE), Estables(E), Neutrales(N), Inestables (I) y Fuertemente Inestables (FI).

$S_2/S_4$							
Estabilidad	Min	Mean	Max	1 <sup>er</sup> cuart.	Mediana	3 <sup>er</sup> cuart	IQR
N	0.50	1.09	1.66	0.99	1.1	1.19	0.2
I	0.58	1.35	6.56	1.19	1.32	1.45	0.26
FI	0.36	1.41	2.26	1.26	1.41	1.60	0.34

**Tabla 3.5:** Valores mínimos, máximos, 1<sup>er</sup> cuartil, mediana, 3<sup>er</sup> cuartil y rango intercuartil de  $S_2/S_4$  para condiciones Fuertemente Estables(FE), Estables(E), Neutrales(N), Inestables (I) y Fuertemente Inestables (FI).

### 3.5. Eficiencias de los transportes de $CO_2$

La eficiencia del transporte de  $CO_2$  fue calculada acorde a la Ecuación 2.8. También fue calculada de la misma manera la eficiencia del transporte vertical de cantidad de movimiento horizontal  $r_{wu}$ , a fin de comparar los dos transportes y hacer una mejor caracterización de la turbulencia involucrada.

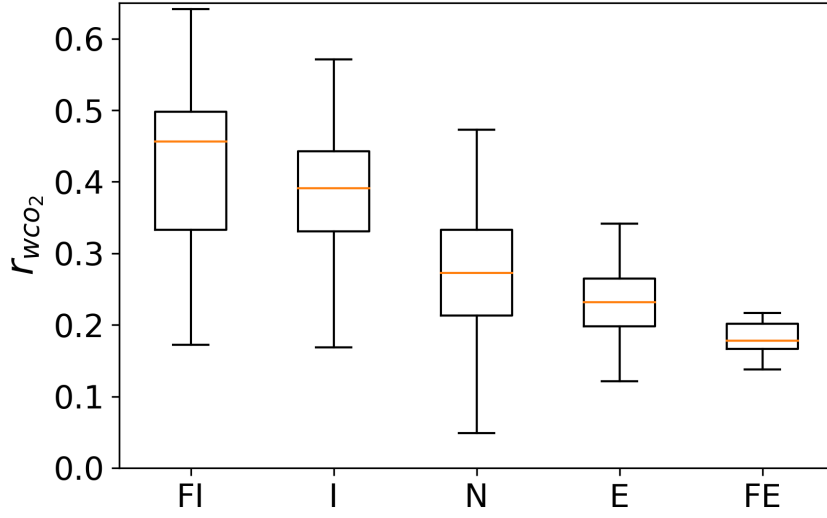
En la Figura 3.9 se muestra la mediana de  $r_{wCO_2}$ , y se puede ver que su dispersión disminuyen a medida que la estabilidad aumenta. Para condiciones FI la mediana tiene un valor de 0.46, para condiciones I es de 0.39, y 0.27 para casos N, lo que corresponde a una disminución de un 41 % de FI a N en el valor de dicho estadístico. En los casos E, se observa poca variación en comparación con lo que ocurrió con las rondas inestables. En condiciones E se halló una mediana de 0.23 y 0.18 para FE, lo que implica una disminución de 18 % en el valor de la eficiencia, yendo hacia condiciones más estables. De una manera similar, la dispersión de los transportes disminuye a medida que aumenta la estabilidad. El IQR para los casos FI es de 0.17, mientras que tiene un valor de 0.12 para casos N, y 0.03 para los FE.

---

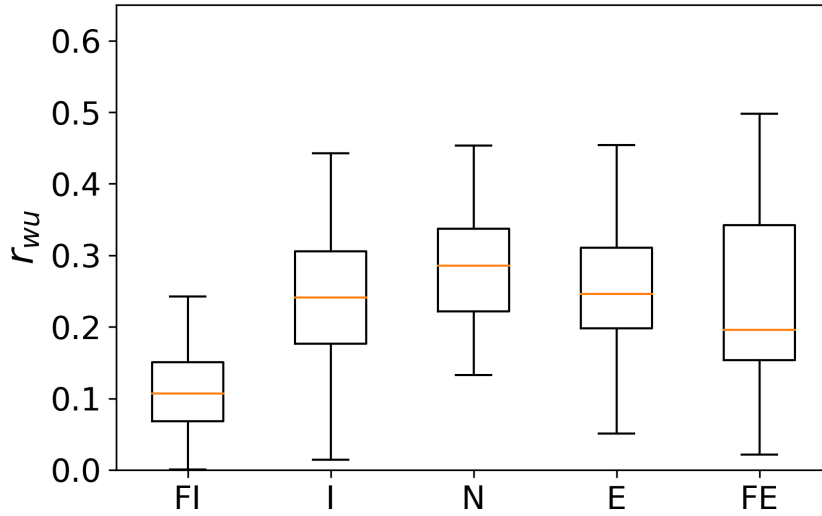
El comportamiento de  $r_{wu}$  es inverso al de  $r_{wCO_2}$  en relación a la estabilidad (Figura 3.10). La eficiencia del transporte de cantidad de movimiento aumenta a medida que la estabilidad aumenta, al menos desde los casos FI hasta los N. La mediana de la eficiencia  $r_{wu}$  tiene un valor de 0.11 para condiciones FI, de 0.24 para I y 0.29 para N. Estos valores indican un aumento de un 163 % de  $r_{wu}$  desde los FI a los N. Desde las condiciones N, y hacia los casos E, si bien se observa una leve disminución de la eficiencia, la variación es mucho menor comparada con lo que se observa en los casos I. La mediana para los valores E se halló en 0.25 y 0.20 para los FE. Estos números indican una variación de  $r_{wu}$  de solamente 14 % de N a E, y del 31 % yendo de N a FE. Se puede decir que, tanto para el transporte de  $CO_2$  como para el de  $u$ , las eficiencias en los casos FE y E tienen un comportamiento, en comparación, más cercano al comportamiento de los casos N que los I y FI.

Las eficiencias se comportan de manera similar para ambos transportes en las situaciones N, pero se observan diferencias a medida que las condiciones se vuelven más inestables. Mientras que  $r_{wCO_2}$  aumenta yendo de condiciones N hacia I y FI,  $r_{wu}$  disminuye. Esta diferencia marcada en el comportamiento de las eficiencias, muestra las formas disimiles en que son transportadas estas variables por la turbulencia. El hecho de que  $r_{wCO_2}$  sea mayor que  $r_{wu}$  para condiciones inestables concuerda con el desarrollo de “plumas térmicas” que transportan con mayor eficiencia escalares como el  $CO_2$ , mientras que son menos eficientes para transportar cantidad de movimiento (Li & Bou-Zeid, 2011). Los valores de  $r_{wCO_2}$  para condiciones FI son incluso mayores que para condiciones I, a su vez los valores de  $r_{wu}$  para condiciones I son mayores que para los FI. Esto muestra que las plumas transportan más eficientemente  $CO_2$  a medida que aumenta la inestabilidad y son menos eficientes para transportar cantidad de movimiento.

En condiciones N,  $r_{wCO_2}$  y  $r_{wu}$  muestran valores similares. Esto concuerda con el desarrollo de CS del tipo “hairpin vortices”. Acorde a Li & Bou-Zeid (2011), estas estructuras transportan, con eficiencias comparables, tanto propiedades escalares (como el  $CO_2$ ) como cantidad de movimiento. Para condiciones E y FE se observa algo similar a lo que sucede en situaciones N. Ambos transportes tienen una eficiencia comparable, a la vez que se observa una disminución de las mismas con el aumento de la estabilidad. Es decir que con el aumento de la estabilidad, estas estructuras pierden eficiencia para transportar ambas propiedades. Debe tenerse en cuenta que las condiciones FE, no pudieron ser correctamente caracterizadas debido al bajo número de rondas que pudieron ser analizadas bajo este régimen de estabilidad.



**Figura 3.9:** Boxplot con valores de  $1^{er}$  y  $3^{er}$  cuartil (extremos de las cajas), mediana (línea roja) y valores extremos (bigotes) de las eficiencias de los transportes de  $CO_2$  ( $r_{wCO_2}$ ) para diferentes regímenes de estabilidad: Fuertemente Estable (FE), Estable (E), Neutral (N), Inestable (I) y Fuertemente Inestable (FI).



**Figura 3.10:** Boxplot con valores de  $1^{er}$  y  $3^{er}$  cuartil (extremos de las cajas), mediana (línea roja) y valores extremos (bigotes) de las eficiencias de los transportes verticales de cantidad de movimiento ( $r_{wu}$ ) para diferentes regímenes de estabilidad: Fuertemente Estable (FE), Estable (E), Neutral (N), Inestable (I) y Fuertemente Inestable (FI).

## Capítulo 4

# Conclusiones

El trabajo desarrollado en esta tesis tuvo como objetivo general el estudio de la interacción entre la atmósfera y una superficie vegetada a través del transporte de  $CO_2$  realizado por las estructuras coherentes de la turbulencia. En la Capa Límite Atmosférica la turbulencia se desarrolla por la interacción entre el aire y la superficie, en este caso vegetación. Se hizo foco en las CS debido a que es la forma en que se organiza el transporte turbulento. Estas entidades de la turbulencia son las que se encargan de transportar de forma eficiente propiedades vectoriales como cantidad de movimiento, y también escalares como la concentración de  $CO_2$ . Estos transportes son realizados mediante movimientos de ascenso y descenso intensos llamados eyecciones y hundimientos, respectivamente. Se estudió la forma en la que diferentes condiciones de estabilidad alteran estos transportes, haciendo especial foco en la forma en la que alteran a la topología de las CS. Se trabajó tanto con condiciones diurnas como nocturnas. Se empleó una base de datos de mediciones meteorológicas de velocidad del viento, temperatura y dióxido de carbono tomadas con una frecuencia de 20 Hz a 5 metros del suelo, sobre un cultivo de soja.

Se calcularon los transportes verticales medios de  $CO_2$  para rondas de media hora de duración. Estos transportes muestran un ciclo diario siguiendo la variación de la radiación solar, con valores positivos en horarios nocturnos y negativos en horarios diurnos. Durante la noche, debido al proceso de respiración celular, las plantas liberan  $CO_2$  a la atmósfera. Los transportes turbulentos se encargan de transportar entonces perturbaciones de  $CO_2$  positivas hacia la atmósfera. Durante el día, el proceso de respiración continúa, pero el de fotosíntesis es el que predomina, por lo que el flujo neto de  $CO_2$  es hacia la vegetación. Esto genera que los movimientos ascendentes



---

transporten perturbaciones de  $CO_2$  negativas hacia la atmósfera. De esta manera la superficie vegetal actúa como una fuente de  $CO_2$  durante la noche, y un sumidero en condiciones diurnas.

Se utilizó la Metodología de los Cuadrantes (Shaw et al., 1983) para identificar las rondas de media hora de duración con presencia de CS, así como cuantificar los movimientos verticales de hundimientos y eyecciones, asociados a diferentes tamaños de vórtices turbulentos. Esta metodología consiste en la separación del transporte vertical turbulento  $w'CO_2'$  en los 4 cuadrantes del eje cartesiano, según el signo de cada una de las variables turbulentas. Se trabajó con los datos micrometeorológicos instantáneos correspondientes a la dirección de viento provenientes del sector del lote de soja (NO-NE). Del total de rondas consideradas, se detectó presencia de CS en el 62 % de ellas. Las rondas con presencia de turbulencia organizada se alinean en 2 cuadrantes preponderantes, según el signo del transporte, mostrando así una separación entre eyecciones (cuadrantes  $Q_1$  y  $Q_2$ ) y hundimientos ( $Q_3$  y  $Q_4$ ). En rondas con presencia de CS los aportes al transporte medio de cada uno de los cuadrantes  $Q_i$  decaen a medida que se tienen en cuenta sólo los torbellinos más grandes. También se pudo identificar que, la mayor cantidad de rondas en las cuales la turbulencia se encontró bien desarrollada, y con presencia de CS, fueron las correspondientes a condiciones diurnas.

En condiciones diurnas el transporte turbulento de  $CO_2$  es negativo, y por lo tanto los cuadrantes  $Q_2$  y  $Q_4$  son los que más aportan, por tratarse de transportes a favor del gradiente. Mientras que en condiciones nocturnas el transporte de  $CO_2$  es positivo, de forma que los cuadrantes  $Q_1$  y  $Q_3$  son los que más aportan, al ser del mismo signo que el transporte medio. Se encontró que en condiciones diurnas son las eyecciones las que más aportan al transporte de  $CO_2$ , mientras que en los casos nocturnos los que transportan en mayor proporción son los hundimientos.

Se encontró que la mayoría de las rondas con CS se dieron en condiciones de estabilidad neutrales (37 %), seguidas por las de condiciones inestables (31 %), las de condiciones estables (16 %), las de fuertemente inestables (14 %), y por último las fuertemente estables (6 %). Las condiciones inestables corresponden principalmente a horas diurnas, y las estables a condiciones nocturnas. Las condiciones neutrales se suelen dar en las horas de transición, como el amanecer y el atardecer, por lo que se identificaron rondas tanto diurnas como nocturnas en estas condiciones de estabilidad. En condiciones neutrales diurnas dominaron el transporte levemente las eyecciones ( $S_2$ ) por sobre los hundimientos ( $S_4$ ). Esta diferencia se acentúa en condiciones inestables, y es

---

aún mayor en condiciones fuertemente inestables. La marcada predominancia de las eyecciones en condiciones inestables concuerda con el desarrollo de CS del tipo “plumas térmicas”, que se caracterizan por eyecciones intensas rodeadas de hundimientos más débiles. Según Li & Bou-Zeid (2011), a medida que la inestabilidad aumenta, se intensifica el desarrollo de este tipo de CS, coincidiendo con los resultados aquí mostrados de eyecciones más intensas a mayor inestabilidad. En los casos neutrales nocturnos, en cambio, predominan los hundimientos por sobre las eyecciones, y esta diferencia se acentúa en condiciones estables. Esto concuerda con el desarrollo del tipo “hairpin vortices” o también “low speed-streaks”. Este tipo de estructura se caracteriza por hundimientos intensos y eyecciones más débiles, y estas predominan en casos neutrales y levemente estables (Li & Bou-Zeid, 2011).

En el análisis de estabilidad a través del parámetro  $z/L$ , se pondera la generación de turbulencia tanto por cortante como por empuje térmico. Cuando el empuje térmico predomina,  $L$  toma valores negativos, indicando condiciones inestables, favoreciéndose la convección. A medida que aumenta la inestabilidad se favorece el desarrollo de plumas térmicas, que muestran altos valores de eficiencias de transporte turbulento de  $CO_2$ . En estos casos, la mezcla vertical impide que se generen grandes cortantes verticales del viento. Acorde a cortantes de baja intensidad, la eficiencia del transporte turbulento de cantidad de movimiento disminuye. En los casos neutrales el valor de  $L$  es grande, lo que indica que la cortante es el principal generador de turbulencia por sobre el empuje. En estas condiciones se halló que, tanto la eficiencia de transporte de cantidad de movimiento y la de  $CO_2$ , mostraron valores similares. Estas características se corresponden con el desarrollo de las CS de tipo “hairpin vortices” o “low speed-streaks”, cuyo desarrollo se ve favorecido en condiciones donde la cortante es la principal fuente de energía turbulenta. Este tipo de estructuras transporta con similar eficiencia tanto cantidad de movimiento como escalares (Li & Bou-Zeid, 2011). El mismo comportamiento se observó para condiciones E y FE, aunque la eficiencia de los transportes mostró una disminución para valores de  $z/L$  más altos. Las eficiencias de transporte turbulento, tanto para cantidad de movimiento como para  $CO_2$ , muestran valores más bajos a mayores valores de  $z/L$ . Esto es debido a que en condiciones más estables, la turbulencia se hace más intermitente y débil, y no llega a organizarse, por lo que no hay un buen desarrollo de CS (Dupont & Patton, 2012).

Según lo analizado en esta tesis, la estabilidad es el principal modulador de los flujos turbulentos de  $CO_2$ , influyendo en el tipo de estructura coherente de la turbulencia que se desarrolla y transporta las propiedades. Otro factor importante a tener en cuenta es el cambio de sentido del

---

flujo entre condiciones diurnas y nocturnas, debido a los procesos de fotosíntesis y respiración de las plantas. No se pudieron observar mayores diferencias debido a los cambios a lo largo del ciclo del cultivo, en concordancia por lo descrito en el trabajo de Curto (2020). Sin embargo existen limitaciones en los datos disponibles, como la falta de mediciones a distintas alturas dentro y sobre el cultivo.

La información que brindan el Método de los Cuadrantes y el estudio de las eficiencias de transporte turbulento es complementaria, ya que el primero permite identificar los patrones de transporte asociados a la turbulencia, y el segundo habla de la eficiencia real de los torbellinos al realizar dichos transportes.

Los resultados de este estudio aportan información valiosa sobre el comportamiento del transporte turbulento de  $CO_2$  en superficies vegetadas, especialmente en cultivos de soja, un área de importancia económica y ambiental en nuestro país. La comprensión de cómo las condiciones de estabilidad influyen en la estructura de la turbulencia y en la eficiencia de los transportes puede tener implicaciones tanto en la modelización micrometeorológica como en la gestión agrícola y climática.

Los estudios micrometeorológicos no son muy comunes en Sudamérica, y particularmente en Argentina, sin embargo la gran variedad de coberturas de suelo y usos de la tierra en áreas extensas hace necesario este tipo de investigaciones (Curto et al., 2022). En este contexto, la falta de mediciones a diferentes alturas dentro y sobre los cultivos, así como la escasez de datos micrometeorológicos en general, resaltan la importancia de ampliar las redes de monitoreo en el país. Este tipo de información es crucial para mejorar los modelos locales de interacción atmósfera-biosfera y, en última instancia, para una mejor gestión del uso del suelo y la adaptación al cambio climático.

# Bibliografía

- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, Ü., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A. S., Martin, P. H., Berbigier, P., Bernhofer, C., et al. (1999). Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the euroflux methodology. In Advances in ecological research, volume 30 (pp. 113–175). Elsevier.
- Baldocchi, D. (2008). ‘breathing’ of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. Australian Journal of Botany, 56(1), 1–26.
- Bernacchi, C. J., Hollinger, S. E., & Meyers, T. (2005). The conversion of the corn/soybean ecosystem to no-till agriculture may result in a carbon sink. Global Change Biology, 11(11), 1867–1872.
- Brutsaert, W. (2023). Hydrology. Cambridge University Press.
- Choi, T., Hong, J., Kim, J., Lee, H., Asanuma, J., Ishikawa, H., Tsukamoto, O., Zhiqiu, G., Ma, Y., Ueno, K., et al. (2004). Turbulent exchange of heat, water vapor, and momentum over a tibetan prairie by eddy covariance and flux variance measurements. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 109(D21).
- Cuerva, A. & Sanz-Andrés, A. (2000). On sonic anemometer measurement theory. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 88(1), 25–55.
- Curto, L. (2020). Estudio de las estructuras coherentes de la capa de superficie sobre una superficie cultivada. PhD thesis, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos.
- Curto, L., Gassmann, M. I., Covi, M., & Tonti, N. E. (2022). Study of turbulence behavior above two different crops. Agricultural and Forest Meteorology, 322, 109012.

- 
- De Bruin, H., Kohsiek, W., & Van Den Hurk, B. (1993). A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat, and water vapour using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities. Boundary-Layer Meteorology, 63, 231–257.
- Dupont, S. & Patton, E. G. (2012). Influence of stability and seasonal canopy changes on micrometeorology within and above an orchard canopy: The chats experiment. Agricultural and Forest Meteorology, 157, 11–29.
- Eder, F., Serafimovich, A., & Foken, T. (2013). Coherent structures at a forest edge: properties, coupling and impact of secondary circulations. Boundary-Layer Meteorology, 148, 285–308.
- Farquhar, G. D., von Caemmerer, S. v., & Berry, J. A. (1980). A biochemical model of photosynthetic co<sub>2</sub> assimilation in leaves of c<sub>3</sub> species. Planta, 149, 78–90.
- Finnigan, J. (2000). Turbulence in plant canopies. Annual Review of Fluid Mechanics, 32(1), 519–571.
- Foken, T. (1999). Der bayreuther turbulenzknecht. Arbeitsergebn Univ Bayreuth, Abt Mikrometeorol, ISSN 1614-8916, 1:16.
- Foken, T. & Mauder, M. (2008). Micrometeorology, volume 2. Springer.
- Foken, T. & Wichura, B. (1996). Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 78(1-2), 83–105.
- Hannah, L. (2021). Climate Change Biology. Academic Press.
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., & Troxler, T. (2014). 2013 supplement to the 2006 ipcc guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland.
- Hommema, S. E. & Adrian, R. J. (2003). Packet structure of surface eddies in the atmospheric boundary layer. Boundary-Layer Meteorology, 106, 147–170.
- Huerre, P. & Monkewitz, P. A. (1985). Absolute and convective instabilities in free shear layers. Journal of Fluid Mechanics, 159, 151–168.
- Inagaki, A. & Kanda, M. (2010). Organized structure of active turbulence over an array of cubes within the logarithmic layer of atmospheric flow. Boundary-Layer Meteorology, 135, 209–228.

- 
- Jobbágy, E. G., Aguiar, S., Piñeiro, G., & Garibaldi, L. A. (2021). Impronta ambiental de la agricultura de granos en argentina: revisando desafíos propios y ajenos.
- Kaimal, J. C. & Finnigan, J. J. (1994). Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement. Oxford University Press.
- Katul, G., Hsieh, C.-I., Kuhn, G., Ellsworth, D., & Nie, D. (1997). Turbulent eddy motion at the forest-atmosphere interface. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 102(D12), 13409–13421.
- Katul, G. G., Sempreviva, A. M., & Cava, D. (2008). The temperature–humidity covariance in the marine surface layer: a one-dimensional analytical model. Boundary-Layer Meteorology, 126(2), 263–278.
- Kays, W. M., Crawford, M. E., & Weigand, B. (1980). Convective heat and mass transfer, volume 4. McGraw-Hill New York.
- Kim, J. & Verma, S. B. (1996). Surface exchange of water vapour between an open sphagnum fen and the atmosphere. Boundary-Layer Meteorology, 79, 243–264.
- Kim, K. C. & Adrian, R. J. (1999). Very large-scale motion in the outer layer. Physics of Fluids, 11(2), 417–422.
- Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F., & Runstadler, P. (1967). The structure of turbulent boundary layers. Journal of Fluid Mechanic, 30(4), 741–773.
- Lambers, H. et al. (2005). Plant respiration: from cell to ecosystem, volume 18. Springer Science & Business Media.
- Li, D. & Bou-Zeid, E. (2011). Coherent structures and the dissimilarity of turbulent transport of momentum and scalars in the unstable atmospheric surface layer. Boundary-Layer Meteorology, 140, 243–262.
- Mack, L., Berntsen, T. K., Vercauteren, N., & Pirk, N. (2024). Transfer efficiency and organization in turbulent transport over alpine tundra. Boundary-Layer Meteorology, 190(9), 38.
- Marusic, I., Mathis, R., & Hutchins, N. (2010). Predictive model for wall-bounded turbulent flow. Science, 329(5988), 193–196.

- 
- Mauder, M. & Foken, T. (2015). Documentation and instruction manual of the eddy-covariance software package tk3 (update).
- Morison, J. I. & Gifford, R. M. (1983). Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity: a comparison of two c3 and two c4 grass species. Plant physiology, 71(4), 789–796.
- Nabors, M. W. (2004). Introduction to botany. Benjamin Cummings.
- Presutti, M. E., Gusmerotti, L. A., & Abbona, E. A. (2023). Índice soja/maíz como indicador del aporte de materia orgánica al suelo en la agricultura argentina. Revista FAVE Sección Ciencias Agrarias, 22.
- Raupach, M. R., Finnigan, J. J., & Brunet, Y. (1996). Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. Boundary-Layer Meteorology 25th Anniversary Volume, 1970–1995: Invited Reviews and Selected Contributions to Recognise Ted Munn's Contribution as Editor over the Past 25 Years, (pp. 351–382).
- Robinson, S. et al. (1991). Coherent motions in the turbulent boundary layer. Annual Review of Fluid Mechanics, 23(1), 601–639.
- Satorre, E. H. & Andrade, F. H. (2021). Cambios productivos y tecnológicos de la agricultura extensiva argentina en los últimos quince años.
- Shaw, R. H., Tavangar, J., & Ward, D. P. (1983). Structure of the reynolds stress in a canopy layer. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 22(11), 1922–1931.
- Stull, R. B. (1988). An introduction to boundary layer meteorology, volume 13. Springer Science & Business Media.
- Taiz, L. (2002). Plant physiology. Sinauer Associates Inc, 690.
- Theodorsen, T. (1952). Mechanisms of turbulence. In Proceedings of the 2nd Midwestern Conference on Fluid Mechanics, 1952.
- Tritton, D. J. (2012). Physical fluid dynamics. Springer Science & Business Media.
- Wallace, J. M. (2016). Quadrant analysis in turbulence research: history and evolution. Annual Review of Fluid Mechanics, 48, 131–158.
- White, F. M. (2008). Fluid Mechanics. The McGraw Hill Companies.