

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

REFINAMIENTO Y ANÁLISIS DEL MÉTODO DE ESCINTILOMETRÍA ÓPTICA-MICROONDAS APLICADO A LAS MEDICIONES SOBRE UN VIÑEDO EN CHILE.

FRANCISCA AGUIRRE.¹
OSCAR HARTOGENSIS.²
FRANCISCO MEZA.³
FRANCISCO SUÁREZ POCH.⁴

RESUMEN

La evapotranspiración (ET) es un componente crítico del ciclo hidrológico y la precisión en su medición es necesaria para mejorar la gestión de los recursos hídricos en un clima que es cambiante. Sin embargo, la ET es difícil de estimar, especialmente a grandes escalas de 0,5 a 10 km. Los escintilómetros son una alternativa interesante a los métodos tradicionales, como la técnica de Eddy Covariance (EC), ya que han dado buenos resultados en regiones heterogéneas y a grandes escalas espaciales. Sin embargo, como los escintilómetros trabajan con ondas electromagnéticas, pueden sobreestimar los flujos de calor debido a contribuciones no deseadas en las fluctuaciones de la señal. Además, el método de escintilómetros se basa en la teoría de similitud de Monin-Obukhov (MOST) para relacionar las estadísticas de turbulencia con el calor sensible (H) y el calor latente (L_vE), lo que influye en la calidad de las estimaciones de los flujos. En este estudio analizamos datos recogidos en un viñedo en Pirque, Chile, donde los trípodes de los escintilómetros vibraban al aumentar los vientos durante la tarde, dando lugar a flujos de calor poco realistas. Estos datos fueron reprocesados mediante un análisis espectral para eliminar las contribuciones no deseadas de ruido electrónico, absorción y vibraciones de los trípodes, proponiendo un nuevo método de limpieza. Además, se descubrió que el uso de diferentes funciones de similitud Monin-Obukhov da lugar a más de un $\pm 12\%$ de diferencia en el L_vE estimado.

¹ Estudiante de Doctorado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - email: faguirre2@uc.cl

² Profesor Asociado, Meteorology and Air Quality, Wageningen University & Research – email: oscar.hartogensis@wur.nl

³ Profesor Titular, Departamento de Ecosistemas y Medio Ambiente, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: fmeza@uc.cl

⁴ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - email: fsuarez@ing.puc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET) es un componente crítico del ciclo hidrológico, pero no siempre es bien caracterizada en regiones áridas y semiáridas (Parasuraman et al., 2007; Chovanes et al., 2020). Esto se debe a que las mediciones de ET son difíciles de obtener y, por lo tanto, se han investigado diferentes métodos que permitan obtener estimaciones más precisas (Mohawesh, 2011; Li et al., 2016) debido a que, producto del cambio climático, cada vez se hace más urgente hacer una buena gestión de los recursos hídricos. Estudios recientes han demostrado que los escintilómetros son una alternativa interesante a los métodos tradicionales, como los sistemas Eddy Covariance (EC), especialmente para paisajes heterogéneos y naturales, y para estimar el calor sensible (H) y el calor latente (L_vE) en escalas espaciales que van desde 0,1 km hasta escalas mayores como 10 km (Meijninger et al., 2002; van Kesteren et al., 2013; Yee et al., 2015).

El funcionamiento de los escintilómetros consiste en un receptor que mide las varianzas de la señal de un haz de luz que es enviado por un transmisor, el cual se instala a una determinada distancia conocida como longitud de trayectoria. Este sistema permite calcular los flujos de calor combinando principios teóricos de turbulencia atmosférica con la física de la propagación de las ondas electromagnéticas, y aplicando la teoría de la similitud Monin-Obukhov (MOST; Monin y Obukhov, 1954). La tecnología de los escintilómetros supera muchas de las limitaciones de los sistemas EC, ya que no sufre distorsión de flujos, obtiene flujos representativos para escalas espaciales mayores y se ha utilizado con éxito en terrenos heterogéneos (Meijninger et al., 2005). Sin embargo, sus principales desventajas son que (1) H y L_vE se determinan de forma indirecta; (2) la señal de los escintilómetros suele presentar contribuciones no deseadas procedentes de ruido electrónico, absorción y vibraciones del trípode; y (3) no hay consenso sobre la forma exacta de las funciones de similitud universales de MOST (Kooijmans y Hartogensis, 2016). Por lo tanto, la selección adecuada de estas funciones es importante para la estimación correcta de H y L_vE .

Este estudio pretendía ser una comparación directa entre mediciones de escintilómetros y un Eddy Covariance sobre un viñedo de regadío. Sin embargo, trípodes inestables en combinación con elevados vientos durante la tarde provocaron vibraciones en el montaje del escintilómetro. Estas vibraciones dieron lugar a importantes contribuciones no deseadas en la varianza de la intensidad de la señal y a sobreestimaciones poco realistas de los flujos de calor. La eliminación de la contribución de las vibraciones del trípode no ha sido abordada en la literatura científica y es un desafío, ya que se encuentran dentro de las frecuencias relevantes de la señal del escintilómetro para el cálculo de los flujos de calor. Por lo tanto, esta investigación tenía como objetivos específicos: (1) investigar cómo se alteran los flujos de calor basados en escintilometría en comparación con las mediciones del EC cuando existen vientos elevados durante la tarde; (2) desarrollar un filtro de vibraciones de trípode; y (3) evaluar el impacto del uso de diferentes funciones de MOST en los flujos de calor basados en escintilómetros.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 FUNCIONAMIENTO DE UN ESCINTILÓMETRO

Un escintilómetro es un instrumento óptico funcionamiento horizontal que analiza las fluctuaciones de un haz de luz debido a su interacción (centelleos) con los transportes turbulentos de calor

sensible y latente a 1 kHz de frecuencia. Este haz de luz es una onda electromagnética con una determinada longitud de onda que suele variar entre los rangos óptico y de microondas. Uno de los escintilómetros que trabaja en longitudes de onda ópticas se denomina *Large Aperture Scintillometer* (LAS), mientras que los que trabajan en longitudes de onda de microondas se denominan *Microwave Scintillometer* (MWS). La combinación de ambos se conoce como *Optical-Microwave Scintillometer* (OMS), que es el sistema utilizado en este trabajo.

Las fluctuaciones del haz de luz se miden en el receptor como variaciones de la intensidad de la señal ($\sigma_{\ln(I)}^2$) y la turbulencia atmosférica se cuantifica mediante parámetros de estructura. Estos parámetros de estructura son una medida de la energía turbulenta presente en el rango inercial del índice de refracción (C_n^2 [$\text{m}^{-2/3}$]), la temperatura (C_T^2 [$\text{K}^2\text{m}^{-2/3}$]), la humedad específica (C_q^2 [$\text{kg}^2/\text{kg}^2 \text{m}^{-2/3}$]), y la correlación temperatura-humedad (C_{Tq} [$\text{kg}/\text{kg} \text{Km}^{-2/3}$]), y pueden relacionarse utilizando diferentes métodos teóricos y la siguiente ecuación (Hill, 1997):

$$C_n^2 = \frac{A_T^2}{\bar{T}^2} C_T^2 + \frac{2A_T A_q}{\bar{T}_q} C_{Tq} + \frac{A_q^2}{\bar{q}^2} C_q^2 \quad (1)$$

donde T es la temperatura [K], q es la humedad específica [kg/kg], y A_i son coeficientes adimensionales [-] que dependen de la presión atmosférica, la temperatura y la humedad específica. Las barras indican los valores medios en un intervalo temporal. Una vez encontrados los parámetros de estructura, se puede utilizar la teoría de similitud Monin-Obukhov (MOST) para determinar los flujos de calor sensible (H) y latente ($L_v E$):

$$H^2 = - \frac{\bar{\rho}^2 c_p^2 u_*^2 (z-d)^{2/3} C_T^2}{f c_T^2} \quad (2)$$

$$L_v E^2 = - \frac{\bar{\rho}^2 L_v^2 u_*^2 (z-d)^{2/3} C_q^2}{(1-\bar{q})^2 f c_q^2} \quad (3)$$

donde ρ es la densidad del aire [kg/m^3], c_p el calor específico a presión constante [J/kgK], u_* es la velocidad de fricción [m/s], z es la altura efectiva del haz [m], d es el desplazamiento del plano cero [m], L_v el calor latente de vaporización [J/kg] y $f c_x^2$ son las funciones de similitud universales de MOST.

Sin embargo, aunque se supone que $f c_T^2$ y $f c_q^2$ son universales, se ha demostrado que diferentes funciones de MOST pueden causar hasta un 20% de diferencia en las estimaciones de H (Hartogensis et al., 2003). Wyngaard et al. (1971) encontró funciones de similitud generales para condiciones inestables ($z/L_o < 0$) y estables ($z/L_o > 0$):

$$f c_{x_{unstable}}^2 \left(\frac{z-d}{L_o} \right) = c_{x1} \left(1 - c_{x2} \frac{z-d}{L_o} \right)^{-2/3} \quad (4)$$

$$f c_{x_{stable}}^2 \left(\frac{z-d}{L_o} \right) = c_{x1} \left(1 + c_{x2} \left(\frac{z-d}{L_o} \right)^{-2/3} \right) \quad (5)$$

donde L_o es la longitud de Obukhov [m], x se refiere a T para temperatura y q para humedad, y c_{xi} son coeficientes empíricos propuestos en la literatura científica.

2.2 SITIO DE ESTUDIO

El área de estudio es un viñedo de riego de 12 km² ubicado en Pirque, una provincia de base agrícola situada en el valle central semiárido de Chile. Nuestra campaña de terreno se realizó en el período de verano, entre el 9 y el 17 de enero de 2019, donde no se observaron precipitaciones. Se instaló un sistema EC (IRGASON, Campbell Scientific Inc, Logan, UT, USA) y una estación meteorológica en medio del viñedo a 4 m de altura. Los datos de EC de 20 Hz se procesaron para obtener flujos de 30 minutos utilizando el software EddyPro 6.2.2 y activando los procedimientos de corrección recomendados por defecto (Fratini & Maulder, 2014). Se instaló un OMS a 3,02 m de altura en una orientación NE-SW sobre una trayectoria de 480 m. El OMS está compuesto por un LAS (LAS MkII, Kipp & Zonen, Delft, Países Bajos) con una apertura de 149 mm y una longitud de onda de 850 nm, y un MWS (RPG-MWSC-160, RPG Radiometer Physics GmbH, Meckenheim, Alemania) con una apertura de 300 mm y una longitud de onda de 1,86 mm. La altura de desplazamiento cero fue de 1,12 m, y la rugosidad causada por los cultivos fue de 0,2 m, ya que el viñedo se clasificó como una superficie semiárida con cultivos altos y numerosos obstáculos (Hansen, 1993). La altura de desplazamiento cero se estimó a partir de la altura media de los cultivos ($H_{veg} = 1.6\text{ m}$) como $d = 0.7H_{veg}$ (Grimmond & Oke, 1999). Además, se guardaron los datos crudos del escintilómetro de 1 kHz para realizar la limpieza espectral que se detalla en la siguiente sección. La Figura 1 muestra la localización geográfica del sector de estudio y la instalación de los instrumentos en este.

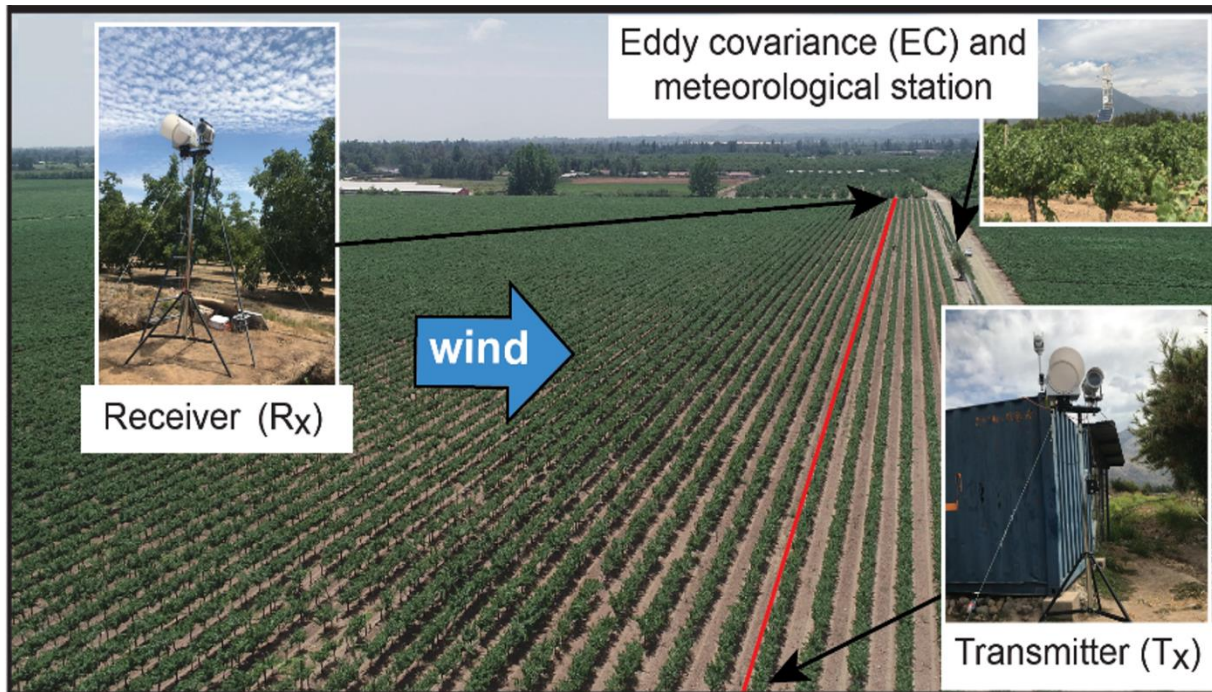


Figura 1. Sistema Eddy Covariance y estación meteorológica, y escintilómetro óptico microondas instalados en el sector de estudio. La línea roja demarca el trayecto del escintilómetro.

2.3 LIMPIEZA ESPECTRAL

En primer lugar, utilizando la señal cruda del escintilómetro se realizó un análisis espectral para reconocer las contribuciones no deseadas: absorción a bajas frecuencias, *peaks* erráticos y vibraciones del trípode dentro de las frecuencias relevantes del escintilómetro, y ruido electrónico en altas frecuencias. En segundo lugar, se aplicó un filtro pasa banda (*BPF*) que incluye un filtro de paso alto (*HPF*) de 0,1 Hz y un filtro de paso bajo (*LPF*) de 100 Hz según las recomendaciones de Stoffer (2018). Así, cualquier contribución de frecuencia por debajo de 0,1 Hz o por encima de 100 Hz es eliminado de las señales de LAS y MWS. A continuación, el tercer paso consiste en aplicar un proceso de filtrado de *peaks* erráticos y contribuciones no deseadas de las vibraciones del trípode. Este proceso no es trivial, ya que normalmente las frecuencias de las vibraciones del trípode están dentro de las frecuencias del escintilómetro que sí son relevantes para el cálculo de los flujos de calor. Por lo tanto, debe llevarse a cabo con cuidado para evitar el filtrado de la señal correcta que debe ser utilizada por el LAS y el MWS.

El método consiste en dividir el espectro en bloques del 5% del total de datos y calcular la mediana del bloque (*MED*) y la desviación media absoluta (*MAD*). A continuación, se definen los *peaks* erráticos y las vibraciones del trípode dentro del bloque cuando se cumple la siguiente condición:

$$S_f > MED + aMAD \quad \text{si} \quad \text{frecuencia} \leq FT \text{ Hz} \quad (9)$$

$$S_f > MED + bMAD \quad \text{si} \quad \text{frecuencia} > FT \text{ Hz} \quad (10)$$

donde S_f es el valor del espectro en el rango de frecuencias, a y b son coeficientes empíricos, y FT es un umbral de frecuencia [Hz]. Por lo tanto, los valores de a y b deben definirse para cada caso experimental, ya que el rango de valores atípicos varía con la intensidad de la vibración. El FT también debe seleccionarse para cada conjunto de datos (por ejemplo, 2 Hz suele ser el punto en el que se producen las vibraciones del trípode). Cuando se encuentran los *peaks* erráticos de un bloque de datos, se superpone el siguiente bloque a analizar para garantizar la continuidad y se repite el proceso hasta encontrar las contribuciones no deseadas de todos los bloques. Para eliminar las contribuciones no deseadas de los *peaks* erráticos y las vibraciones de los trípodes, se varían aleatoriamente sus coeficientes de Fourier suponiendo que se distribuyen uniformemente dentro de cada bloque de datos, de modo que no se modifican las propiedades estadísticas pertinentes. Como este enfoque podría producir nuevos *peaks* erráticos artificiales, se lleva a cabo un proceso iterativo hasta que se eliminan todas las contribuciones no deseadas.

La Figura 2 muestra un ejemplo del método de limpieza espectral. En este ejemplo, utilizamos un espectro aleatorio (Figura 2(a)). El *BPF* elimina la absorción y el ruido electrónico del espectro original. Como resultado, se elimina cualquier contribución de frecuencia por abajo del *HPF* y por encima del *LPF* (Figura 2(b)). A continuación, el espectro se evalúa en bloques para identificar las contribuciones no deseadas de las vibraciones del trípode y los *peaks* erráticos. Este proceso se realiza desde las frecuencias bajas hasta las altas (Figura 2(c)). Como se muestra en las ecuaciones (9) y (10), los criterios para clasificar una contribución no deseada dependerán del umbral de frecuencia (FT). Así, se obtiene un espectro corregido sin ruido electrónico, absorción, *peaks* erráticos y contribuciones no deseadas de las vibraciones del trípode (Figura 2(d)).

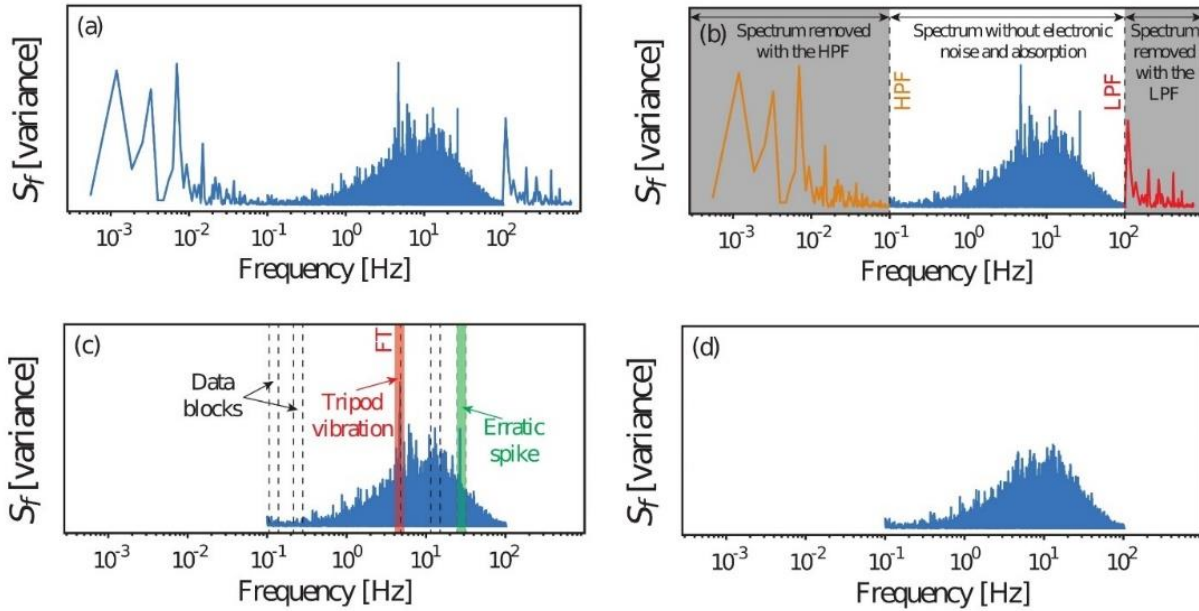


Figura 2. Ejemplo del método de limpieza espectral: (a) espectro original; (b) espectro sin ruido electrónico ni absorción; (c) bloques de datos utilizados para analizar los valores atípicos, y descripción del umbral de frecuencia (FT), bloque de datos donde las vibraciones del trípode dan lugar a un pico en la varianza (rojo) y bloque de datos donde existe un *peak* errático (verde); y (d) espectro limpio.

A partir del espectro limpio, se calcula la varianza de la señal utilizando la integral de la curva del espectro, ya que éste se escala de forma que el área bajo el espectro sea proporcional a la varianza de la señal. Además, la serie temporal de la señal corregida se estima mediante la transformada inversa de Fourier ($IFFT$). Con el fin de analizar el impacto del método propuesto para eliminar las contribuciones no deseadas, mostramos los flujos de calor del escintilómetro antes y después del proceso de limpieza.

3. RESULTADOS

Los flujos de H y $L_v E$ medidos por el EC y el OMS se presentan en la Figura 3. Por un lado, los flujos medidos por el sistema EC son consistentes con mediciones realizadas en sitios de estudio similares con una razón de balance de energía (EBR) de 0,82, que también ha sido reportado para este tipo de sistemas (Meijninger et al., 2002; Yee et al., 2015). Por otro lado, después del 10 de enero de 2019, los flujos del escintilómetro se consideran irreales ya que: (1) en momentos concretos los flujos OMS son mucho mayores que la constante solar ($\sim 1360 \text{ W/m}^2$; Li et al., 2012); (2) los flujos OMS son mucho mayores que los flujos basados en el EC; (3) los flujos OMS son generalmente mayores que la energía disponible estimada como la diferencia entre la radiación neta (R_n) y el flujo de calor hacia el suelo (G) ($R_n - G$); y (4) los grandes valores de H y $L_v E$ dan como resultado un EBR de 2,95, que es un valor extremadamente grande.

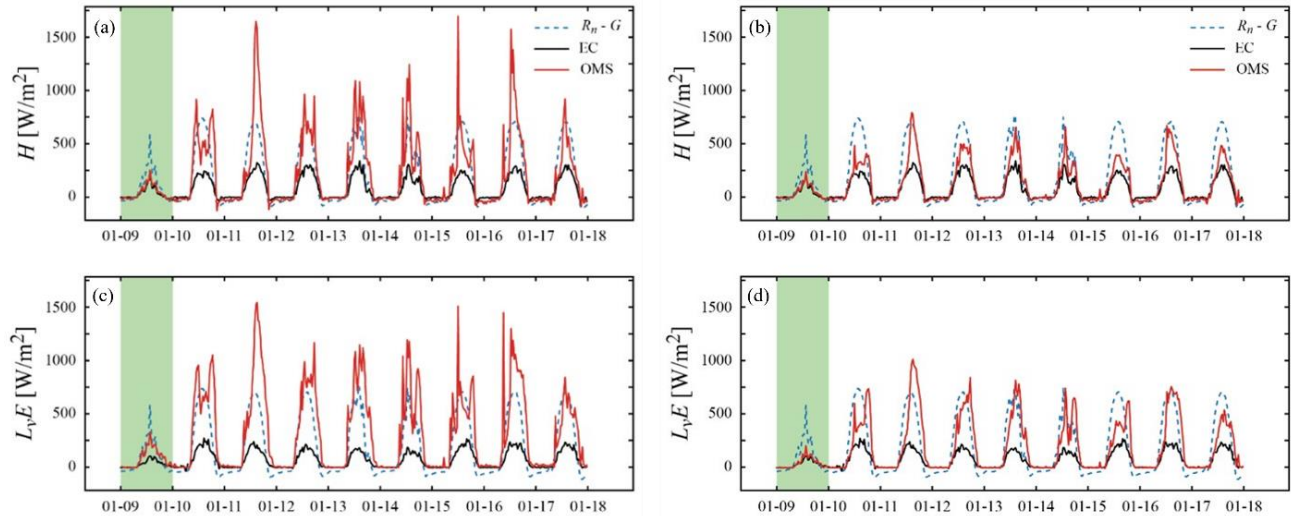


Figura 3. Flujos de calor originales medidos por el EC y el OMS: (a) flujo de calor sensible (H) y (c) flujo de calor latente ($L_v E$); y luego de la limpieza espectral para el OMS: (b) flujo de calor sensible (H); (d) flujo de calor latente ($L_v E$). También se muestra la energía disponible ($R_n - G$, en W/m^2) medida por la estación meteorológica. El fondo verde destaca los resultados obtenidos para el 9 de enero de 2019, que se utiliza para analizar las funciones de similitud de MOST.

La señal promedio es un buen indicador de la calidad de la señal, ya que se espera que sea constante en el tiempo. La Figura 4(a) muestra un análisis de la intensidad de la señal promediada del escintilómetro expresada como $\ln(I/I_{avg})$. Se observan desviaciones evidentes de la señal media a partir del 10 de enero de 2019, que tanto aumenta como disminuye. Estas desviaciones se producen durante las tardes, coincidiendo con las horas en las que Pirque presentó velocidades de viento elevadas (>2 m/s). Es por esto que se trabajó bajo la hipótesis de que la inestabilidad de los trípodes causó vibraciones de las torres como consecuencia del viento, añadiendo contribuciones no deseadas a la señal. Esto también puede haber provocado un desajuste temporal entre transmisor y el receptor, ya que las fluctuaciones de la señal medidas por el receptor se captaron en el borde del equipo al haberse instalado así durante el proceso de alineación. De esta manera, ante mayores velocidades de viento los trípodes inestables pueden haber generado que el haz de luz entrara y saliera constantemente del foco, aumentando las fluctuaciones de la señal y sobreestimando las variaciones medidas en el receptor. No obstante, la vibración de estos trípodes inestables puede afirmarse como la causa más importante de la sobreestimación de las varianzas y, por tanto, de los flujos de calor.

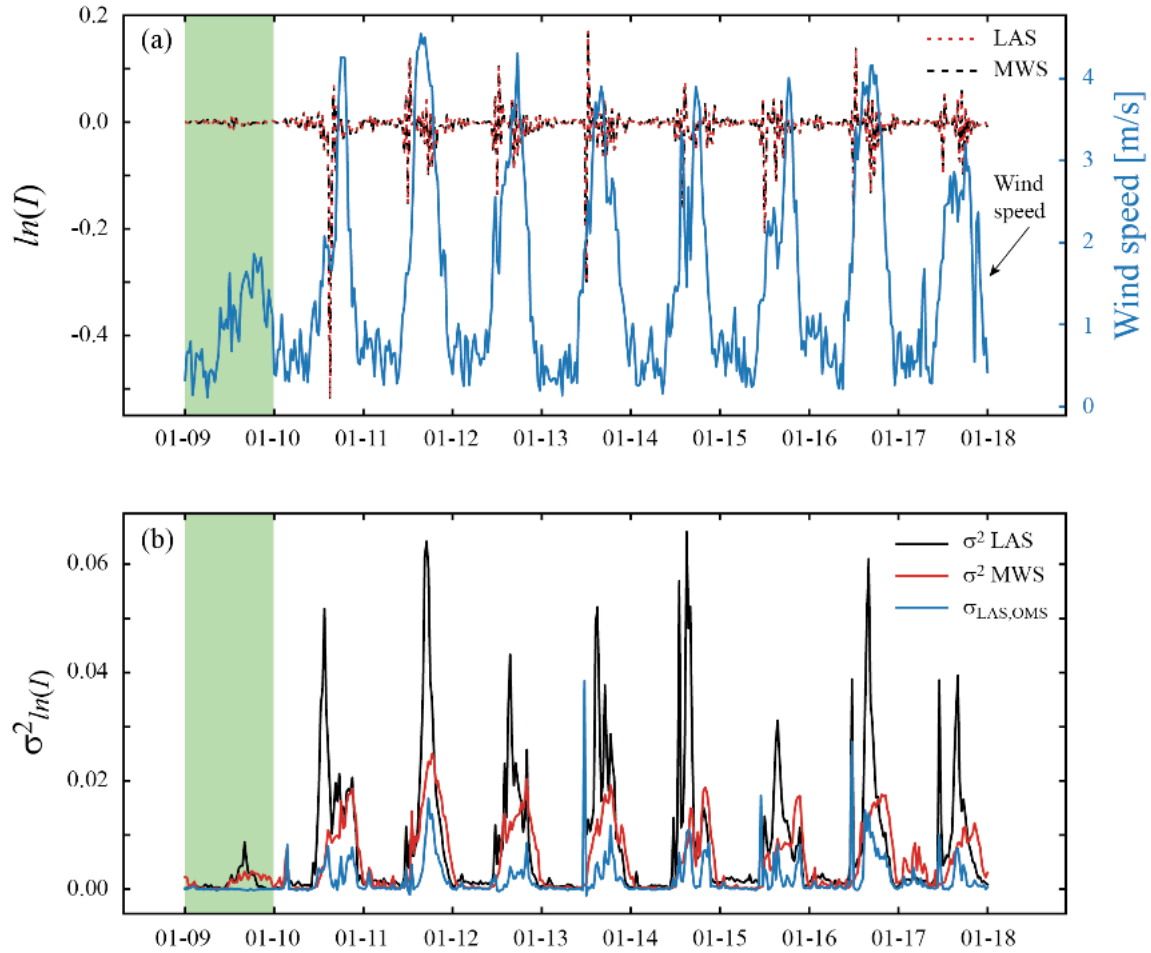


Figura 4. (a) Señales originales de LAS y MWS expresadas como $\ln(I/I_{avg})$ junto con la velocidad del viento medida durante la campaña de campo (b) Varianzas originales de las señales LAS y MWS junto con la covarianza LAS-MWS medida por el receptor durante la campaña de campo.

Las varianzas de las señales del escintilómetro LAS y MWS se calcularon a partir de la señal corregida como el área bajo el espectro (Figura 5, rojo). La limpieza espectral redujo las contribuciones no deseadas, ya que las varianzas después de aplicar cada filtro alcanzan valores más bajos. Sin embargo, la limpieza espectral propuesta en este trabajo no garantiza una limpieza completa de la señal, ya que todavía existen grandes valores de las varianzas observadas entre el 10 y el 17 de enero de 2019. No obstante, las señales mejoran notablemente.

A partir de las varianzas corregidas fue posible recalculer los flujos de calor basados en el OMS (Figura 3(b) y 3(d)). Aun cuando los flujos de calor corregidos tienen magnitudes menores en comparación con los flujos originales, el proceso de limpieza no fue suficiente para mejorar los datos después de que se produjera el desalineamiento (10 de enero de 2019), ya que los flujos siguen siendo demasiado grandes. Para aislar el efecto de las vibraciones del trípode en la señal del OMS y asegurar que los datos no se vean influidos por el desajuste temporal, se realizó el análisis MOST con los datos obtenidos el 9 de enero de 2019.

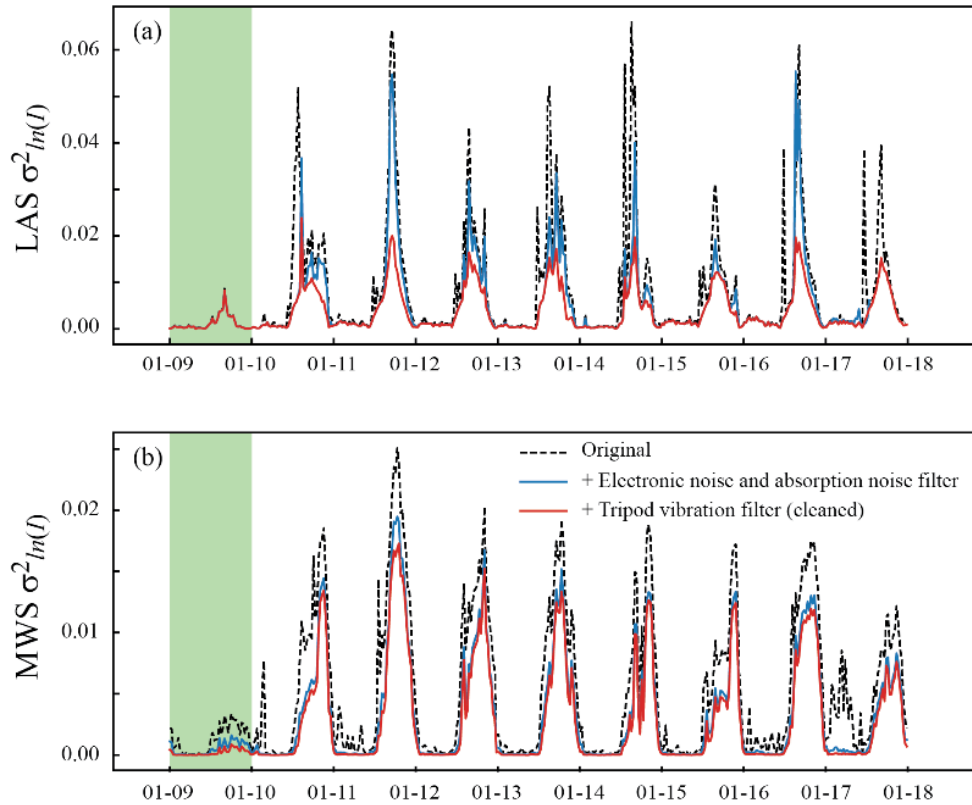


Figura 5. (a) Cambio en las varianzas obtenidas al filtrar la señal LAS. (b) Cambio en las varianzas obtenidas al filtrar la señal MWS. El fondo verde destaca los resultados obtenidos para el 9 de enero de 2019, que se utilizan para analizar las funciones de similitud de MOST.

Los flujos de calor obtenidos con diferentes funciones de similitud de MOST se presentan en la Figura 6. Se encontró a partir de nuestro método que las funciones de similitud MOST propuestas por Kooijmans y Hartogensis (2016) son las que mejor funcionan para describir las condiciones observadas en el viñedo. Como era de esperar, las funciones de similitud MOST propuestas en esta investigación concuerdan mejor cuando se trata de representar $L_v E$, ya que este era el objetivo principal de su desarrollo.

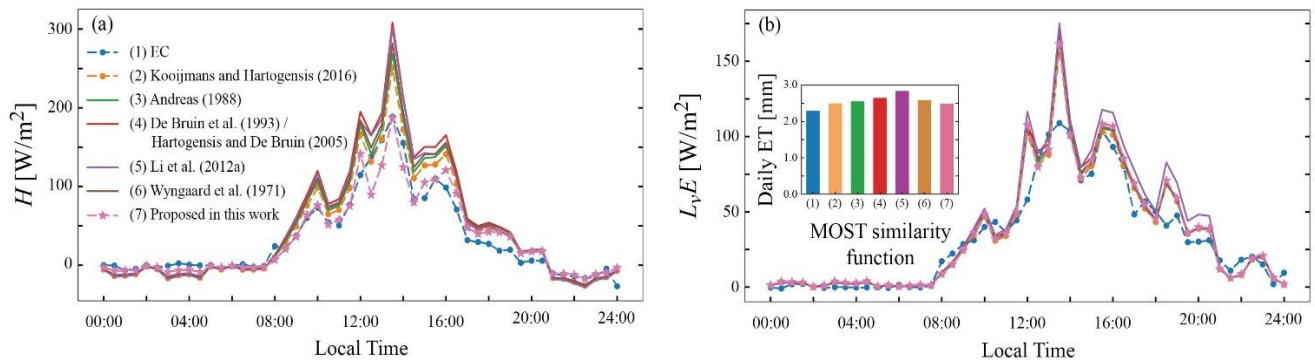


Figura 6. Flujos de calor sensible (H) (a) y latente ($L_v E$) (b) estimados utilizando diferentes funciones de similitud de MOST para el 9 de enero de 2019. El recuadro muestra la ET diaria estimada utilizando las diferentes funciones de similitud de MOST.

4. DISCUSIÓN

Los flujos de calor basados en escintilómetros pueden verse fuertemente alterados cuando el viento afecta la configuración física de la medición. En este trabajo, los flujos de calor irreales obtenidos antes del reprocesamiento de los datos del OMS, se deben principalmente a desviaciones de la señal promedio producto de vibraciones del trípode. Estas vibraciones propiamente tal generaron contribuciones no deseadas a la señal, pero también ocasionaron una desalineación temporal del escintilómetro. Como nuestro análisis espectral mostró contribuciones no deseadas en diferentes frecuencias, se utilizó un método de filtrado espectral para eliminar ruido electrónico, absorción y *peaks* erráticos, y se amplió para eliminar el efecto de las vibraciones del trípode, que es lo novedoso de este trabajo. La eliminación de las fluctuaciones de las vibraciones del trípode no se ha abordado antes, ya que la eliminación de contribuciones no deseadas ubicadas entre las frecuencias ópticas y de microondas utilizadas por los escintilómetros para estimar H y L_vE es un desafío. Sin embargo, pueden duplicar fácilmente la magnitud de $\sigma_{\ln(I)}^2$, influyendo fuertemente en los flujos de calor resultantes. Aun cuando el método de limpieza espectral propuesto en este trabajo no siempre será perfecto, ya que utiliza un enfoque probabilístico para eliminar las contribuciones no deseadas a la señal del escintilómetro, las varianzas corregidas fueron más realistas (Figura 5) después de filtrar los datos y los flujos de calor corregidos concordaron mucho mejor con los resultados obtenidos con el sistema EC (ver Figura 3(b) y 3(c)).

Además de realizar la limpieza espectral de los datos crudos para eliminar las contribuciones no deseadas a la señal, nuestro análisis mostró que para estimar los flujos de calor basados en escintilometría es importante analizar qué función de similitud MOST es la más adecuada para cada campaña de terreno. Dado que la mayor parte de las investigaciones previas disponibles en la literatura científica se refieren a las mediciones de H (De Bruin et al., 1995; Zeweldi et al., 2010; Xu et al., 2013), este análisis es crucial a la hora de estimar L_vE (y en consecuencia ET). Por lo tanto, las funciones de MOST pueden explicar las diferencias entre las mediciones de EC y OMS. En este estudio, las funciones de similitud reportadas por Kooijmans y Hartogensis (2016) para estimar H y L_vE resultaron en una buena concordancia entre las mediciones del EC y del OMS. Sin embargo, las diferentes funciones de similitud utilizadas para determinar L_vE dieron lugar a grandes diferencias entre los dos métodos. De esta forma, las estimaciones basadas en escintilómetros se mejoraron proponiendo una nueva función de similitud, que se basó en las funciones propuestas por Kooijmans y Hartogensis (2016). Por lo tanto, las funciones de similitud pueden producir inexactitudes, especialmente para la cuantificación de L_vE (y ET). En ausencia de funciones de similitud MOST desarrolladas para un sitio específico, recomendamos utilizar las funciones desarrolladas por Kooijmans y Hartogensis (2016), ya que se basan en 11 campañas de terreno y tienen mayores probabilidades de funcionar mejor en una determinada área de estudio.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que hay otros factores que provocan diferencias entre las mediciones del OMS y del EC, los cuales limitan nuestro estudio al ocupar el EC como referencia. En primer lugar, existe una diferencia en cuanto a la huella de medición, ya que los escintilómetros suelen cubrir áreas más grandes que los EC (Foken et al., 2009). En segundo lugar, los sistemas EC no pueden captar los flujos de energía de remolinos más grandes o de circulaciones secundarias que no tocan el suelo o que son estacionarias sobre las mismas estructuras del terreno que las generan, es decir, que eluden el sistema EC (Wilson et al., 2002; Foken et al., 2009). Por lo tanto, los métodos que utilizan el promedio espacial, como los escintilómetros, pueden mostrar una

tendencia a cerrar el balance de energía, lo que se observó en la presente investigación. En tercer lugar, las incertidumbres relacionadas con las variables de entrada de los escintilómetros pueden afectar a los flujos de calor resultantes basados en el centelleo. Estas incertidumbres dependen de la variación espacial de las variables de entrada a lo largo de la longitud de trayectoria, así como del error sistemático de sus estimaciones. Según Hartogensis et al. (2003) y Yee et al. (2015), la instalación y las alturas efectivas tienen un gran impacto en los resultados.

5. CONCLUSIONES

Esta investigación demuestra que vibraciones del trípode que podrían ser causadas por corrientes de viento pueden sobreestimar fuertemente los flujos de calor basados en escintilometría, hasta el punto de alcanzar valores irreales de H y L_vE (y, en consecuencia, de ET). Las corrientes de viento pueden alterar los datos de los escintilómetros a través de (1) las vibraciones del trípode, (2) los desajustes debidos al movimiento del LAS y del MWS, y (3) el ruido electrónico y las contribuciones de absorción a la señal. Por lo tanto, el reprocesamiento de los datos de escintilómetros mediante el análisis espectral propuesto en este trabajo es un paso importante para calcular los flujos de calor al usar esta tecnología. Por lo tanto, los futuros investigadores que puedan enfrentarse a señales de escintilómetros parcial o totalmente dañadas pueden recurrir a este método y recuperar los datos mediante la limpieza propuesta en esta investigación, evaluando el espectro de la señal y determinando las constantes mencionadas para su propio conjunto de datos.

En esta investigación también se comprobó que la selección de las funciones de similitud de MOST afecta a los flujos de calor resultantes, ya que se encontraron diferencias de $\pm 12\%$ en L_vE al utilizar diferentes funciones de similitud MOST. Nuestros resultados muestran que las funciones de Kooijmans y Hartogensis (2016) son precisas para describir el sitio de estudio, ya que se desarrollaron utilizando datos de 11 campañas de terreno diferentes. No obstante, las nuevas funciones de similitud propuestas arrojan mejores resultados para el viñedo de Pirque, ya que son específicas para el sitio. Así, los coeficientes encontrados en esta investigación pueden ser utilizados en otros estudios donde las condiciones meteorológicas y el terreno sean similares al presente caso. Sin embargo, en general, se recomienda ajustar los coeficientes a las características específicas del sitio de estudio.

Dado que los flujos de ET basados en escintilómetros dependen en gran medida de la calidad de los datos crudos, se recomienda encarecidamente aplicar la limpieza espectral, ya que mejora notoriamente los datos, así como garantizar la estabilidad del trípode y la alineación correcta al realizar las mediciones con escintilómetros. Además, es importante entender las limitaciones y diferencias entre las diferentes funciones de similitud utilizadas por la escintilometría, ya que su selección tiene un impacto en el L_vE , que es relevante cuando se cuantifica el ET.

Considerando que el fin último de este trabajo es contribuir al análisis de una potencial tecnología que permitiría cuantificar la evapotranspiración de forma más precisa, este trabajo aporta al objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sustentable, que establece el “garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos”. Específicamente se contribuye a la meta 6.5, que espera “de aquí al 2030 implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda”.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) por el financiamiento de los fondos FONDECYT/1210221, FONDECYT/1210526 y FONDEQUIP/EQM170024, además de específicamente agradecer a la Subdirección de Capital Humano por la beca Doctorado Nacional 2021-21211730. También se agradece al Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS - ANID/FONDAP/15110020) y al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA - ANID/FONDAP/15090013) por apoyar esta investigación. Además, los autores agradecen el apoyo de campo de A. Luque, V. García, F. Medel, M. Lillo, M. Signorio, M. Mendoza, M.C. Muñoz y J. Araya.

REFERENCIAS

- Chovanes, A. E., Gochis, D., & Maxwell, R. (2020). Unraveling groundwater contributions to evapotranspiration in a mountain headwaters: Using eddy covariance to constrain water and energy fluxes in the East River Watershed. *Authorea* [preprint], <https://doi.org/10.22541/au.159559979.93668749>.
- De Bruin, H., Van den Hurk, B., & Kohsiek, W. (1995). The scintillation method tested over a dry vineyard area. *Wageningen Agricultural University, Department of Meteorology, 6701 AP, Wageningen, the Netherlands; Royal Netherlands Meteorological Institute, PO Box 201, De Bilt, the Netherlands*.
- Fratini, G., & Mauder, M. (2014). Towards a consistent eddy-covariance processing: An intercomparison of EddyPro and TK3. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7, 2273–2281.
- Foken, T., Mauder, M., Liebethal, C., Wimmer, F., Beyrich, F., Leps, J.-P., Raasch, S., DeBruin, H. A. R., Meijninger, W. M. L., & Bange, J. (2009). Energy balance closure for the LITFASS-2003 experiment. *Theoretical and Applied Climatology*, 101(1-2), 149-160. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0216-8>.
- Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*, 38(9), 1262-1292. <https://doi.org/10.1175/1520-0450>.
- Hartogensis, O. K., Watts, C. J., Rodriguez, J.-C., & De Bruin, H. A. R. (2003). Derivation of an Effective Height for Scintillometers: La Poza Experiment in Northwest Mexico. *Journal of Hydrometeorology*, 4(5), 915-928. <https://doi.org/10.1175/1525-7541>.
- Hansen, F. V. (1993). Surface roughness lengths. U.S. Army Research Laboratory, 1-41 <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a274550.pdf>
- Hill, R. (1997). Algorithms for obtaining atmospheric surface-layer fluxes from scintillation measurements. *NOAA/ERL Environmental Technology Laboratory, Boulder, Colorado*.
- Kooijmans, L. M. J., & Hartogensis, O. K. (2016). Surface-Layer Similarity Functions for Dissipation Rate and Structure Parameters of Temperature and Humidity Based on Eleven Field Experiments. *Boundary-Layer Meteorology*, 160(3), 501-527. <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0152-y>.
- Li, Kejun & Xu, Jingchen & Gao, Peng-Xin & Yang, L. & Feng, W. & Hongfei, Liang & Zhan, L.. (2012). Why is the solar constant not a constant?. *Astrophysical Journal*. 747. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/747/2/135>.
- Li S., Kang S., Zhang L., Zhang J., Du T., Tong T., Ding R. (2016). Evaluation of six potential evapotranspiration models for estimating crop potential and actual evapotranspiration in arid regions, *Journal of Hydrology*, Volume 543, Part B.

- Meijninger, W. M. L., Hartogensis, O. K., Kohsiek, W., Hoedjes, J. C. B., Zuurbier, R. M., & De Bruin, H. A. R. (2002). Determination of Area-Averaged Sensible Heat Fluxes with a Large Aperture Scintillometer over a Heterogeneous Surface – Flevoland Field Experiment. *Boundary-Layer Meteorology*, 105(1), 37-62. <https://doi.org/10.1023/a:1019647732027>.
- Meijninger, W. M. L., Beyrich, F., Lüdi, A., Kohsiek, W., & Bruin, H. A. R. D. (2005). Scintillometer-Based Turbulent Fluxes of Sensible and Latent Heat Over a Heterogeneous Land Surface – A Contribution to Litfass-2003. *Boundary-Layer Meteorology*, 121(1), 89-110. <https://doi.org/10.1007/s10546-005-9022-8>.
- Mohawesh, O. E. (2011). Evaluation of evapotranspiration models for estimating daily reference evapotranspiration in arid and semiarid environments. *Plant, Soil and Environment*, 57(No. 4), 145-152. <https://doi.org/10.17221/240/2010-pse>.
- Monin, A.S. and Obukhov, A.M. (1954) Basic Laws of Turbulent Mixing in the Surface Layer of the Atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR*, 24, 163-187.
- Parasuraman, K. A. M. B. A. N., Elshorbagy, A. M. I. N., & Carey S. E. A. N. K. (2007). Modelling the dynamics of the evapotranspiration process using genetic programming. *Hydrological Sciences Journal*, 52(3), 563-578. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.3.563>.
- Stoffer, R. (2018). Revisiting raw data processing of combined optical-microwave scintillometers. Wageningen University and Research Msc Thesis.
- Van Kesteren, B., Hartogensis, O. K., van Dinther, D., Moene, A. F., & De Bruin, H. A. R. (2013). Measuring H₂O and CO₂ fluxes at field scales with scintillometry: Part I – Introduction and validation of four methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 178-179, 75-87. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.013>.
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B. E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., ... Verma, S. (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1-4), 223-243. [https://doi.org/10.1016/s0168-1923\(02\)00109-0](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(02)00109-0).
- Wyngaard, J. C., Izumi, Y., & Collins, S. A. (1971). Behavior of the Refractive-Index-Structure Parameter near the Ground*. *Journal of the Optical Society of America*, 61(12), 1646-1650. <https://doi.org/10.1364/josa.61.001646>.
- Xu, Z., Liu, S., Li, X., Shi, S., Wang, J., Zhu, Z., Xu, T., Wang, W., & Ma, M. (2013). Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the Hiwater-Musoexe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(23), 13,140-13,157. <https://doi.org/10.1002/2013jd020260>.
- Yee, M. S., Pauwels, V. R. N., Daly, E., Beringer, J., Rüdiger, C., McCabe, M. F., & Walker, J. P. (2015). A comparison of optical and microwave scintillometers with eddy covariance derived surface heat fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213, 226-239. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.07.004>.
- Zeweldi, D. A., Gebremichael, M., Wang, J., Sammis, T., Kleissl, J., & Miller, D. (2010). Intercomparison of Sensible Heat Flux from Large Aperture Scintillometer and Eddy Covariance Methods: Field Experiment over a Homogeneous Semi-arid Region. *Boundary-Layer Meteorology*, 135(1), 151-159. <https://doi.org/10.1007/s10546-009-9460-9>

INFORMACIÓN AUTOR CORRESPONSAL

Nombre: Francisca Aguirre Correa

Cargo: Estudiante de Doctorado

Institución: Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Dirección: Av. Suecia, 1033, Providencia, Santiago, Chile.

Teléfono: +569 6249 3206

Correo: faguirre2@uc.cl