

Este trabajo tiene licencia bajo CC BY-NC-SA 4.0.

Para ver una copia de esta licencia, visite:

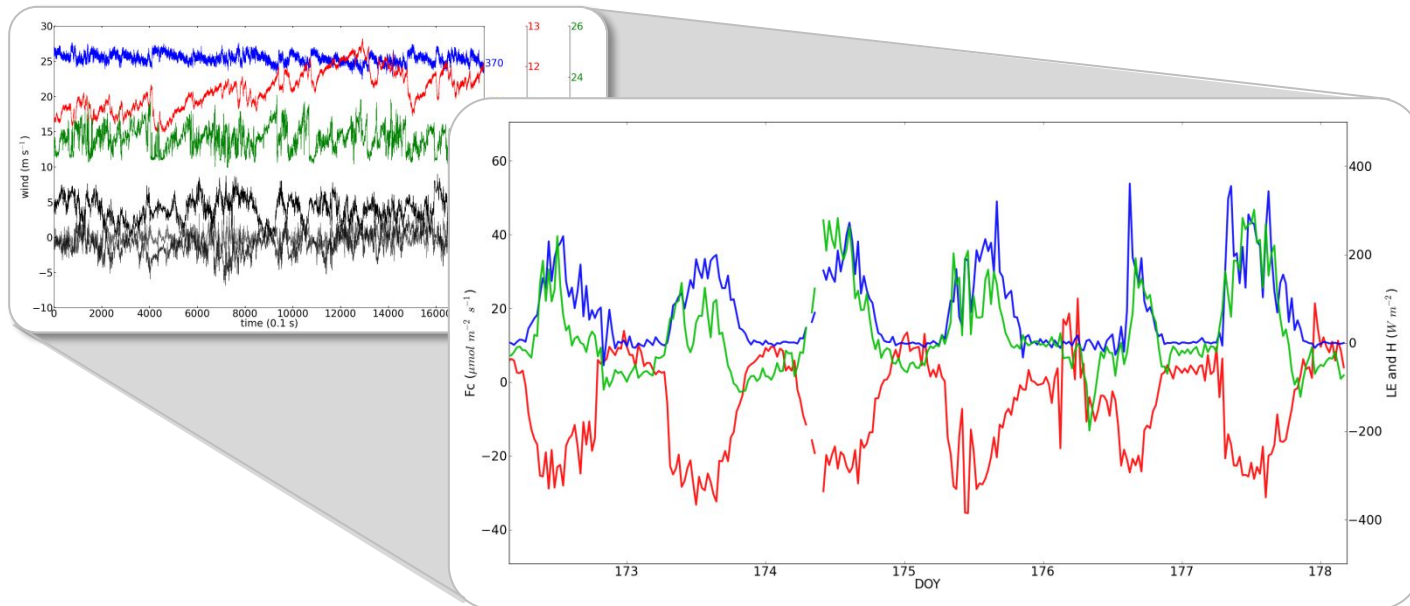
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Para materiales traducidos, le sugerimos dar crédito al autor(es) original y a (los) traductor(es).



EL MÉTODO COVARIANZA DE 'EDDY'

PRINCIPIOS Y FUNCIONAMIENTOS PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS



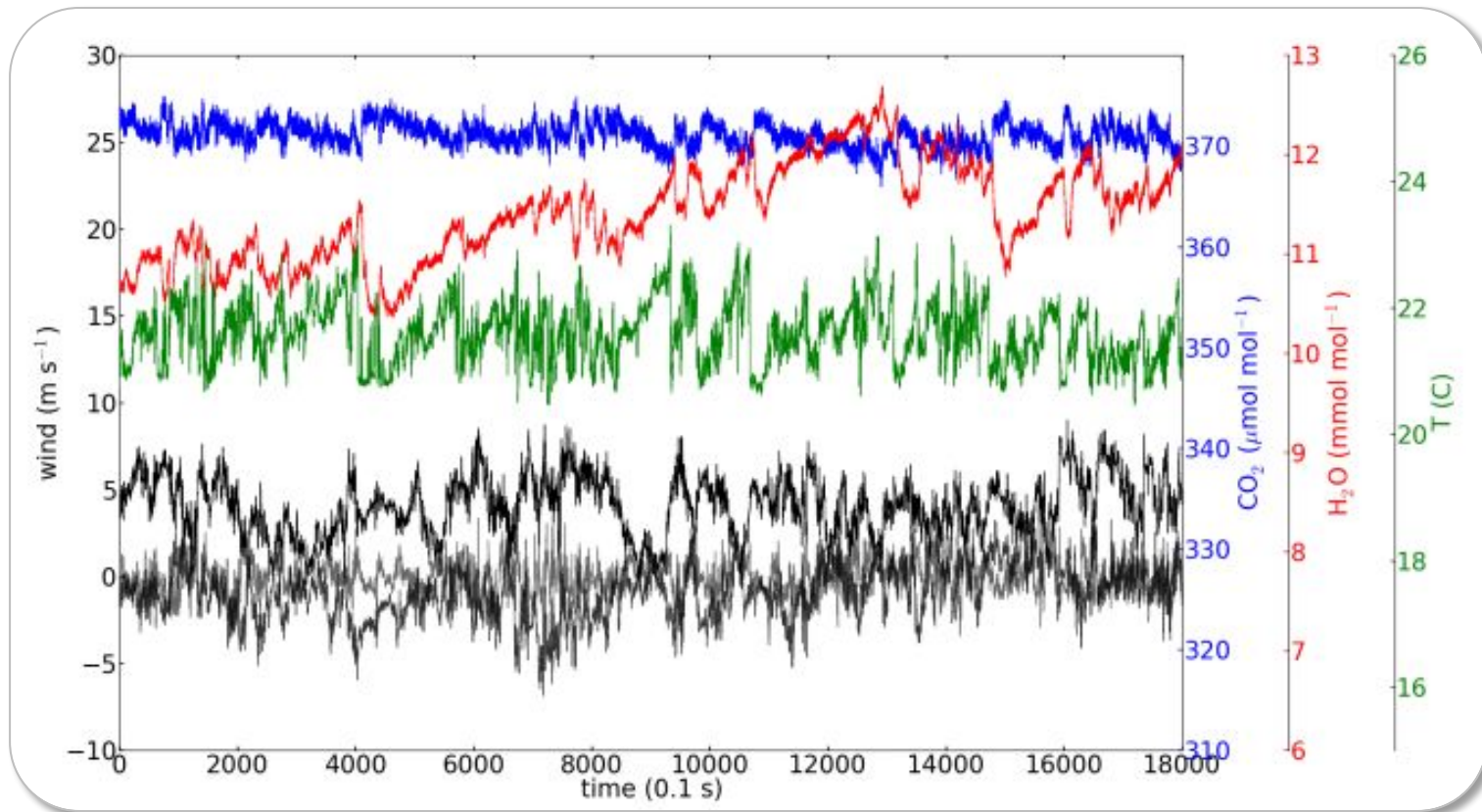
Gerardo Fratini

Principal Scientist, R&D
LI-COR Environmental

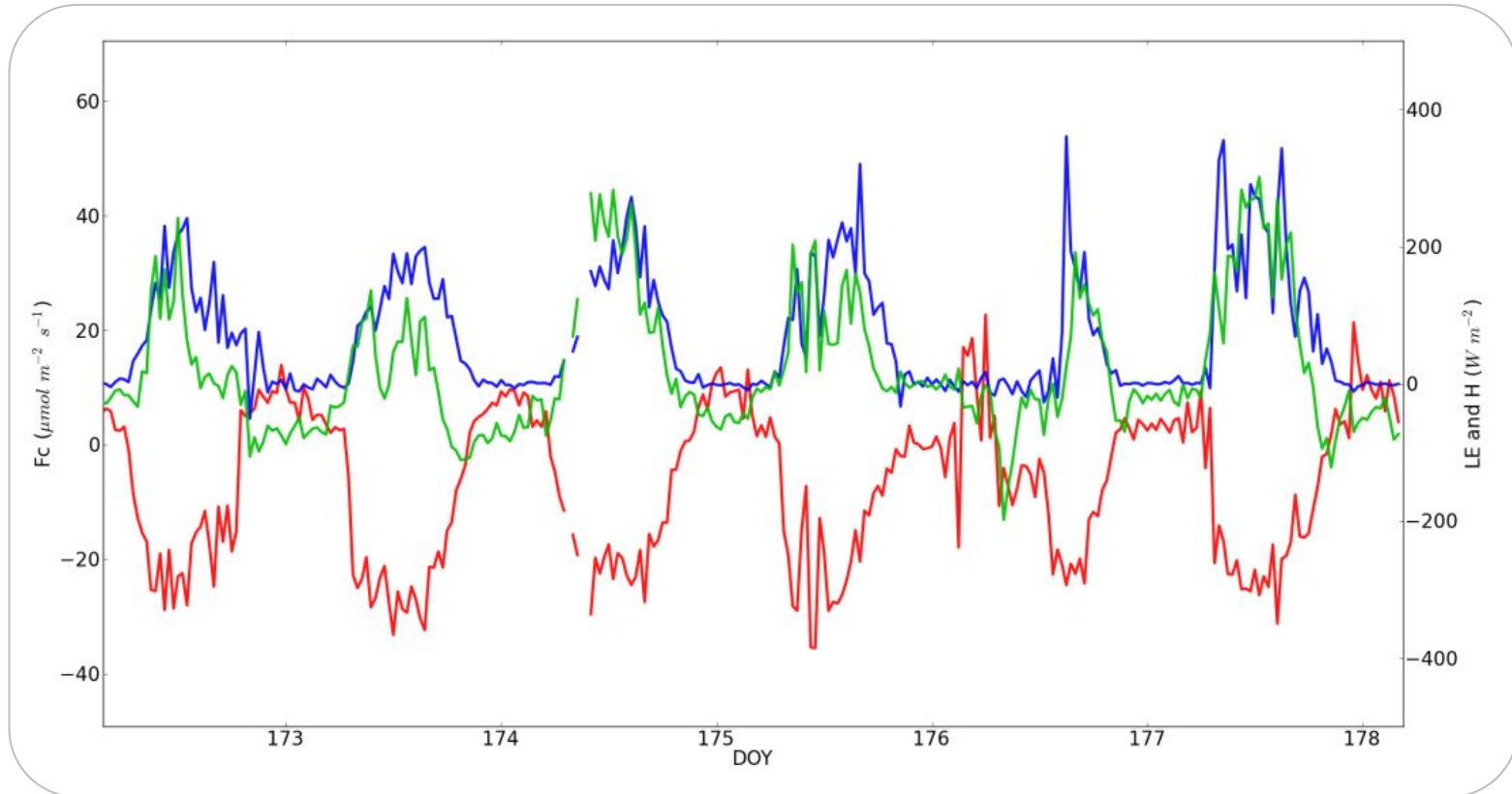
Traducido por Ana Maria Restrepo Acevedo y Jorge Perez-Quezada
(anarestrepo@utexas.edu, jorgepq@uchile.cl)

July 2022

DE ESTO

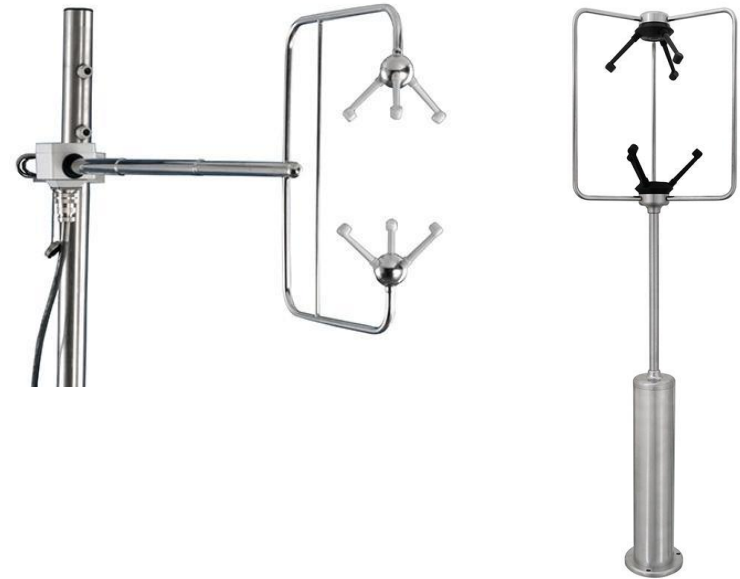


A ESTO



- Introducción a procesamiento de datos de Eddy Covariance
- Datos sin procesar (raw) de Eddy Covariance
- Descripción de los principales datos para el procesamiento

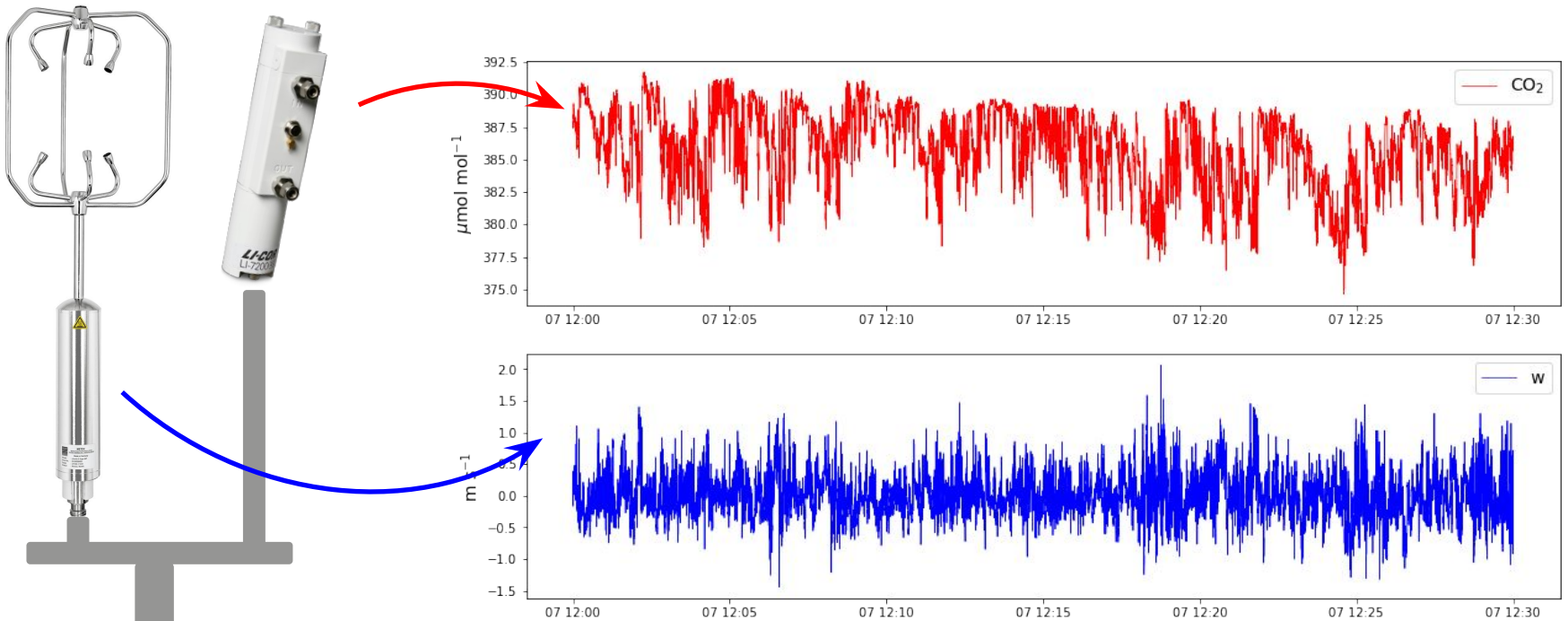
Diferentes instrumentos por diversos fabricantes



Weatherized Analyzers for Field Measurements:

	<p>LI-7500A Open Path CO₂/H₂O Analyzer Measures CO₂ and H₂O in situ. It is the most widely used open path CO₂/H₂O analyzer worldwide.</p>		<p>LI-7200 Enclosed CO₂/H₂O Analyzer Combines the advantages of open and closed path analyzers.</p>		<p>LI-7700 Open Path CH₄ Analyzer Designed for in situ measurements through the extremes of the environment.</p>
--	--	--	--	--	--

En teoría, el cálculo del flujo es simple.



$$F_c = \rho \cdot \overline{w'c'} + \int_{z=0}^{h_m} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz$$

¡Los flujos no se miden, se estiman!

- Instrumentos rápidos y precisos miden datos de alta frecuencia de viento, concentración de gas, temperatura,...
- Instrumentos lentos y precisos miden datos de baja frecuencia de variables biometeorológicas.
- Las mediciones brutas y las estimaciones de flujo iniciales deben corregirse por limitaciones instrumentales, imperfecciones de configuración y condiciones de turbulencia menos que ideales.
- Los flujos deben ir acompañados de 'flags' de calidad y otros medios de evaluación de la calidad.

Fuentes de datos incorrectos que no se pueden corregir

Previsible

- Las mediciones no se realizan dentro de la capa límite de interés.
- El terreno no es horizontal y uniforme: advección
- Distorsión del campo de flujo de aire.

Imprevisible

- El flujo de aire no es completamente turbulento (flujos de advección, almacenamiento)
- La turbulencia no es estacionaria.
- La huella de la torre se extiende más allá del ecosistema de interés.

EC \approx Endless Correction (Corrección interminable)

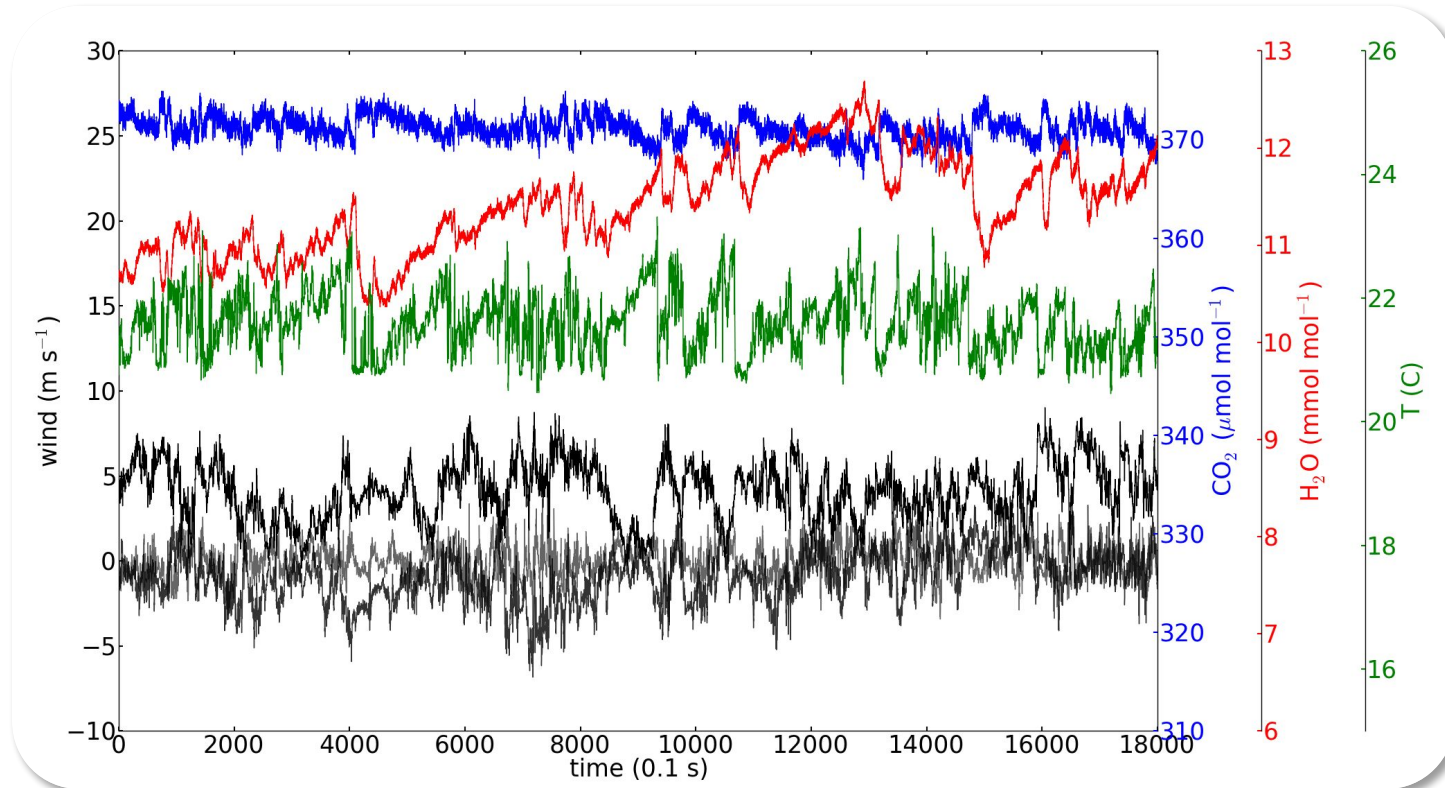
Nosotros “corregimos” por:

- Limitaciones en los instrumentos:
 - La medición del gas es para el parámetro densidad (no la concentración)
 - Respuesta en tiempo finito
 - Volumen de medición finito y presencia de línea de muestreo.
 - Derivas instrumentales
 - Sombra de los transductores
 - Particularidades específicas de la tecnología (LASER, NDIR...)
 - Mal funcionamiento a corto plazo, cortes de energía.

- Limitaciones en campo:
 - Altura de medición
 - Nivelación de los instrumentos
 - Falta de co-locación de instrumentos

Datos sin procesar (raw) Eddy Covariance – Datos rápidos de EC

- Alta frecuencia (1-20 Hz) datos de velocidad del viento 3D, concentración de gases, temperatura, presión, diagnósticos...



Datos sin procesar (raw) Eddy Covariance – Datos rapidos de EC

Timestamp, generalmente no se usa pero vale la pena guardar esta información

Diag	Time	CO2 (mmol/m ³)	H2O (mmol/m ³)	Total_P (kPa)	U (m/s)	V (m/s)	W (m/s)	Ts (C)	CO2_dry (umol/mol)	H2O_dry (mmol/mol)	Cell_T (C)	AGC	Flow_Rate (lpm)
8188	10:30:00:000	12.0261	620.802	95.8138	2.90473	6.58468	2.71233	19.4736	312.336	16.0730	21.4713	81.25	16.6569
8188	10:30:00:100	12.0261	620.54	95.8055	1.74097	7.19173	1.77273	18.9618	312.422	16.1208	21.4799	81.25	16.6569
8188	10:30:00:200	12.0235	623.696	95.8174	0.77521	4.53662	3.64819	19.085	312.383	16.2043	21.5187	81.25	16.6569
8188	10:30:00:300	12.0355	623.392	95.826	-0.0523	6.11955	3.59215	19.481	312.695	16.1964	21.5387	81.25	16.6569
8188	10:30:00:400	12.036	623.114	95.8369	0.81071	5.66003	2.94022	19.4399	312.716	16.1896	21.5845	81.25	16.6569
8188	10:30:00:500	12.0321	625.332	95.8301	0.78082	5.12279	3.16065	19.6566	312.608	16.2469	21.612	81.25	16.6569
8188	10:30:00:600	12.0314	627.345	95.8406	0.61800	6.86488	2.95143	19.2009	312.507	16.2949	21.5217	81.25	16.6569

Las densidades molares de los gases son mediciones de gases "nativos" que siempre se deben almacenar

Componentes de viento 3D, temperatura sónica, diagnóstico.

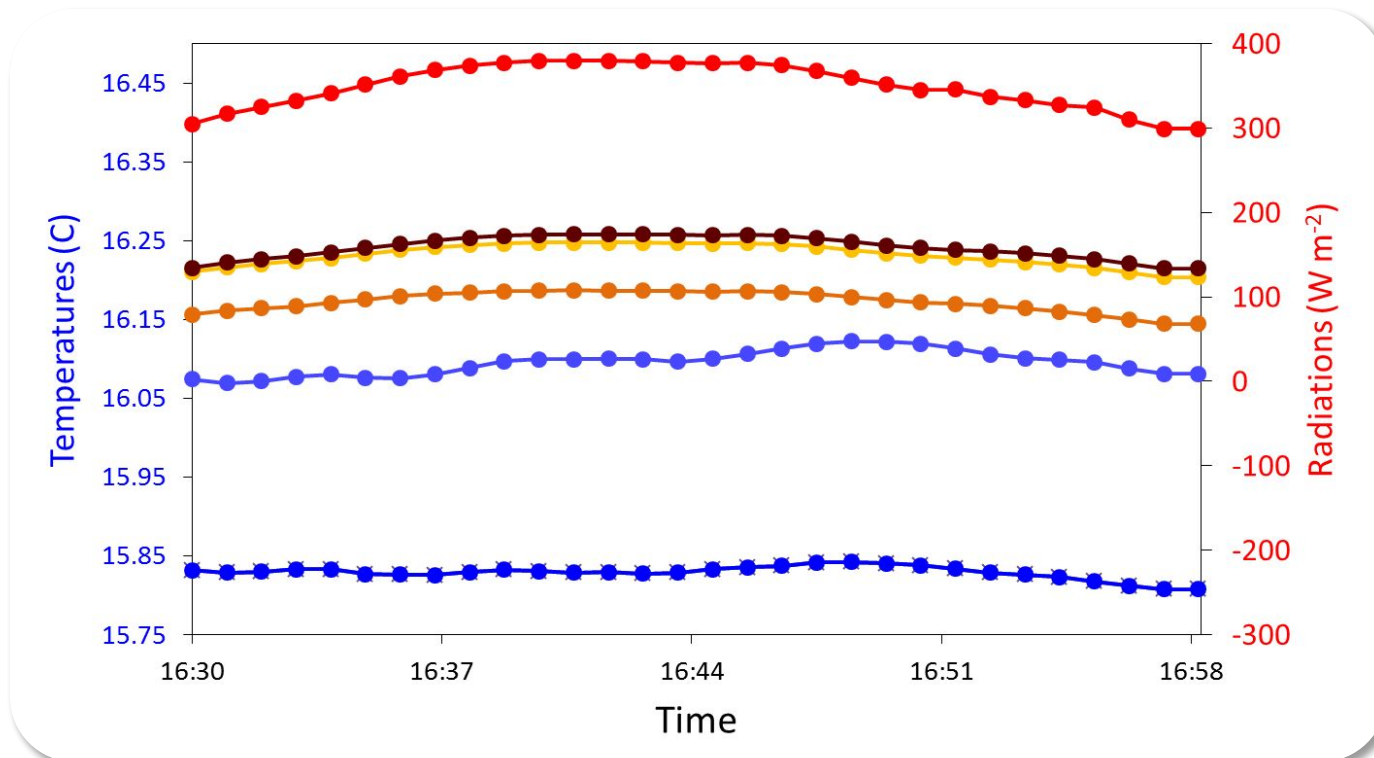
Las concentraciones de gas sólo tienen sentido en instrumentos de paso cerrado/encerrado

Las celdas T y P son esenciales para calcular concentraciones a partir de densidades molares o para aplicar la corrección WPL

La información de diagnóstico (AGC, RSSI) se puede utilizar para filtrar mediciones individuales marcadas por mala calidad.

Datos sin procesar (raw) Eddy Covariance – Datos lentos Biometeorológicos

- Datos de baja frecuencia (<1 Hz) de T, P, RH ambiental, radiaciones, precipitaciones, ...



Datos sin procesar (raw) Eddy Covariance – Datos lentos Biometeorológicos

- Ubicación del emplazamiento, modelos de instrumentos y su despliegue real (altura sobre el suelo, separaciones, frecuencia de adquisición...)



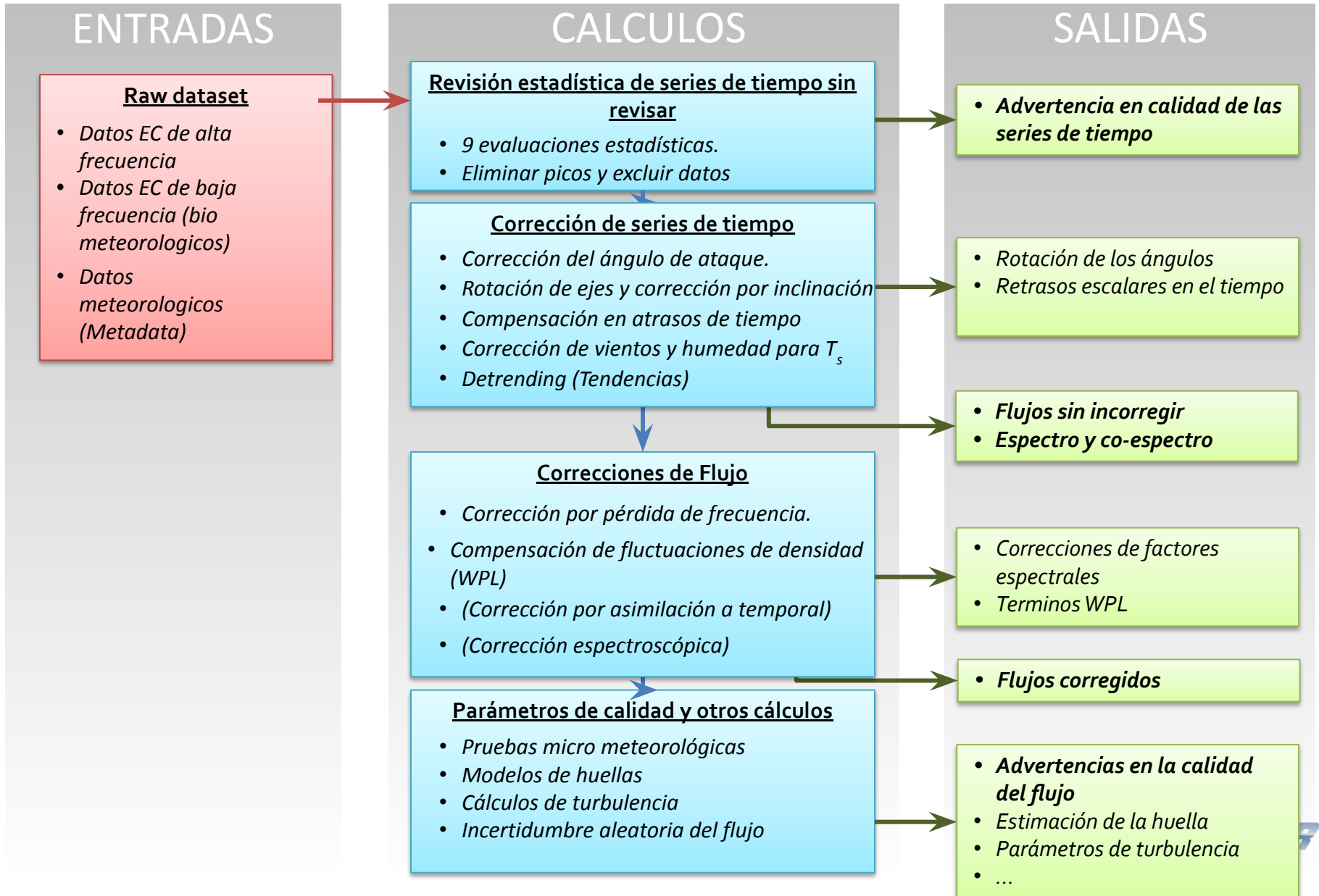
Eddy Covariance Software

- EddyPro®
- TK3
- eddy4R
- EdiRe
- EddyUH
- EasyFlux® DL/PC



- Publicado y mantenido por LI-COR®
- 7000+ usuarios
- 1000+ citaciones en artículos publicados
- Usado y desarrollado por ICOS, AmeriFlux

'workflow' para el procesamiento de datos



Primer Paso

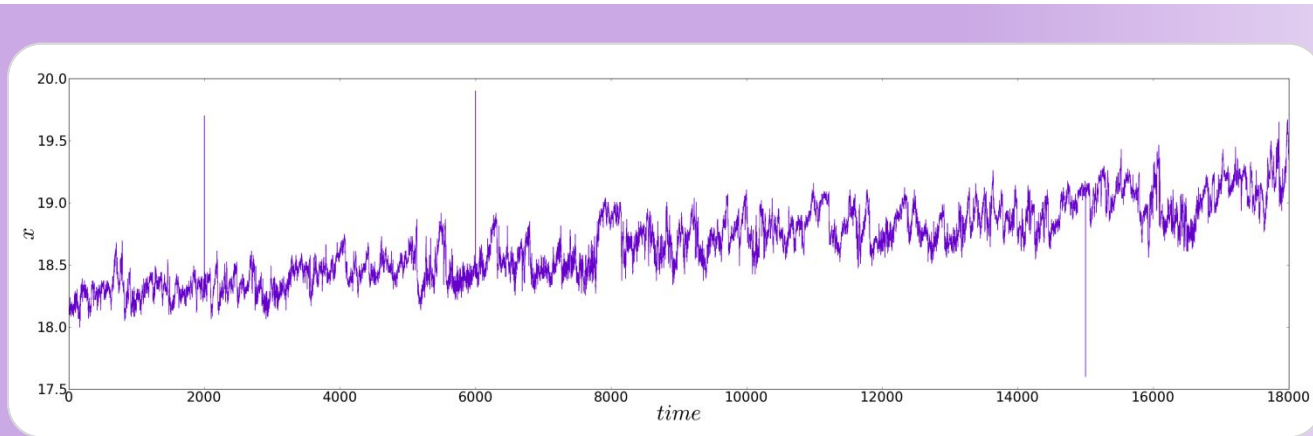
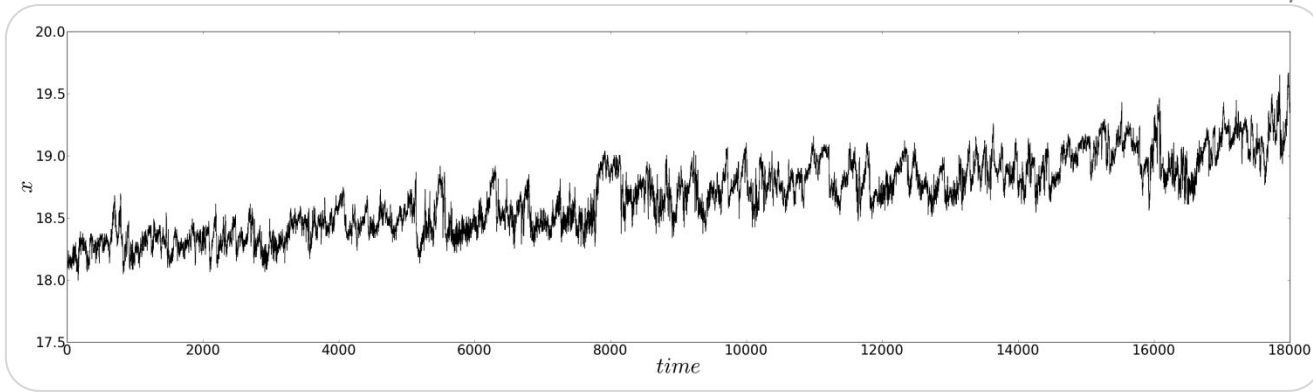
Detección de calidad de series temporales de alta frecuencia y eliminación de valores imposibles

Detectando anomalías en series de datos sin procesar (Ejemplo: Vickers and Mahrt, 1997)

- Intento para detectar diferentes problemas en las series de tiempo
- Proveer advertencia en cada prueba de los datos (buenos/malos), para cada serie de tiempo, para cada archivo sin procesar
- Puede ser usado para “limpiar” los datos sin procesar de las series de tiempo
- Complementar advertencias micro meteorológicas para flujos (QA/QC)

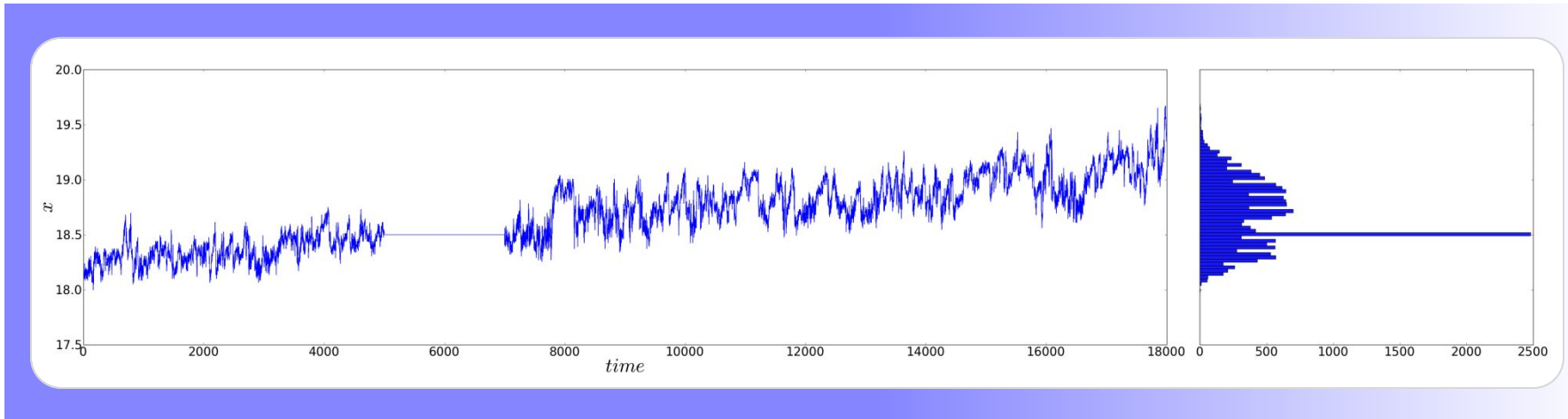
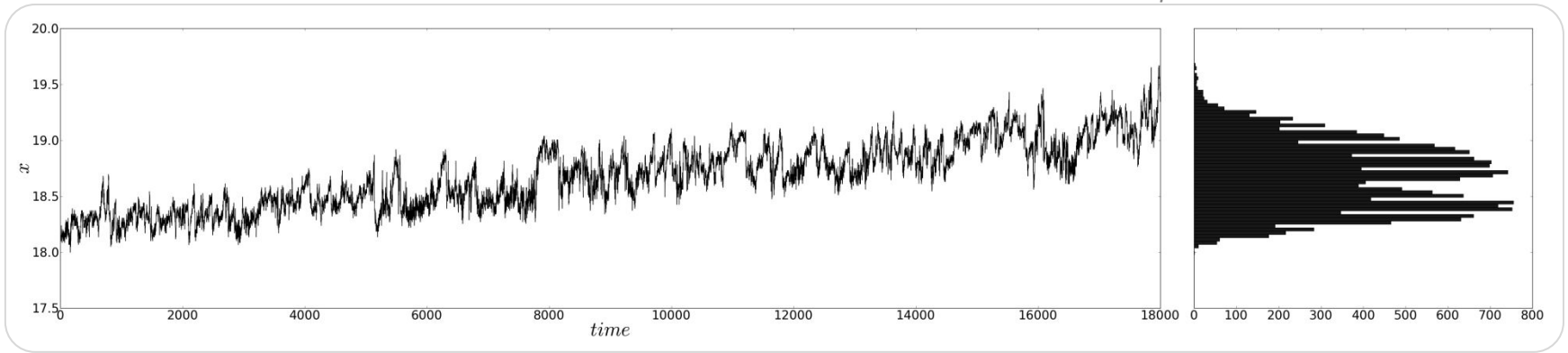
Pruebas de picos

Buena serie de tiempo



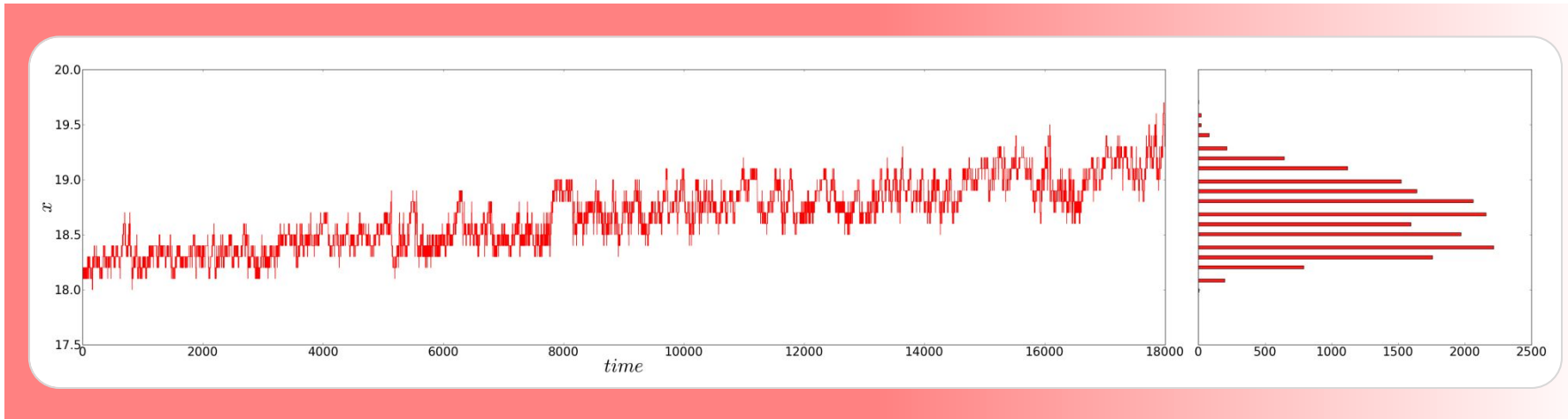
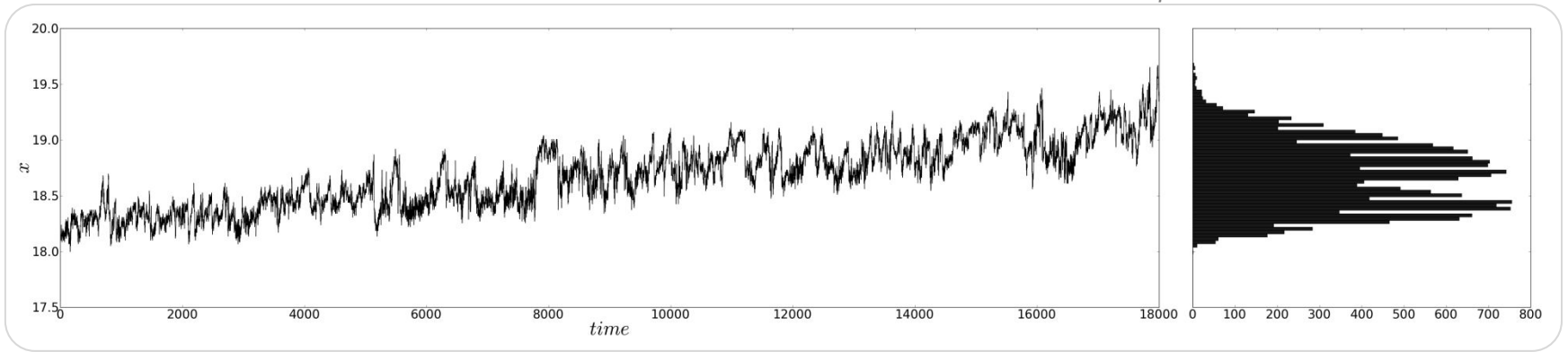
Falta de datos

Buena serie de tiempo



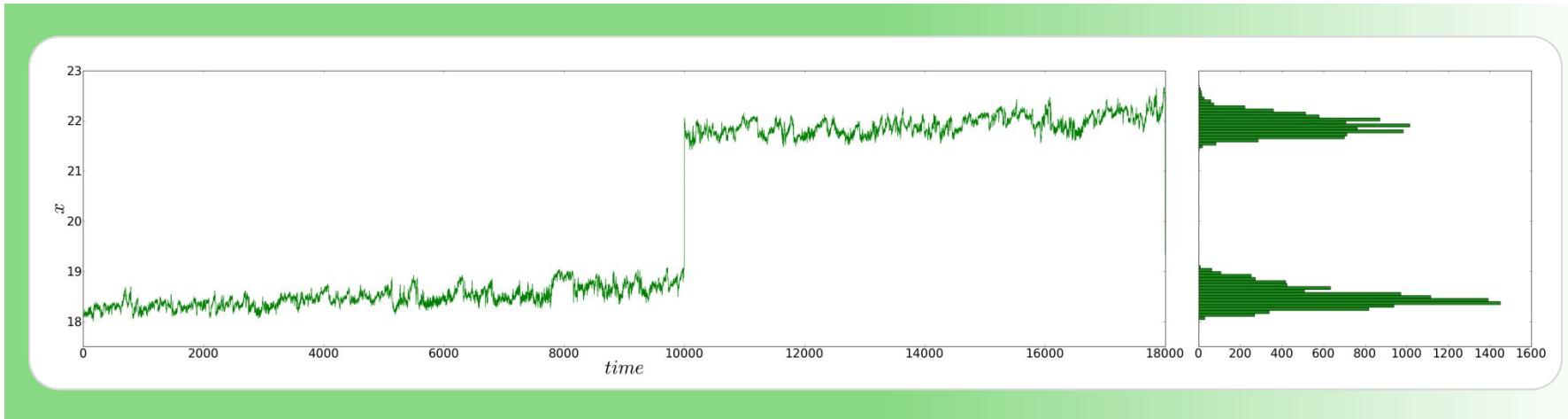
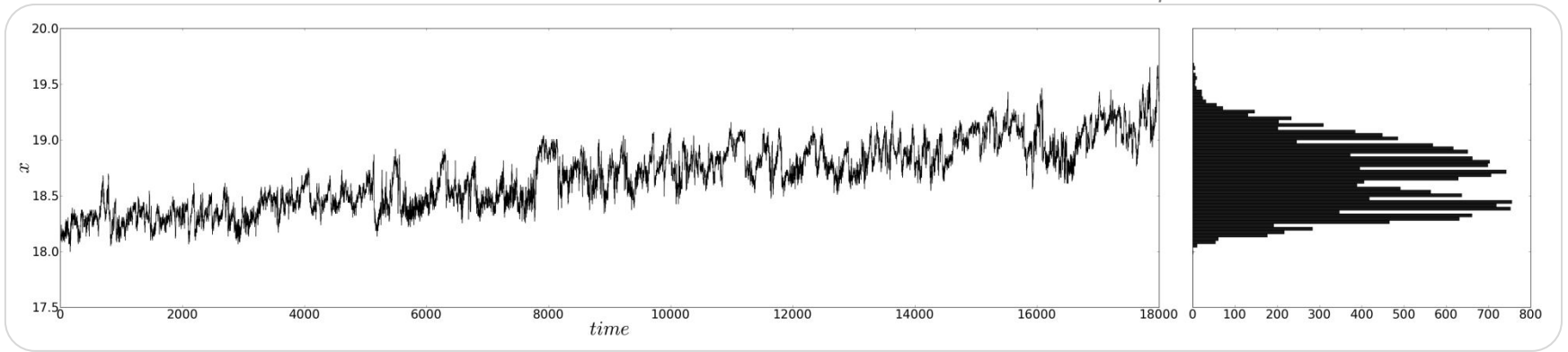
Resolución de amplitud

Buena serie de tiempo



Discontinuidades

Buena serie de tiempo



Other 5 statistical tests

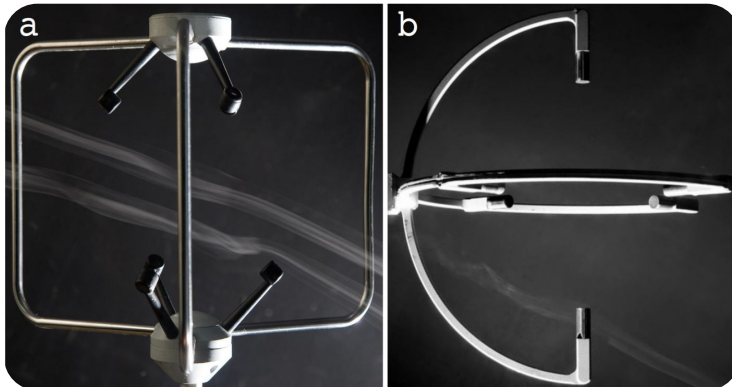
- Las variables no debieran tener valores físicamente imposibles
- Skewness y Kurtosis no debieran desviarse demasiado de la distribución normal
- Ángulo de ataque no debiera ser muy grande para muchos datos
- Retrasos debieran estar cerca de lo esperado
- Series de tiempo no debieran ser no-estacionarias

Segundo Paso

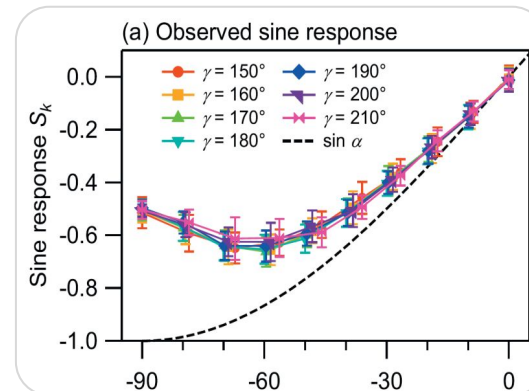
Corrección de series de tiempo por limitaciones de instrumentos y configuración

Corrección del ángulo de ataque

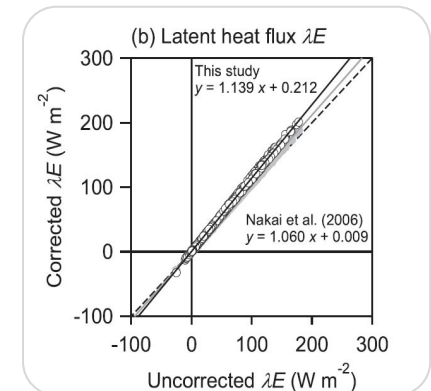
- Corrección de la distorsión de flujo inducida por el anemómetro (sombra)
- Disponible solamente para anemómetros Gill de instalación vertical (R₃, WindMaster)
- Si no se aplica, todos los flujos are subestiman entre 10-15%!



Kochendorfer et al., 2011



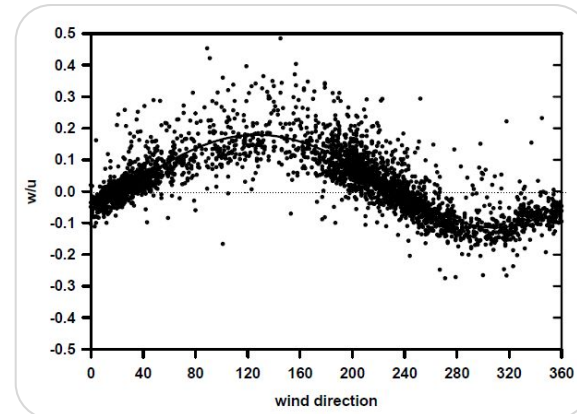
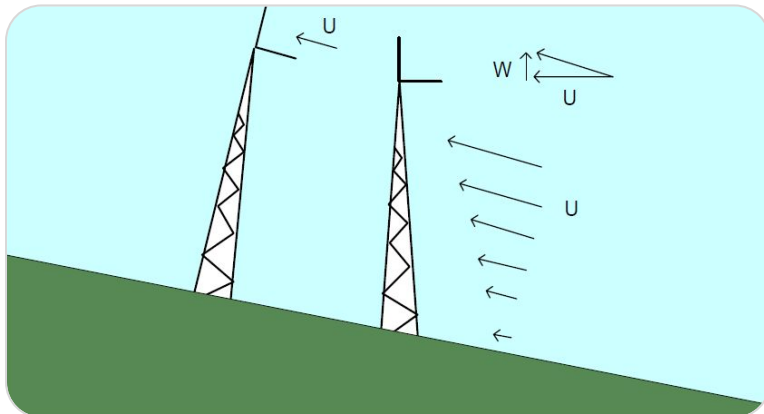
Nakai and Shimoyama, 2012



Nakai and Shimoyama, 2012

Rotación de los ejes y corrección de la inclinación

- Corregir las desalineaciones del anemómetro con respecto a la línea de corriente del flujo local
- Si no se aplica, todos los flujos podrían estar fuertemente sobreestimados
- Corrección de los diferentes enfoques:
 - Rotaciones dobles, rotaciones triples

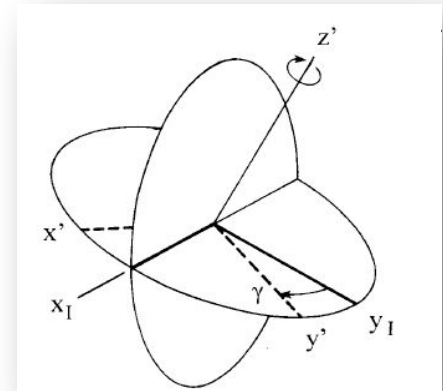


Rotación de los ejes por corrección de inclinación – Doble rotación

- Asume que el promedio del componente vertical del viento es cero en base a 30-min (sin flujos de advección vertical)

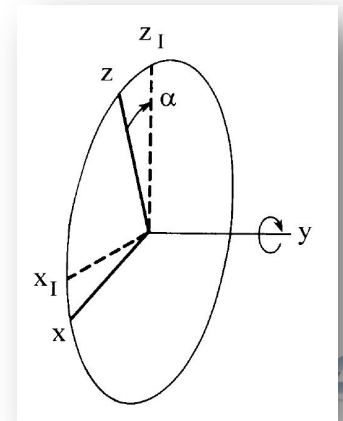
Paso 1: Anular el componente v del vector promedio del viento

$$\begin{cases} u_1 = u_m \cos \gamma + v_m \sin \gamma \\ v_1 = -u_m \sin \gamma + v_m \cos \gamma \\ w_1 = w_m \end{cases} \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{v_m}{u_m} \right)$$



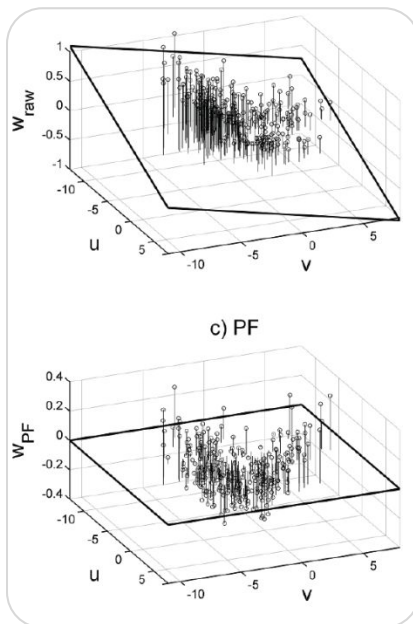
Paso 2: Anular el componente w del vector promedio del viento

$$\begin{cases} u_2 = u_1 \cos \alpha + w_1 \sin \alpha \\ v_2 = v_1 (= 0) \\ w_2 = -u_1 \sin \alpha + w_1 \cos \alpha \end{cases} \quad \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{w_1}{u_1} \right)$$

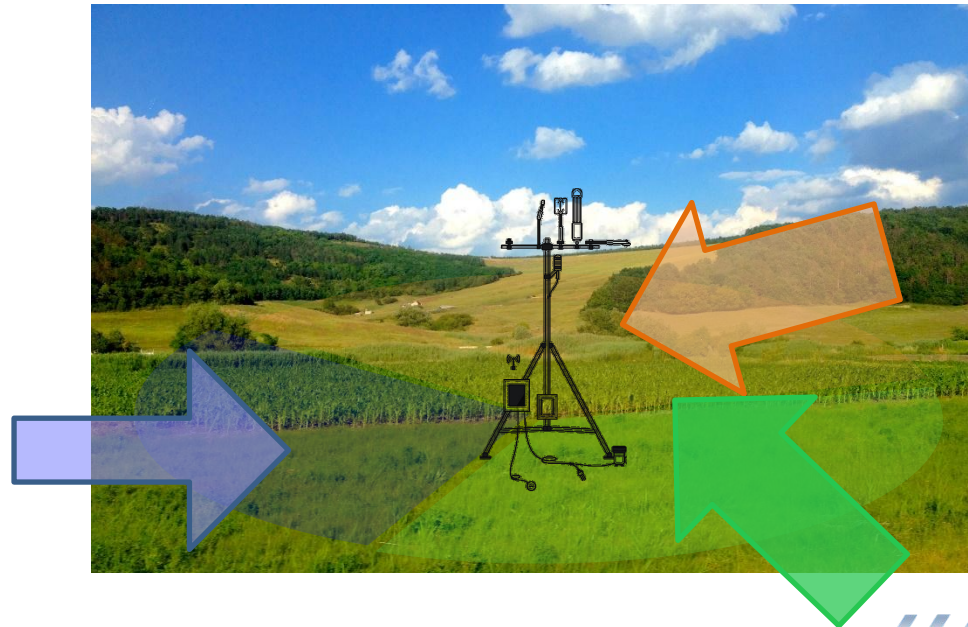


Rotación de los ejes por corrección de inclinación – Ajuste plano sectorial

- Asume que el componente vertical promedio del viento es cero a largo plazo (semanas), no en base a 30 minutos.
- Requiere preprocesamiento de datos para evaluar matrices de rotación



Griessbaum y Schmidt, 2009



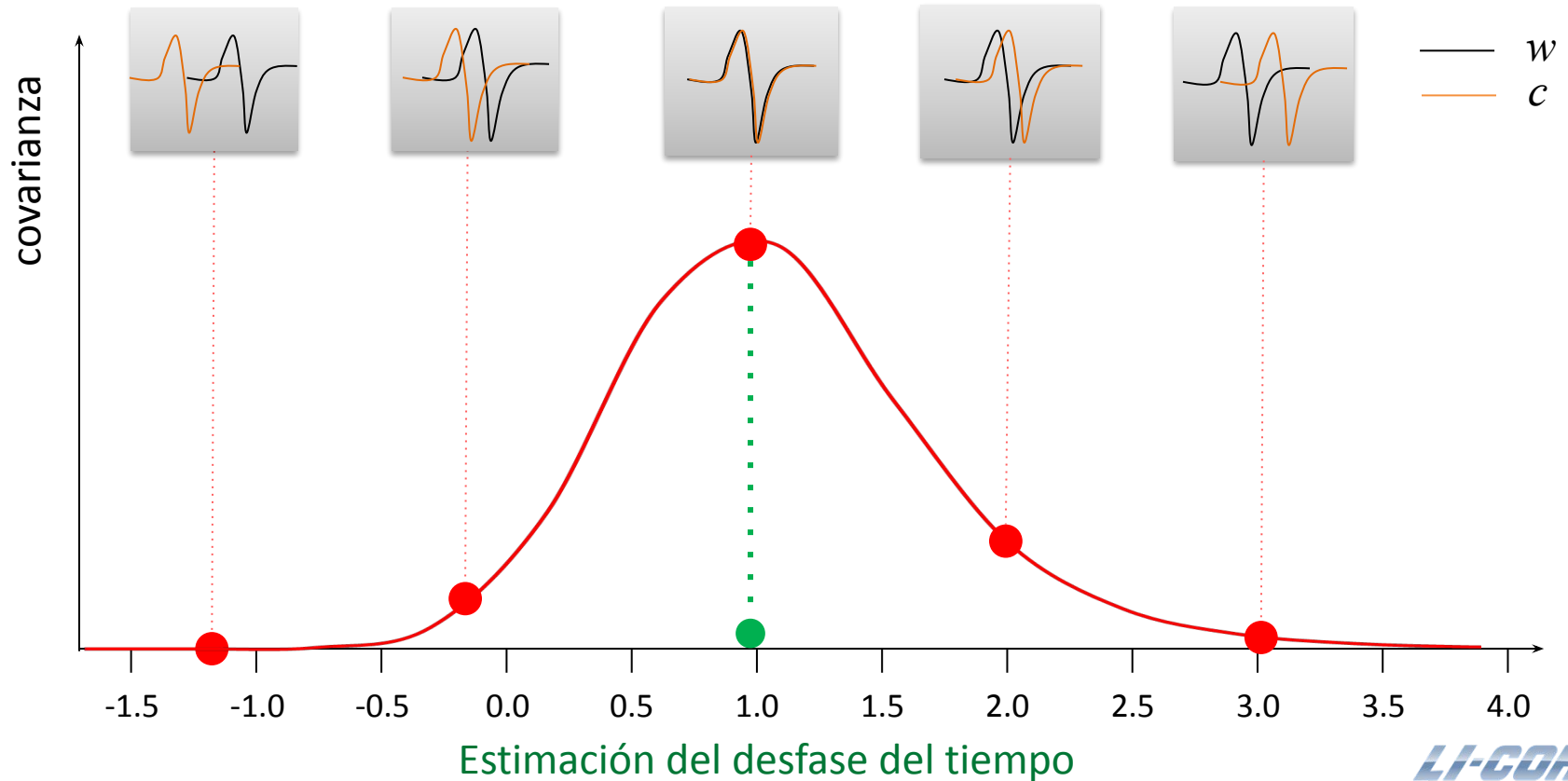
Compensación de retraso de tiempo

- Los retrasos (lags) surgen debido a los sistemas de muestreo de aire, el cambio de fase de la señal y la separación de los instrumentos.
- Si no se compensa, llevará a una subestimación sistemática del flujo.
- El procedimiento de maximización de la covarianza se utiliza para calcular los desfases automáticamente.



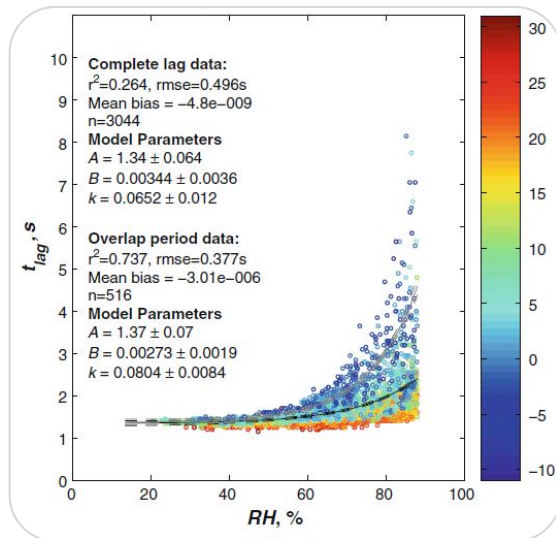
Maximización de la covarianza

- Imponemos un rango de desfases artificiales (plausibles) entre las series temporales de w y la concentración de gas, y determinamos el desfase temporal que maximiza la covarianza.

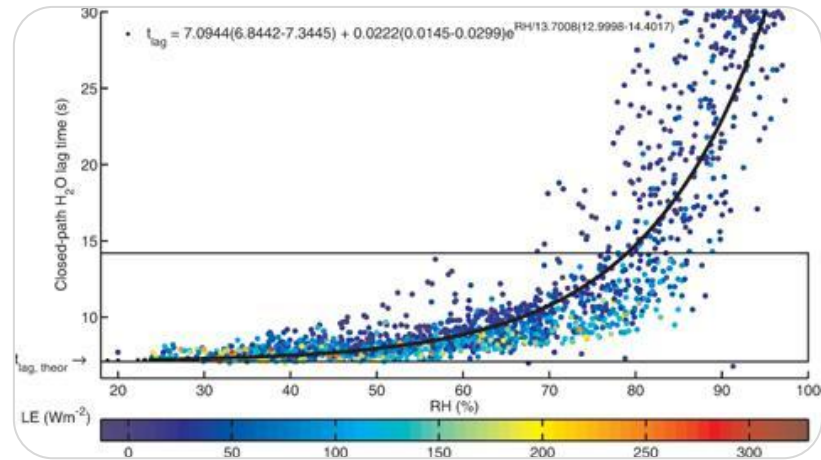


El caso especial del vapor de agua en sistemas de camino cerrado. (closed path)

- Al ser un gas “pegajoso”, el tiempo de recorrido del H₂O en la línea de muestreo depende de la humedad relativa (y secundariamente de la Temperatura).
- La maximización de la covarianza debe adaptarse para tener en cuenta dicha dependencia.



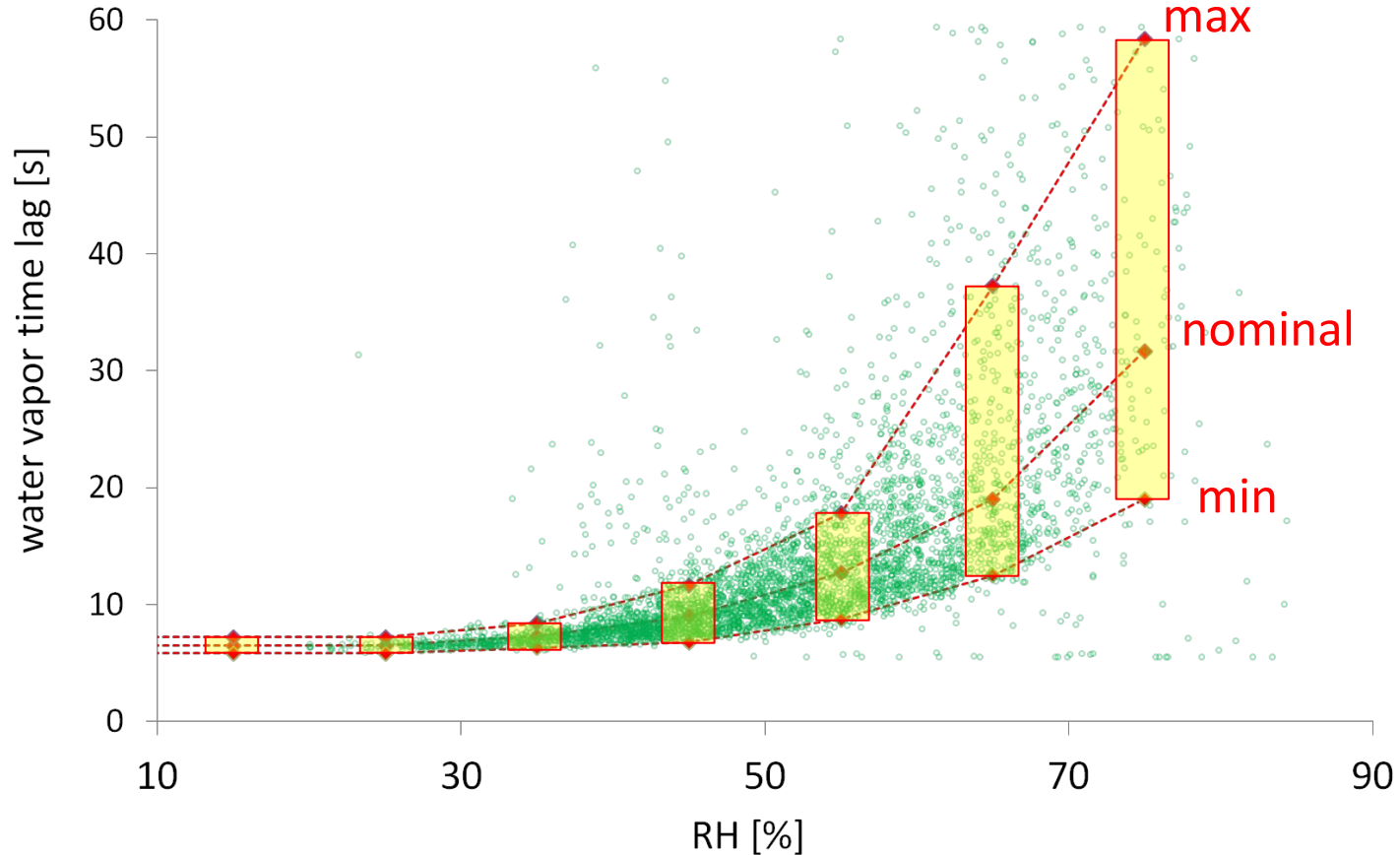
Runkle et al. (2012, BLM)



Nordbo et al. (2012, Tellus B)

Optimizador de retraso de tiempo

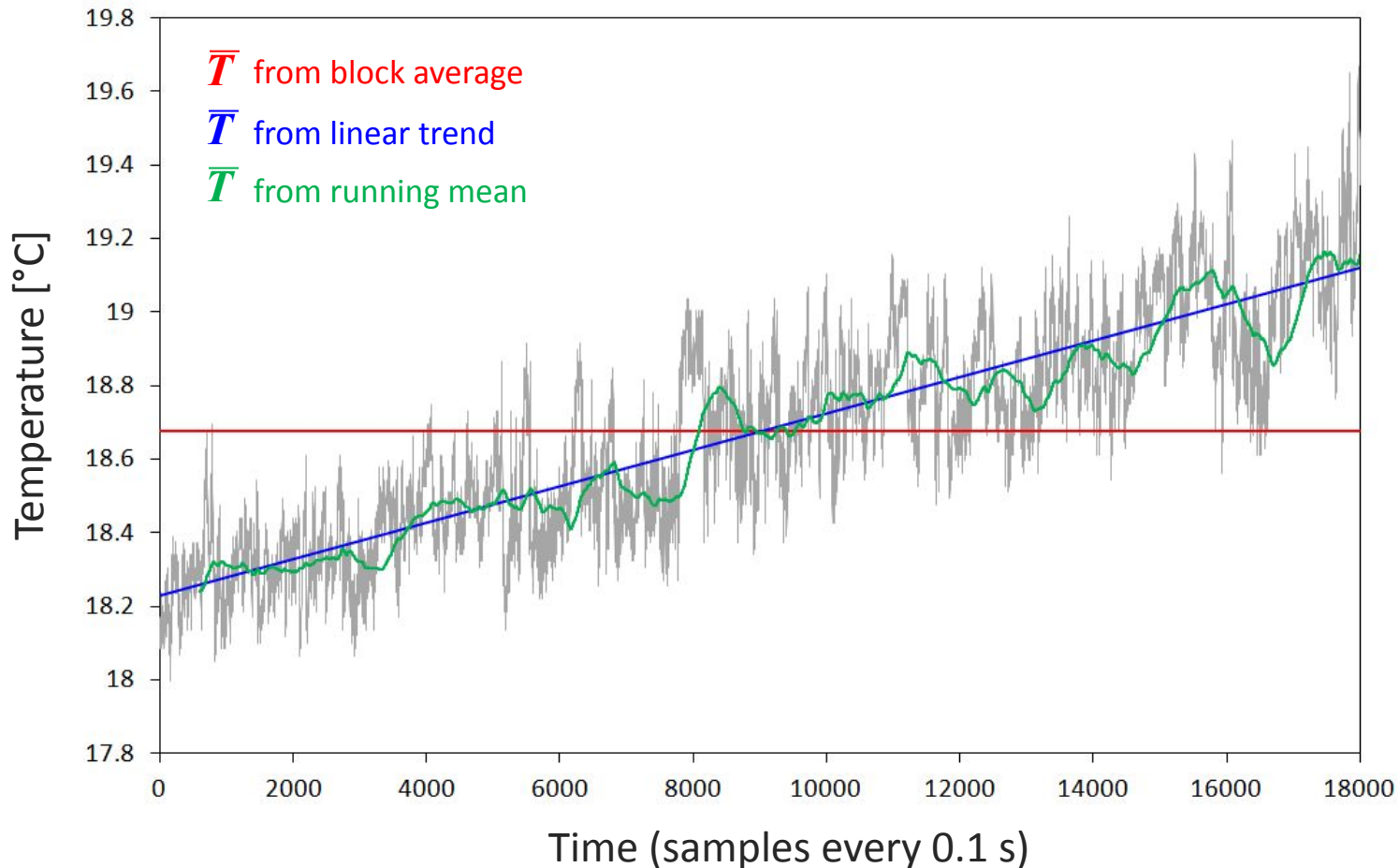
- Un paso de preprocesamiento para una evaluación in situ de la dependencia del retraso del H₂O de la Humedad Relativa (RH)



Detrending

- Cálculo de fluctuaciones turbulentas (eliminación de tendencias no turbulentas)

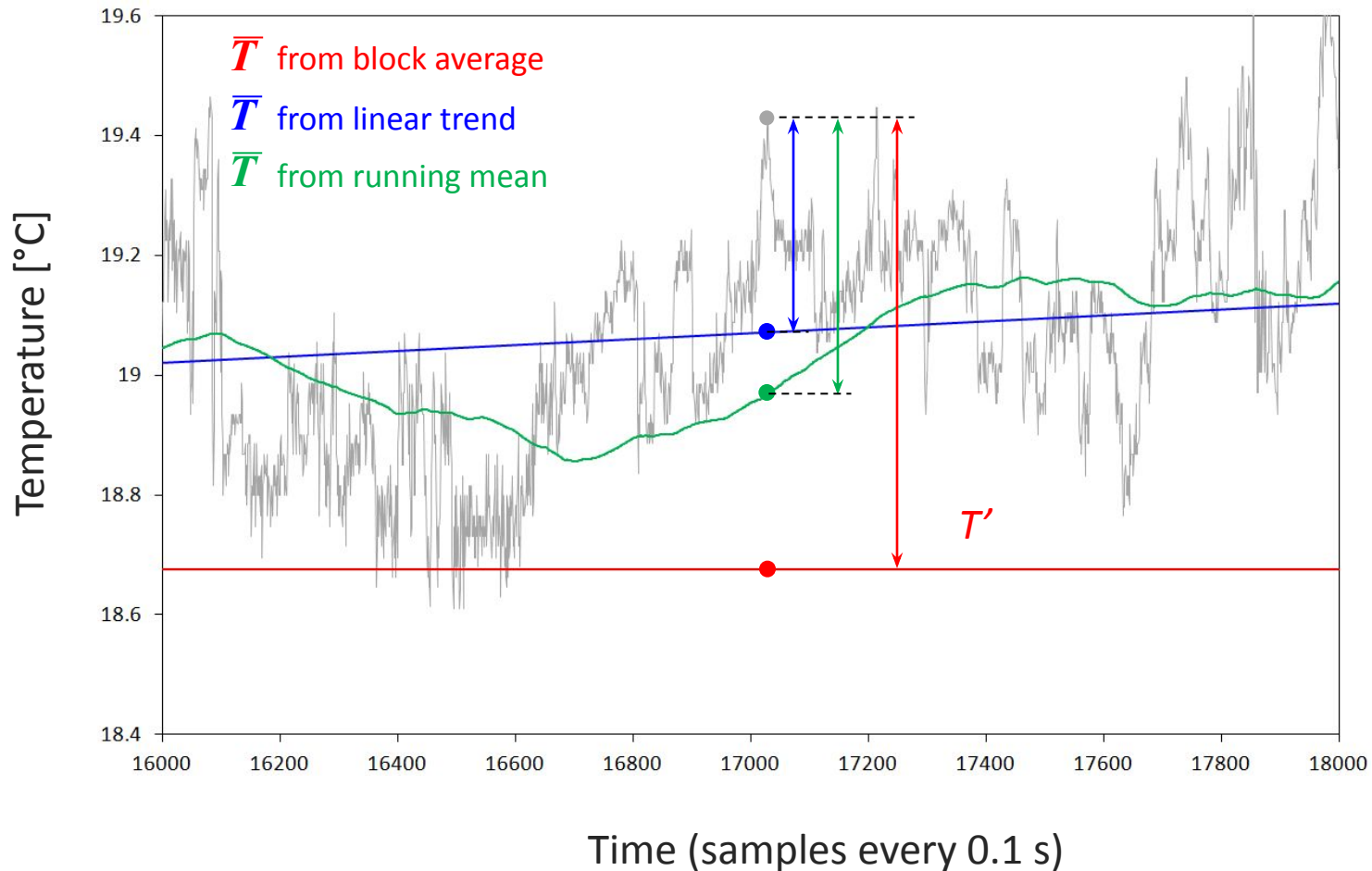
$$H = \rho c_p \overline{w'T'} \quad T' = T - \bar{T}$$



Detrending

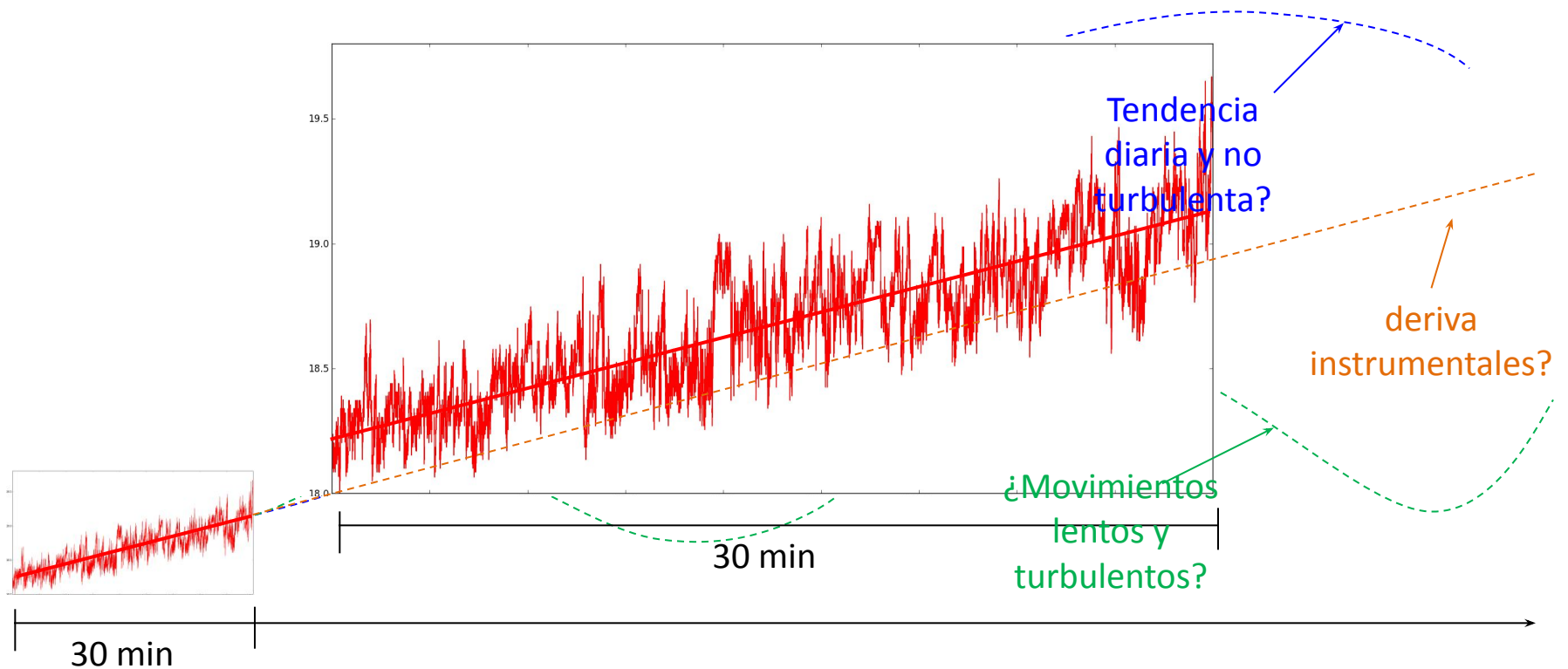
- Calculation of turbulent fluctuations (elimination of non turbulent trends)

$$H = \rho c_p \overline{w'T'} \quad T' = T - \bar{T}$$



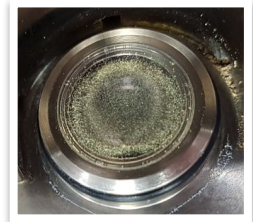
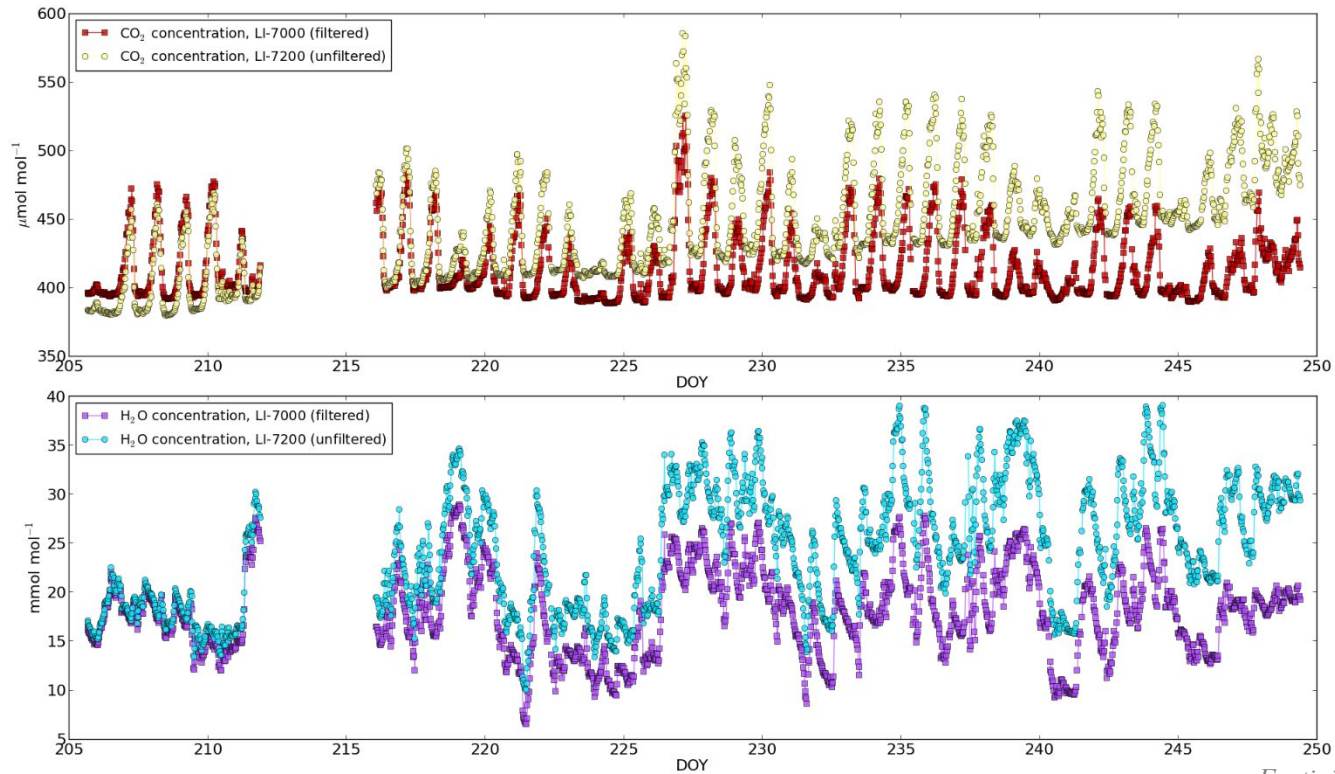
Detrending

- ¿Se pueden esperar movimientos a largo plazo (30 minutos), o deben interpretarse como tendencias no turbulentas?



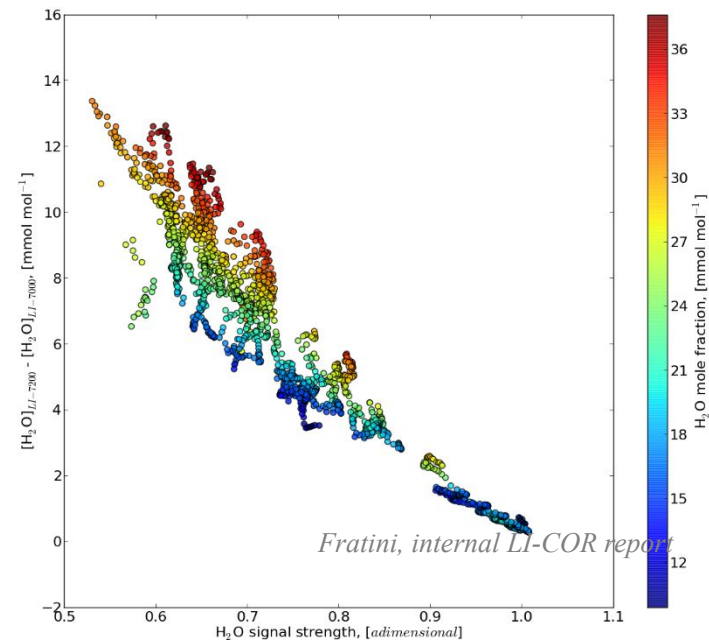
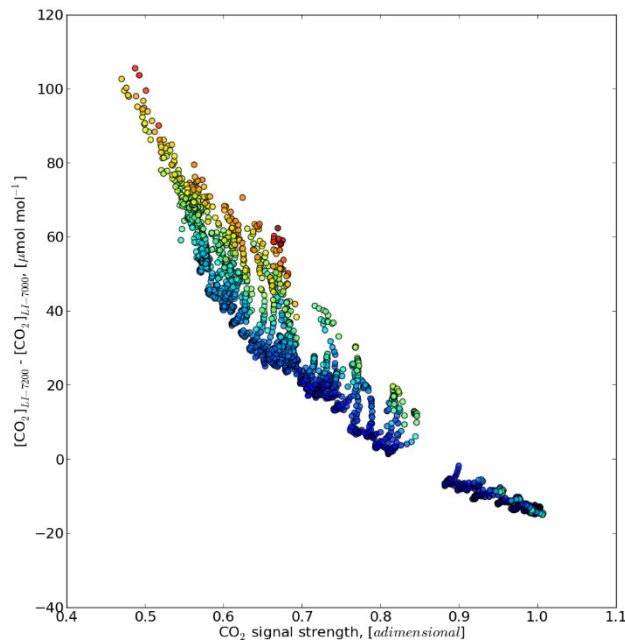
Instrumental drift

- Los instrumentos de vía abierta (open path) y de vía cerrada (closed path) sin una protección adecuada están sujetos a contaminación.
- Si la ruta óptica está obstruido por contaminantes, la medición de la concentración puede verse afectada (normalmente se muestra como una derivada en el tiempo)



Deriva Instrumental

- Para dinámicas con patrones claros y “valores de referencia” (por ejemplo, CO₂ atmosférico), las derivas se pueden reconocer fácilmente. Para el H₂O es mucho menos obvio.
- Los efectos de la contaminación dependen del tamaño de los contaminantes, del índice de refracción efectivo, etc.
- RSSI (intensidad de la señal) es un proxy, pero no siempre confiable.

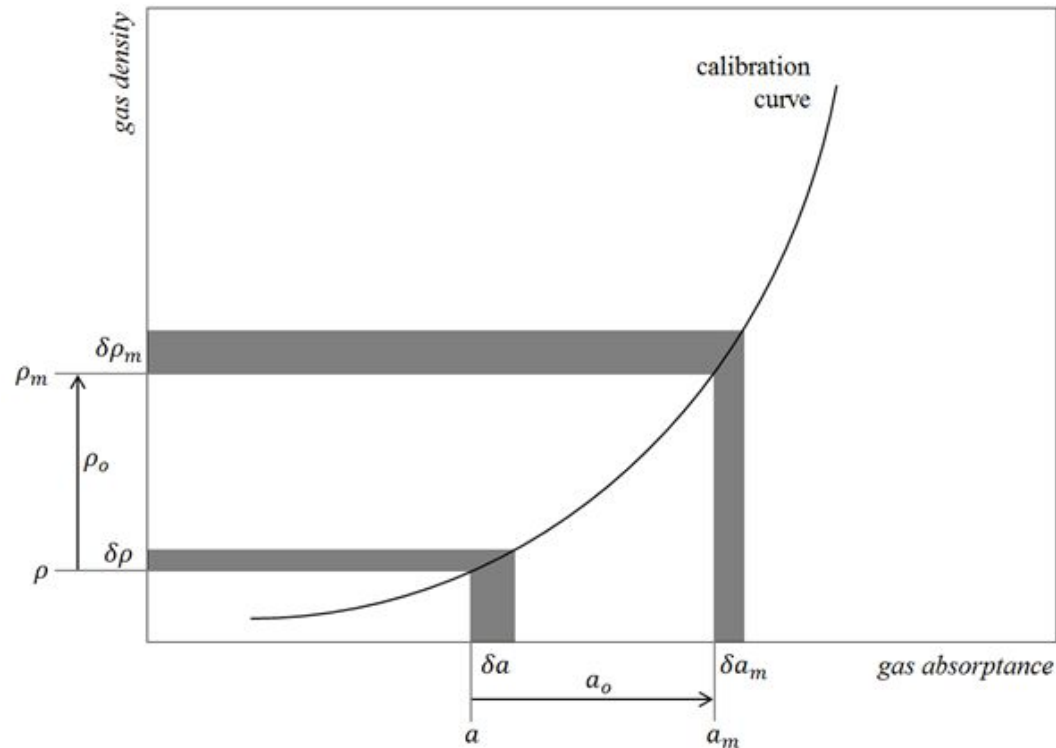


Deriva Instrumental

- Se cree comúnmente que los errores en las concentraciones medias no sesgan los flujos resultantes.

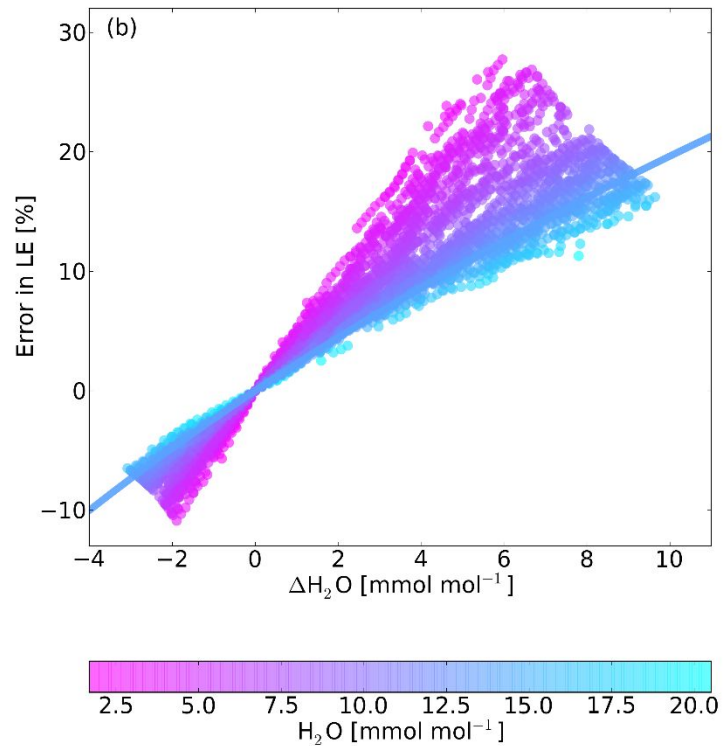
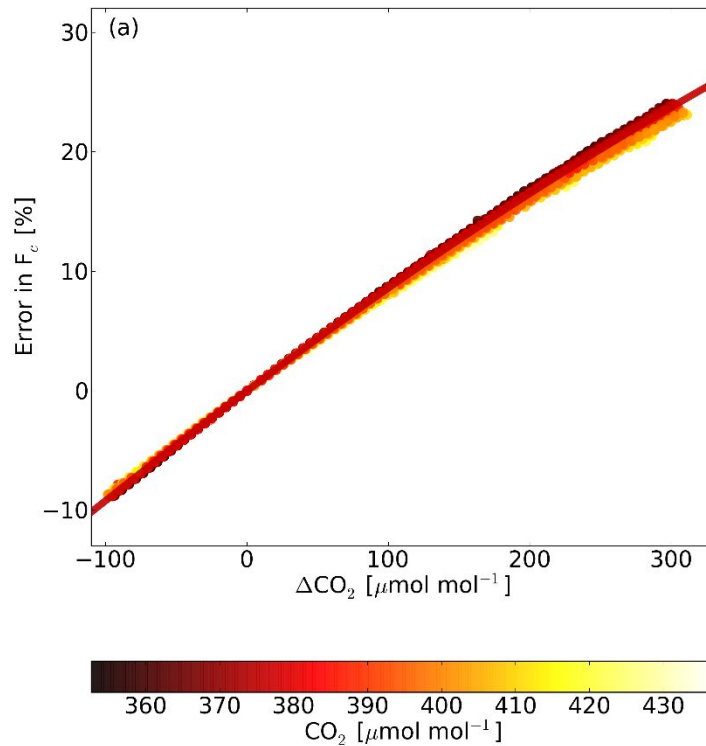
Después de todo: $F = \overline{\rho_a} \cdot \overline{w'c'}$

En realidad, debido a la no linealidad de las curvas de calibración, esto no es cierto:



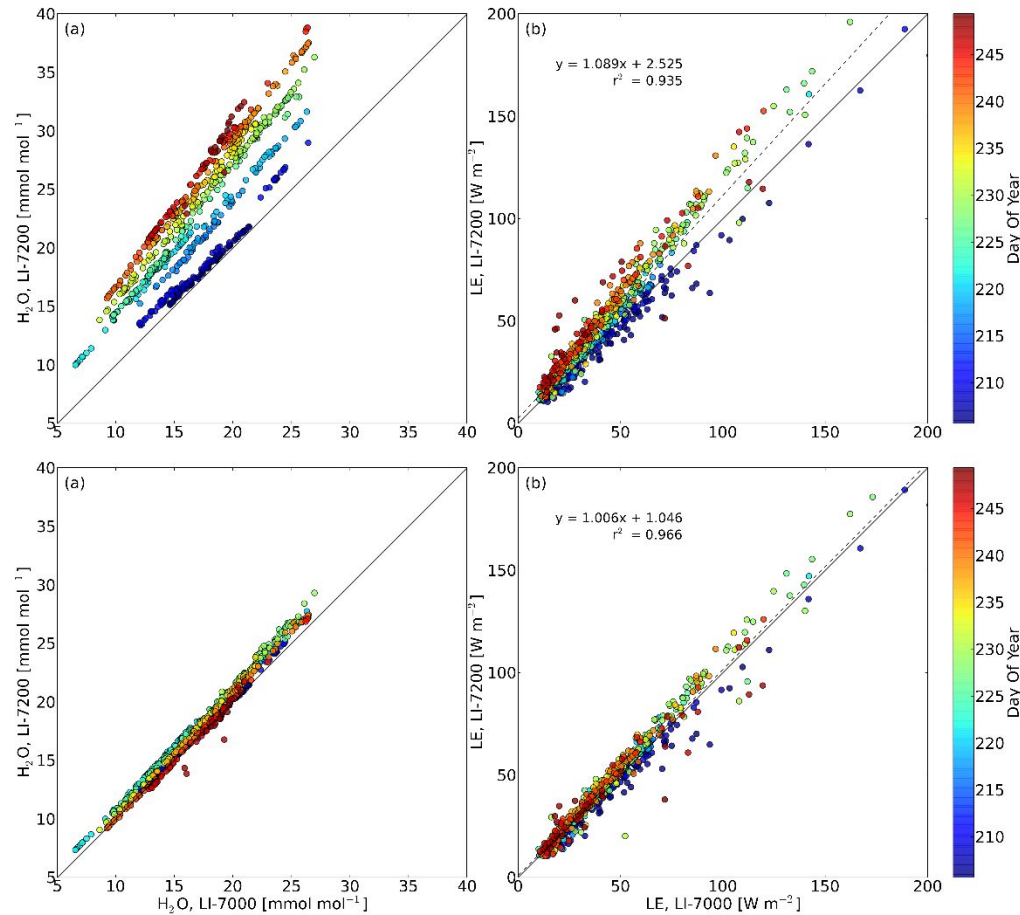
Deriva Instrumental

- El error de flujo depende directamente del sesgo de concentración
- Para el vapor de agua, el error de flujo depende en gran medida también de la concentración a la que se produce el sesgo.



Instrumental drift

- Hay un procedimiento disponible en EddyPro® para corregir sesgos de concentración
- Los flujos LE pueden mejorar hasta un 8%



Tercer Paso

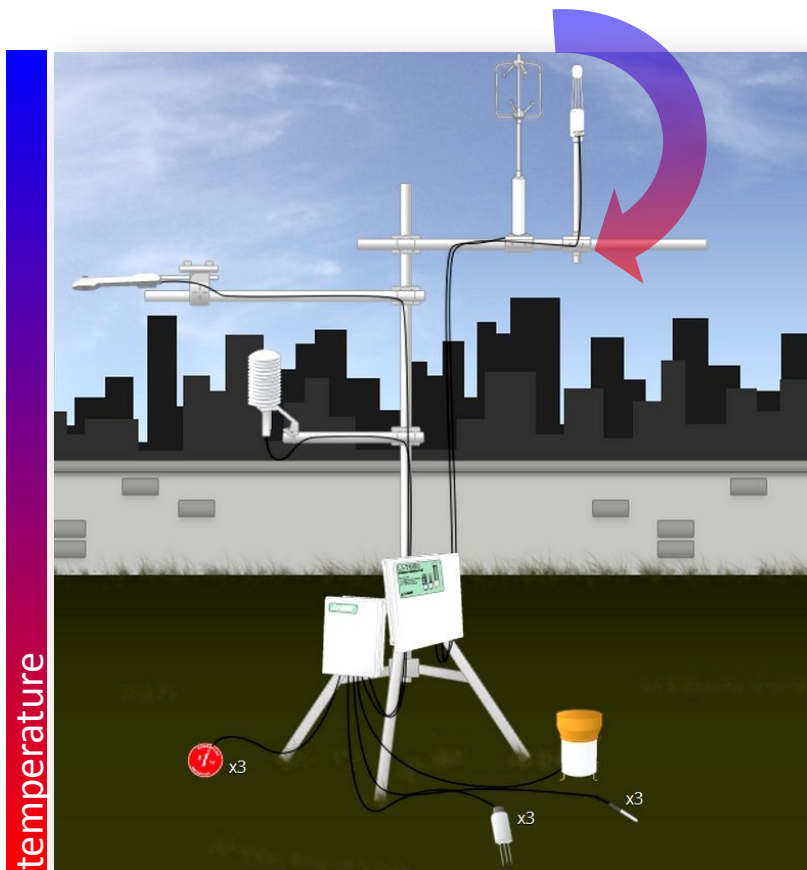
Corrección de estimaciones de flujo preliminares.

Compensación de fluctuaciones de densidad del aire (término WPL)

$$c = d \frac{RT}{P(1 - \chi_w)} = \frac{d}{d_a}$$

- Compensa la dependencia de las mediciones de densidad molar del gas de las fluctuaciones de temperatura, presión y humedad del aire.
- Esto no es una corrección: es un término real en la ecuación del balance de masa.

Compensación de fluctuaciones de densidad del aire (término WPL)



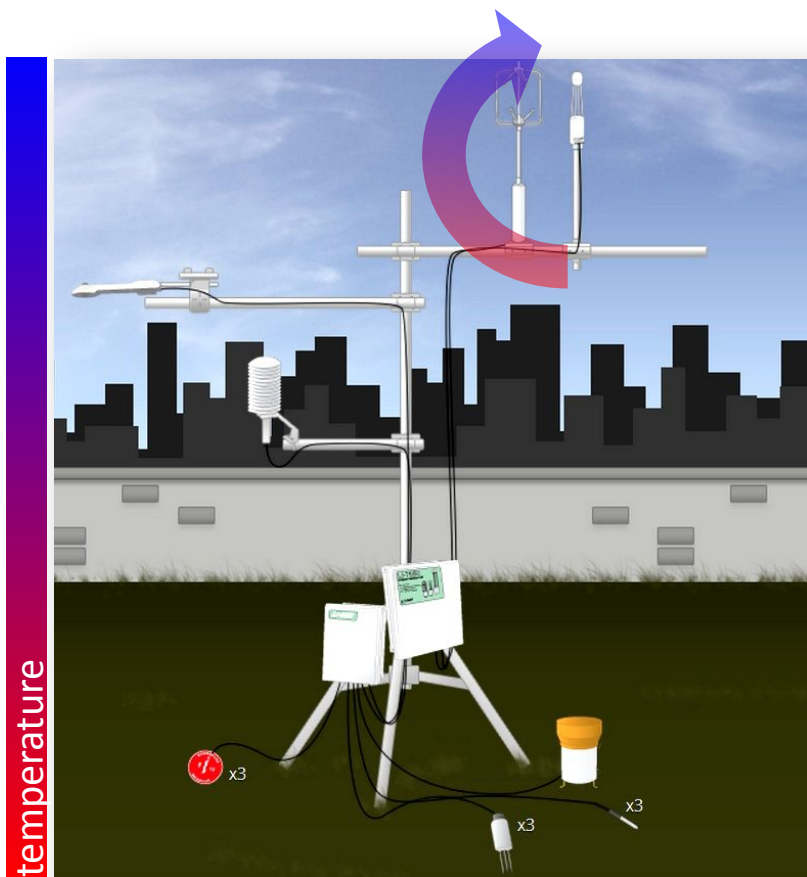
$$d = c \frac{P(1 - \chi_w)}{RT}$$

w' ↓
 T' ↓
 d' ↑

$$w' \cdot d' < 0$$

Aparente fijación de CO₂!

Compensación de fluctuaciones de densidad del aire (término WPL)



$$d = c \frac{P(1 - \chi_w)}{RT}$$

w' ↑
 T' ↑
 d' ↓

$$w' \cdot d' < 0$$

Aparente fijación de CO₂!

Compensación de fluctuaciones de densidad del aire (término WPL)

- Debe aplicarse a todos los analizadores de gases que miden densidades molares de gases.

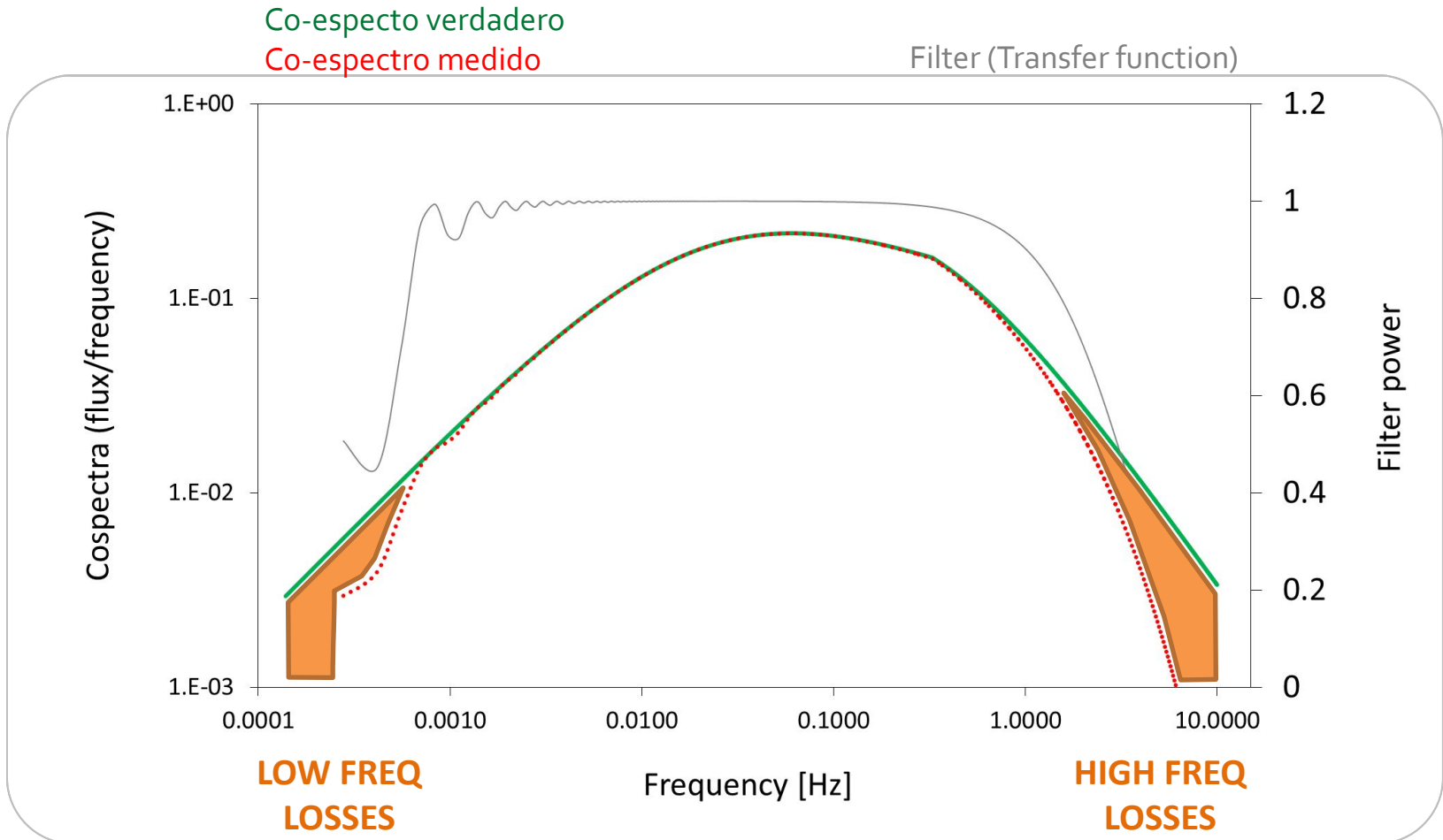
Varios enfoques disponibles:

- Transformar densidades en proporciones de mezcla a alta frecuencia.
 - analizadores de ruta cerrada con mediciones rápidas de T y P
- Despreciar las fluctuaciones de T y P, compensar la humedad
 - Analizadores de ruta cerrada con largas líneas de muestreo
- Enfoque WPL para agregar términos de T, P y humedad a los flujos preliminares
 - Analizadores de ruta abierta

Compensación de atenuaciones espectrales

- Las atenuaciones espectrales surgen debido a:
 - Limitaciones instrumentales (tiempo de respuesta, promedio de volumen)
 - Despliegue de instrumentos (líneas de muestreo, separaciones de instrumentos, altura sobre el suelo)
 - Características del sitio (rugosidad de la superficie)
 - Opciones de procesamiento (intervalo de promedio de flujo finito)

Compensación de atenuaciones espectrales



Estrategias de atenuaciones espectrales

- **Analíticas** (Moncrieff et al. (1997); Massman (2000)):
 - VENTAJAS: Simple, robusto, basado en física
 - DESVENTAJAS: Algunas fuentes importantes de atenuación no se describen (filtros, interacciones del vapor de agua con las superficies...)
- **In-situ** (Ibrom et al. (2007); Runkle et al. (2012), Fratini et al. (2012)):
 - VENTAJAS: No haga (demasiadas) suposiciones sobre las fuentes de atenuación, evalúe las atenuaciones basándose en los datos recopilados.
 - DESVENTAJAS: Más complejo, requiere preprocesamiento de datos y propenso a errores.

Otras correcciones (Específicas del instrumento)

- Corrección de flujos de calor sensible por efectos de la humedad sobre la temperatura del aire estimada con temperatura sónica.
- Corrección de viento cruzado de la temperatura sónica (a menudo incluida en el firmware del anemómetro)
- «Corrección de autocalentamiento» para algunos modelos de analizadores de CO₂/H₂O de camino abierto en ambientes fríos
- Corrección espectroscópica para analizadores basados en LÁSER (por ejemplo, LI-7700)
- Corrección de ampliación de banda para analizadores basados en NDIR
-

Pruebas micro meteorológicas de control de calidad: estacionariedad

✓ *Foken et al. 2004, Handbook of Micrometeorology*

$$(\overline{x'w'})_i = \frac{1}{N-1} \left[\sum_j x_j w_j - \frac{1}{N} \sum_j x_j \sum_j w_j \right]$$

Covarianza calculada en un solo subperíodo i

$$\overline{x'w'} = \frac{1}{M} \sum_i (\overline{x'w'})_i$$

Covarianza promedio calculada usando el M sub-periodos

$$(\overline{x'w'})_o = \frac{1}{M(N-1)} \left[\sum_i \left(\sum_j x_j w_j \right)_i - \frac{1}{MN} \sum_i \left(\sum_j x_j \sum_j w_j \right)_i \right]$$

Covarianza calculada sobre el período promedio completo

$$RN_{cov} = \left| \frac{(\overline{x'w'}) - (\overline{x'w'})_o}{(\overline{x'w'})_o} \right|$$

La diferencia relativa entre las dos estimaciones de covarianza no debe exceder un umbral (30% o 100%)

Pruebas micro meteorológicas de control de calidad: turbulencia desarrollada

✓ *Foken et al. 2004, Handbook of Micrometeorology*

$$\frac{\sigma_{u,v,w}}{u_*} = c_1 \left(\frac{z}{L}\right)^{c_2}$$

$$\frac{\sigma_x}{X_*} = c_1 \left(\frac{z}{L}\right)^{c_2}$$

En la turbulencia atmosférica el cociente entre la varianza de una cantidad y su flujo turbulento es constante o función del parámetro de estabilidad.

Parameter	z/L	c_1	c_2
σ_w/u_*	$0 > z/L > -0.032$	1.3	0
	$-0.032 > z/L$	2.0	1/8
σ_u/u_*	$0 > z/L > -0.032$	2.7	0
	$-0.032 > z/L$	4.15	1/8
σ_T/T_*	$0.02 < z/L < 1$	1.4	-1/4
	$0.02 > z/L > -0.062$	0.5	-1/2
	$-0.062 > z/L > -1$	1.0	-1/4
	$-1 > z/L$	1.0	-1/3

$$ITC_\sigma = \left| \frac{(\sigma_x/X_*)_{\text{model}} - (\sigma_x/X_*)_{\text{measurement}}}{(\sigma_x/X_*)_{\text{model}}} \right|$$

La diferencia relativa entre las dos estimaciones de los parámetros de turbulencia debe estar por debajo de un umbral determinado.

Pruebas micro meteorológicas de control de calidad: combinación

- ✓ Las pruebas de estacionariedad y turbulencia desarrollada proporcionan una "bandera" individual (una por prueba)
- ✓ Los dos indicadores se combinan en un único indicador general que se puede utilizar para filtrar los datos.

a		b	
class	range	class	range
1	0-15%	1	0-15%
2	16-30%	2	16-30%
3	31-50%	3	31-50%
4	51-75%	4	51-75%
5	76-100%	5	76-100%
6	101-250%	6	101-250%
7	251-500%	7	251-500%
8	501-1000%	8	501-1000%
9	>1000%	9	>1000%

a: State-state test according to Equation 9.6.

b: Integral turbulence characteristics according to Equation 9.9.

Foken et al. 2004, Handbook of Micromet

¿Cómo utiliza EddyPro los datos biométricos?

- Los flujos (por ejemplo, en intervalos de 30 minutos) se calculan y corrigen en función de:
 - Covarianzas calculado a partir de una medición rápida, adquirida a $f > 5$ Hz
 - Cantidades promedio, promediado durante intervalos de 30 minutos

For ejemplo, flujo CO₂:

$$F = \overline{\rho_a} \cdot \overline{w'c'}$$

Valor medio durante 30 minutos, calculado a partir de mediciones rápidas o lentas

Covarianza durante 30 minutos, calculada a partir de mediciones rápidas

¿Cómo utiliza EddyPro los datos biometeorológicos?

- La **temperatura promedio** del aire y la **humedad relativa** están involucradas en varias ecuaciones de flujo, por ejemplo:

densidad del aire:
$$\rho_d = \frac{P}{R_d T_a} - \rho_w \frac{m_d}{m_w}$$

término WPL:
$$F = F_o + \mu \frac{E}{\rho_d} \frac{\rho_c}{1 + \mu \frac{\rho_w}{\rho_d}} + \frac{H}{\rho_a C_p} \frac{\rho_c}{T_a} + P_{term}$$

corrección H:
$$H = \rho C_p \overline{w' T_a'} + \rho C_p \frac{-0.51 T_a E}{\rho_a}$$

¿Cómo utiliza EddyPro los datos biometeorológicos?

- Las radiaciones entrantes globales (R_g) y de onda larga (R_l) y PAR son necesarias en la corrección de la fijación fuera de temporada del LI-7500(A), Burba et al. 2008:

Parameters for multiple regression* between $T_s - T_a$ and T_a, R_g, R_l, U					
	Offset	Parameter 1 (for T_a)	Parameter 2 (for R_g)	Parameter 3 (for R_l)	Parameter 4 (for U)
Daytime					
$T_s^{bot} - T_a$	2.8	-0.0681	0.0021	-	-0.334
$T_s^{top} - T_a$	-0.1	-0.0044	0.0011	-	-0.022
$T_s^{spar} - T_a$	0.3	-0.0007	0.0006	-	-0.044
Night-time					
$T_s^{bot} - T_a$	0.5	-0.1160	-	0.0087	-0.206
$T_s^{top} - T_a$	-1.7	-0.0160	-	0.0051	-0.029
$T_s^{spar} - T_a$	-2.1	-0.0200	-	0.0070	0.026

*Multiple regression: daytime $T_s - T_a = \text{offset} + \text{parameter } 1 \times T_a + \text{parameter } 2 \times R_g + \text{parameter } 4 \times U$; night-time $T_s - T_a = \text{offset} + \text{parameter } 1 \times T_a + \text{parameter } 3 \times R_l + \text{parameter } 4 \times U$. All temperatures are in °C.