

Documento método.
Cálculo de los flujos turbulentos medidos con *eddy covariance*.

1. TRATAMIENTO DE LOS DATOS BRUTOS (10-20Hz)

Para el cálculo de los flujos turbulentos es imprescindible almacenar a una frecuencia de 10 a 20 Hz las siguientes variables:

- velocidad de viento en las tres direcciones
- temperatura
- magnitud del escalar (CO₂ o vapor de agua)

Los datos descargados se dividirán en archivos de 30 minutos de duración. A cada archivo se le realizará un control de calidad para eliminar datos brutos incoherentes. Este control de calidad se compone de 9 test que están claramente definidos y explicados en el trabajo de (Vickers and Mahrt 1997):

1. Spikes
2. Amplitude resolution
3. Dropouts
4. Absolute limits
5. Skewness and Kurtosis
6. Discontinuity (mean, variances)
7. Time lag
8. Attack angle
9. Nonstationarity of the horizontal wind

2. CÁLCULO DE LOS FLUJOS TURBULENTOS A 30 MINUTOS

Para cada una de las variables almacenadas se procederá al cálculo su promedio (\bar{x}'), varianza ($\overline{x'x'}$) y covarianza ($\overline{x'y'}$) con las otras variables:

$$\bar{x}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\overline{x'x'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2$$

$$\overline{x'y'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y}$$

Así, el flujo turbulento de CO₂, vapor de agua, calor o momento se definirá como la covarianza de la velocidad vertical y la razón de mezcla de CO₂ ($\overline{w'r_c'}$), de vapor de agua ($\overline{w'r_v'}$), la temperatura ($\overline{w'T'}$) y (W) respectivamente.

2.1 Corrección de los flujos turbulentos

Los flujos cinéticos de CO₂, vapor de agua, calor sensible y flujo de momento lineal, obtenidos mediante la técnica *eddy covariance*, necesitan una serie de correcciones

para garantizar que los valores obtenidos correspondan exclusivamente a los intercambios verticales de estas variables entre la superficie y la atmósfera.

2.1.1 El término de Webb, Pearman y Leuning (término WPL): corrección de los flujos de CO₂ y vapor de agua por cambios en la densidad de aire

Esta corrección se debe aplicar únicamente cuando trabajemos con un analizador de gases en el infrarrojo (IRGA) de sistema abierto (Li-Cor 7500, Lincoln, NE, USA).

Este IRGA está diseñado para medir fluctuaciones de la densidad de CO₂ y vapor de agua y no razón de mezcla. La variable escalar que debe usarse para el cálculo del flujo turbulento de CO₂ o vapor de agua es la razón de mezcla ya que es la única magnitud que se conserva frente a cambios en la densidad de aire (debidos a transferencia de calor y difusión de vapor de agua), y se ve únicamente modificada por la existencia de una fuente o sumidero del gas bajo estudio en superficie. Si usamos un instrumento que mide fluctuaciones en la densidad para calcular el flujo turbulento, necesitamos descontar las variaciones en la densidad de CO₂, o vapor de agua que son consecuencia de variaciones en la densidad de aire (término de WPL, (Webb and others 1980)). Así, el flujo turbulento de CO₂ (F_c) se define como la covarianza de las fluctuaciones de la velocidad vertical y la densidad de CO₂ y el término WPL:

$$F_c = \overline{w' \rho_c'} + \overline{\rho_c} (\overline{W_v} + \overline{W_T})$$

donde

$$\overline{W_v} = \mu \frac{\overline{w' \rho_v'}}{\rho_a} \quad \text{y} \quad \overline{W_T} = (1 + \sigma \mu) \frac{\overline{w' T'}}{T}$$

siendo

$$\sigma = \frac{\overline{\rho_v}}{\rho_a} \quad \text{y} \quad \mu = \frac{m_a}{m_v}$$

Si siguiendo las mismas premisas se puede llegar a la definición del flujo de vapor de agua medido con un sistema *eddy covariance* con un IRGA LI-7500:

$$E = \overline{w' \rho_v'} + \overline{\rho_v} (\overline{W_v} + \overline{W_T})$$

Aplicando esta ecuación para el cálculo del flujo de CO₂ medido con analizadores de trayectoria abierta, debemos tener en cuenta que errores cometidos en la estimación de las variables que intervienen en el cálculo del término WPL pueden dar lugar a errores en la cuantificación del flujo de CO₂. Así, según un estudio llevado a cabo por Serrano-Ortiz et al., (2008), una subestimación de un 5% en ρ_c debido a suciedad acumulada en las lentes del IRGA puede aumentar los errores relativos de F_c hasta un máximo de 65%. En este sentido se recomienda la limpieza de las lentes con frecuencia.

2.1.2 Rotación de coordenadas

Para poder cuantificar el flujo de una magnitud escalar en un ecosistema, necesitamos conocer las fluctuaciones de la componente de viento normal a la superficie. Si dicha superficie se encuentra levemente inclinada, la componente w' , medida por el anemómetro sónico, no es exactamente una componente normal a la superficie y necesitamos realizar una rotación de coordenadas. Esta rotación también se usa para corregir inclinaciones del anemómetro sobre terrenos llanos debido a deficiencias en la colocación vertical del mismo.

Para solventar este problema se han propuesto distintas metodologías. Entre ellas podemos destacar la rotación bidimensional (2D (3D)) (McMillen 1988); la búsqueda del plano "ideal" (Planar fit); la rotación basada en la regresión lineal sobre "i" sectores en el ángulo azimutal (Lee 1998); el método del ángulo inclinado (tilt angle method), en el que podemos destacar a modo de ejemplo el de (Paw U and others 2000); o el método sinusoidal ideal (Feigenwinter and others 2004). Destacaremos que la rotación bidimensional y el "planar fit" son las técnicas más empleadas por la red internacional FLUXNET.

En esta red se aconseja la metodología de rotación bidimensional, llevando a cabo una rotación del sistema de coordenadas de la velocidad del viento como sugiere (McMillen 1988) utilizando las ecuaciones propuestas por (Kowalski and others 1997).

El sistema original de coordenadas queda establecido por la posición del anemómetro sónico. Las coordenadas resultantes de la rotación se definen suponiendo que el viento promedio proviene únicamente de la dirección "u" (de este modo $\bar{v} = \bar{w} = 0$). Con la modificación del sistema de coordenadas los flujos, las varianzas y el viento promedio se deben rotar atendiendo a dos ángulos definidos a través de las componentes del viento promedio.

El primer paso es definir una rotación sobre el eje vertical hasta maximizar \bar{u} . Esta rotación es esencial para hacer que $\bar{v} = 0$, para ello se determina el ángulo entre la dirección del viento y la orientación del anemómetro sónico [$\eta = \tan^{-1}(\bar{v}/\bar{u})$]. Una segunda rotación se define sobre el resultado de la dirección "v" mediante el ángulo cenital [$\theta = \tan^{-1}(\bar{w}/(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{1/2})$] entre la orientación vertical del anemómetro y el viento. El seno y coseno de estos dos ángulos son esenciales a la hora de escribir las ecuaciones de rotación:

$$C_{\eta} = \frac{\bar{u}}{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{1/2}}; \quad S_{\eta} = \frac{\bar{v}}{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{1/2}}$$

$$C_\theta = \frac{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{1/2}}{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)^{1/2}}; \quad S_\theta = \frac{\bar{w}}{(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)^{1/2}}$$

Las siguientes formulas llevan a cabo la rotación para las componentes individuales del viento, donde el subíndice (u) denota las componentes no rotadas. El nuevo sistema de coordenadas vendría dado por:

$$u = u_u C_\theta C_\eta + v_u C_\theta S_\eta + w_u S_\theta$$

$$v = v_u C_\eta - u_u S_\eta$$

$$w = w_u C_\theta - u_u S_\theta C_\eta - v_u S_\theta S_\eta$$

Estas ecuaciones necesariamente cumplen que $\bar{v} = \bar{w} = 0$, es importante retener estas ecuaciones para calcular flujos y varianzas. En cada caso, la nueva componente se define como una combinación lineal de las antiguas. En cuanto al promedio de Reynolds, las funciones trigonométricas se definen a partir de las medias verdaderas y por lo tanto permanecen constantes en los procesos de promediado (Kowalski and others 1997).

Esta simplificación nos permitirá realizar la rotación de las varianzas así como de los flujos que nos interesan en nuestro estudio (Flujos de momento, CO₂, vapor de agua y calor sensible).

Las ecuaciones necesarias para realizar estas rotaciones se presentarán a continuación. Estas ecuaciones fueron publicadas previamente por McMillen (1986) pero errores tipográficos en su desarrollo motivaron de nuevo su desarrollo y posterior publicación (Kowalski and others 1997).

Las ecuaciones para la rotación de las varianzas, preservando su energía cinética son:

$$\begin{aligned} \overline{u'^2} = & \overline{u'^2} \left| C_t^2 C_e^2 + v'^2 \right|_u C_t^2 S_e^2 + \overline{w'^2} \left| S_t^2 + \right. \\ & \left. 2\overline{u'v'} \right|_u C_t^2 C_e S_e + 2\overline{u'w'} \left| C_t S_t C_e + 2\overline{v'w'} \right|_u C_t S_t S_e \end{aligned}$$

$$\overline{v'^2} = \overline{u'^2} \left| S_e^2 + v'^2 \right|_u C_e^2 - 2\overline{u'v'} \left| C_e S_e \right|_u$$

$$\begin{aligned} \overline{w'^2} = & \overline{u'^2} \left| S_t^2 C_e^2 + v'^2 \right|_u S_t^2 S_e^2 + \overline{w'^2} \left| C_t^2 + \right. \\ & \left. 2\overline{u'v'} \right|_u S_t^2 C_e S_e - 2\overline{u'w'} \left| C_t S_t C_e - 2\overline{v'w'} \right|_u C_t S_t S_e \end{aligned}$$

Las ecuaciones para la rotación de las covarianzas entre las distintas direcciones de viento, de las que destacamos la covarianza entre las fluctuaciones de la velocidad vertical y horizontal (flujo de momento lineal):

$$\begin{aligned}\overline{u'v'} &= -\overline{u'^2} \Big|_u C_t C_e S_e + \overline{v'^2} \Big|_u C_t C_e S_e + \\ &\quad \overline{u'v'} \Big|_u C_t (C_e^2 - S_e^2) - \overline{u'w'} \Big|_u S_t S_e + \overline{v'w'} \Big|_u S_t C_e \\ \overline{u'w'} &= -\overline{u'^2} \Big|_u C_t S_t C_e^2 - \overline{v'^2} \Big|_u C_t S_t S_e^2 + \overline{w'^2} \Big|_u C_t S_t - \\ &\quad 2\overline{u'v'} \Big|_u C_t S_t C_e S_e + \overline{u'w'} \Big|_u C_e (C_t^2 - S_t^2) + \overline{v'w'} \Big|_u S_e (C_t^2 - S_t^2) \\ \overline{v'w'} &= \overline{u'^2} \Big|_u S_t C_e S_e - \overline{v'^2} \Big|_u S_t C_e S_e - \\ &\quad \overline{u'v'} \Big|_u S_t (C_e^2 - S_e^2) - \overline{u'w'} \Big|_u C_t S_e + \overline{v'w'} \Big|_u C_t C_e\end{aligned}$$

Por último, la rotación de flujos escalares (denotado como c) se definen como:

$$\begin{aligned}\overline{u'c'} &= \overline{u'c'} \Big|_u C_\theta C_\eta + \overline{v'c'} \Big|_u C_\theta S_\eta + \overline{w'c'} \Big|_u S_\theta \\ \overline{v'c'} &= \overline{v'c'} \Big|_u C_\eta - \overline{u'c'} \Big|_u S_\eta \\ \overline{w'c'} &= \overline{w'c'} \Big|_u C_\theta - \overline{u'c'} \Big|_u S_\theta C_\eta - \overline{v'c'} \Big|_u S_\theta S_\eta\end{aligned}$$

En el caso que nos ocupa (flujo vertical de CO₂, vapor de agua y calor sensible) usaremos la ecuación X, siendo c' las fluctuaciones densidad de vapor de agua, CO₂ o temperatura según el flujo considerado.

2.2 Control de calidad de los flujos turbulentos obtenidos. Rechazo de datos

Se rechazarán aquellos valores flujo que estén fuera del rango establecido por CARBOEUROPE.

Flujo de CO ₂ (Fc):	-50 μmol m ⁻² s ⁻¹ – 50 μmol m ⁻² s ⁻¹
Flujo de vapor de agua (Calor latente, LE):	-250 Wm ⁻² – 800 W m ⁻²
Flujo de calor sensible (Hs):	-250 Wm ⁻² – 800 W m ⁻²
Flujo de momentos (τ):	0 kg m s ⁻¹ – 5 kg m ⁻² s ⁻¹ .

De igual modo se rechazarán los valores de F_c y LE en los que las lentes del LI-7500 están cubiertas por agua debido a eventos de lluvia. Esta situación se detecta cuando

la columna diagnóstica "AGC" toma valores superiores a 60 y cuando el promedio de las placas de rocío detecta la presencia de agua.

Finalmente se rechazarán aquellos valores de F_c calculados durante la noche cuando la velocidad de fricción es inferior a la velocidad límite (U^* threshold). Dependiendo de las características del ecosistema de estudio (heterogeneidad de la superficie) y de la altura de la torre, podemos definir una velocidad de fricción límite. Durante la noche, en condiciones de estabilidad atmosférica, cuando tengamos valores de U^* por debajo del límite establecido, la escasa turbulencia existente no será capaz de mezclar el aire de las capas adyacentes. Los intercambios de CO_2 que se producen entre la superficie y la atmósfera inmediata no alcanzarán la altura de los instrumentos de medida.

2.4 Técnicas empleadas para el relleno de huecos en los flujos de CO_2 y vapor de agua.

La cuantificación de balance anual de carbono en un ecosistema (NEE) así como la evapotranspiración anual mediante la aplicación de la técnica *eddy covariance* necesita medidas continuadas del flujo de CO_2 y vapor de agua. Esta condición no se cumple a la hora de aplicar la técnica sobre un ecosistema real ya que surgen problemas de alimentación, rotura de instrumentos, calidad del dato o condiciones meteorológicas adversas, que impiden tener valores de flujo cada media hora durante todo un año sin que se interrumpan las medidas. Como norma general, el promedio de las medidas en continuo de flujo no superan el 65% durante un año (Falge and others 2001b). Esta realidad, hace necesario el uso de metodología eficaz y robusta para el relleno de esos momentos de ausencia de flujo de CO_2 (Falge and others 2001a)

Existen numerosos procedimientos para el relleno de huecos en el flujo. Estos procedimientos se resumen en la tabla

TÉCNICAS PARA EL RELLENO DE HUECOS DE F_c	AUTOR
Regresiones no lineales	
Regresión no lineal (modelo AQRta)	A. Noormets (Noormets and others 2007)
Regresión no lineal (Eyring, Michaelis-Menten)	Ankur Desai (Desai and others 2005)
Regresión no lineal (Fourier, 2° orden, Michaelis-Menten)	Andrew Richardson (Richardson and others 2006)
Regresión no lineal (Lloyd y Taylor, Michaelis-Menten)	Eva Falge (Falge and others 2001a)
Regresión no lineal (otros modelos empíricos) FCRN - Fluxnet Canada Research Network	Alan Barr (Barr and others 2004)
Redes neuronales	
Redes neuronales	Dario Papale (Papale and Valentini 2003)
Redes neuronales con filtrado de series temporales	Rob Braswell (Braswell and others 2005)
Otros	
Método de imputación múltiple	Dafeng Hui (Hui and others 2004)
Promedio de la variación diaria	Eva Falge (Falge and others 2001b)
Consulta en tablas	Eva Falge (Falge and others 2001b)
Distribución marginal	Markus Reichstein (Reichstein and others 2005)
Modelos semiparamétricos de eficiencia de la luz	Vanessa Stauch (Stauch and Jarvis 2006)
Filtro de Kalman (Lloyd+Taylor, Michaelis-Menten)	Dave Hollinger, Jeff Gove (Hollinger and others 2004)
Modelo BETHY	Jens Kattge (Knorr and Kattge 2005)

Resumen de las distintas técnicas usadas para el relleno de huecos de F_c elaborado por Antje Moffat (Gap Filling Comparison Workshop (18-20 Septiembre, 2006) (Moffat and others In press)

2.4.1 Distribución Marginal

Es la técnica seleccionada por la red. Este proceso para el relleno de los valores de *flujo* se basa en la metodología publicada por (Falge and others 2001b), distinguiremos tres grandes grupos de datos:

1. Hay huecos en los valores de flujo pero no en las variables meteorológicas
2. Además de huecos en los valores de flujo tampoco hay información sobre la temperatura de aire (T_a) o el déficit de presión de vapor de agua (VPD) pero sí hay valores de radiación global (R_g).
3. Hay huecos en el flujo y en las variables meteorológicas mencionadas anteriormente.

Para las situaciones incluidas en el grupo (1) el hueco se rellena con el valor promedio de los ± 7 días consecutivos al hueco, correspondientes a la misma hora, siempre y cuando se presenten condiciones meteorológicas similares. Diremos que habrá condiciones meteorológicas similares cuando los valores de T_a , VPD y R_g , para esa hora de ausencia de datos, no se desvíen durante estos ± 7 días, en más de 50 W m^{-2} , $2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y 5.0 hPa respectivamente. Si no existen condiciones meteorológicas similares usaremos el valor promedio de ± 14 días consecutivos al hueco. Para el grupo (2) se usará también esta metodología pero considerando que existen condiciones meteorológicas similares cuando el valor de R_g no se desvíe en más de 50 W m^{-2} . Los huecos comprendidos en el grupo (3) se rellenarán con el promedio en el mismo momento del día (± 1 hora), iniciaremos este proceso usando los valores de ± 0.5 días consecutivos y ampliaremos el valor de esta ventana hasta que podamos rellenar el hueco.

Esta herramienta de relleno es accesible a través de Internet en la siguiente dirección:

<http://gaia.agraria.unitus.it/database/eddyproc/index.html>.

3. REFERENCIAS

- Barr, A.G., Black, T.A., Hogg, E.H., Kljun, N., Morgenstern, K., Nesic, Z. 2004. Inter-annual variability in the leaf area index of a boreal aspen-hazelnut forest in relation to net ecosystem productio. *Agricultural and Forest Meteorology* 127: 237-255.
- Braswell, B.H., Sacks, W.J., Linder, E., Schimel, D.S. 2005. Estimating diurnal to annual ecosystem parameters by synthesis of a carbon flux model with eddy covariance net ecosystem exchange observations. *Global Change Biology* 11: 335-355.
- Desai, A.R., Bolstad, P.V., Cook, B.D., Davis, K.J., Carey, E.V. 2005. Comparing net ecosystem exchange of carbon dioxide between an old-growth and mature forest in the upper Midwest, USA. *Agricultural and Forest Meteorology* 128: 33-55.
- Falge, E., Baldocchi, D.D., Olson, R., Anthoni, P.M., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, A.J., Granier, A., Gross, P., Grünwald, T., Hollinger, D., Jensen, N.O., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A.S., Lai, C.T., Law, B.E., Meyers, T., Moncrieff, J.B., Moors, E.J., Munger, J.W., Pilegaard, K., Rannik, Ü., Rebmann, C., Suyker, A.E., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T. 2001a. Gap

filling strategies for long term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology* 107: 71-77.

Falge, E., Baldocchi, D.D., Olson, R., Anthoni, P.M., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, A.J., Granier, A., Gross, P., Grünwald, T., Hollinger, D., Jensen, N.O., Katul, G.G., Keronen, P., Kowalski, A.S., Lai, C.T., Law, B.E., Meyers, T.P., Moncrieff, J.B., Moors, E.J., Munger, J.W., Pilegaard, K., Rannik, Ü., Rebmann, C., Suyker, A.E., Tenhunen, J.D., Tu, K., Verma, S.B., Vesala, T., Wilson, K.B., Wofsy, S.C. 2001b. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* 107: 43 - 69.

Feigenwinter, C., Bernhofer, C., Vogt, R. 2004. The influence of advection on the short term CO₂ budget in and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorology* 113: 201-224.

Hollinger, D.Y., Aber, J., Dail, B., Davidson, E.A., Goltz, S.M., Hughes, D., Leclerc, M., Lee, J.T., Richards, A.D., Rodrigues, C., Scott, N.A., Varier, D., Walsh, J. 2004. Spatial and temporal variability in forest-atmosphere CO₂ exchange. *Global Change Biology* 10: 1689-1706.

Hui, D., S., W., Sua, B., Katul, G., Monson, R., Luo, Y. 2004. Gap-filling missing data in eddy covariance measurements using multiple imputation (MI) for annual estimations. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 93-111.

Knorr, W., Kattge, J. 2005. Inversion of terrestrial ecosystem model parameter values against eddy covariance measurements by Monte Carlo sampling. *Global Change Biology* 11: 1333-1351.

Kowalski, A.S., Anthoni, P.M., Vong, R.J. 1997. Deployment and Evaluation of a System for Ground-Based Measurement of Cloud Liquid Water Turbulent Fluxes. *Journal of atmospheric and oceanic technology* 14: 468-479.

Lee, X. 1998. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology* 91: 39-49.

McMillen, R.T. 1988. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorology* 43: 231 - 245.

Moffat, A.M., Papale, D., Reichstein, M., Hollinger, D., Richardson, D., Barr, A.G., Beckstein, C., Braswell, B.H., Churkina, G., Desai, A.R., Falge, E., Gove, J.H., Heimann, M., Hui, D., Jarvis, A.J., Kattge, J., Noormets, A., Stauch, V.J. In press. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* In press.

Noormets, A., Chen, J., Crow, T.R. 2007. Age-Dependent Changes in Ecosystem Carbon Fluxes in Managed Forests in Northern Wisconsin, USA. *Ecosystems* 10: 187-203.

Papale, D., Valentini, R. 2003. A new assessment of European forest carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization. *Global Change Biology* 9: 525-535.

Paw U, K.T., Baldocchi, D.D., Meyers, T.P., Wilson, K.B. 2000. Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boundary-Layer Meteorology* 97: 487 - 511.

Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D.D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T.G., Granier, A., Grünwald, T., Havrankova, K., Ilvesniemi, H., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., Meyers, T., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Pumpane, J., Rambal, S., Rotenberg, E., Sanz, M., Tenhunen, J., Seufert, G., Vaccari, F., Vesala, T., Yakir, D., Valentini, R. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology* 11: 1-16.

Richardson, A.D., Braswell, B.H., Hollinger, D., Burman, P., Davidson, E.A., Evans, R., Flanagan, L.B., Munger, J.W., Savage, K., Urbanski, S.P., Wofsy, S.C. 2006. Comparing simple respiration models for eddy flux and dynamic chamber data. *Agricultural and Forest Meteorology* 141: 219-234.

Stauch, V.J., Jarvis, A.J. 2006. A semi-parametric model for eddy covariance CO₂ flux time series data. *Global Change Biology* 12: 1707-1716.

Vickers, D., Mahrt, L. 1997. Quality Control and Flux Sampling Problems for Tower and Aircraft Data. *Journal of atmospheric and oceanic technology* 14: 512-526.

Webb, E.K., Pearman, G.I., Leuning, R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106: 85 - 100.