

Avances de la micrometeorología en Argentina

Micrometeorological advances in Argentina

M Isabel Gassmann¹

Resumen En este artículo se presentan los resultados obtenidos a través de mediciones micrometeorológicas implementadas en nuestro país. A través de dos metodologías de monitoreo de variables biometeorológicas se lograron determinar valores y patrones característicos de los flujos turbulentos de calor sensible, calor latente y de dióxido de carbono intercambiados entre la atmósfera adyacente y distintos tipos de ecosistemas. Se identificaron patrones de extracción de agua a lo largo del ciclo de cultivo de soja en la región del sudeste bonaerense. Se desarrolló un modelo estadístico de la resistencia de la cobertura a fin de estimar la evapotranspiración real para un pastizal salado utilizado para el pastoreo de ganado y se determinó un umbral de evapotranspiración para limitar el impacto irreversible del ganado en la biodiversidad florística de dicho ambiente. Para el mismo pastizal salado y para el cultivo de soja se determinó el secuestro neto de dióxido de carbono. En ambos casos las tasas de secuestro fueron superiores a las observadas en ambientes similares en el hemisferio norte. Los resultados obtenidos indican que es necesario realizar mediciones micrometeorológicas en nuestros ecosistemas para tener cuantificaciones correctas de las tasas de intercambios de energía y gases entre la atmósfera y superficies naturales o antropizadas. Así se identifican pautas para los manejos de uso del suelo en nuestra región tendientes a maximizar la eficiencia del uso del agua en las actividades agropecuarias y proteger aquellas superficies o fortalecer actividades que permitan incrementar los secuestros netos de CO₂ en la atmósfera.

Palabras clave Flujos turbulentos, evapotranspiración, dióxido de carbono, covarianzas turbulentas, balances de energía y masa.

Abstract *In this article, the results obtained through micrometeorological measurements implemented in our country are presented. Using two methodologies for monitoring biometeorological variables, characteristic values and patterns of turbulent fluxes of sensible heat, latent heat, and carbon dioxide exchanged between the contiguous atmosphere and different types of ecosystems were determined. Soil water extraction pattern during a soybean crop cycle in the southeastern Buenos Aires region were identified. A statistical model of the canopy resistance was developed to estimate the actual evapotranspiration for a saline pasture used for livestock grazing, and also to determine an evapotranspiration threshold to limit the irreversible impact of livestock grazing on the floral biodiversity of this environment. Net carbon dioxide sequestration was determined for both the saline pasture and soybean crop. In both cases, uptake rates exceeded those observed in similar environments in the Northern Hemisphere. The results indicate the needs of micrometeorological measurements in our ecosystems to accurately quantify energy and gas exchange rates between the atmosphere and natural or anthropized surfaces. This work identifies guidelines for land use management in our region aimed at maximizing water use efficiency in agricultural activities and protecting or enhancing activities that increase net CO₂ sequestration in the atmosphere.*

Keywords *Turbulent fluxes, evapotranspiration, carbon dioxide, eddy covariance, mass and energy balance, surface layer.*

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos – FCEN – UBA / CONICET, CABA, Argentina. Email: gassmann@at.fcen.uba.ar

INTRODUCCIÓN

La micrometeorología estudia los fenómenos atmosféricos que se producen cerca de la superficie terrestre. Tienen una escala espacial menor a 1 km y la temporal es inferior a 1 h. Son procesos generalmente limitados a capas someras de aire, las cuales están influenciadas por la fricción y por intercambios de energía y masa con otros sistemas (biósfera, hidrósfera, etc.). En la atmósfera terrestre los fenómenos micrometeorológicos tienen lugar principalmente en la denominada capa límite atmosférica. Esta es la capa de aire contigua a la superficie terrestre y que se encuentra influenciada directamente por ella y sus forzantes (Stull, 1988). La principal característica de esta capa, que hace posible la vida sobre la tierra, es que el estado de su escurrimiento es turbulento.

El motor que dinamiza el movimiento de la atmósfera y los océanos es la energía radiativa que llega a la superficie terrestre desde el sol. Esta energía es ganada por la superficie y se intercambia con la atmósfera inicialmente a través de procesos moleculares en una capa de aire de algunos milímetros de espesor. Luego, es a través de los transportes turbulentos que difunde y dispersa velozmente en la capa límite el calor y la masa de gases, como el vapor de agua y el dióxido de carbono, entre los más importantes. En zonas urbanas, se agregan a esta dispersión y difusión los contaminantes gaseosos y particulados emitidos por fuentes fijas, puntuales, lineales o areales, o móviles asociados a las actividades humanas, mientras que en zonas rurales resulta importante la difusión y dispersión de partículas como polvo o biopartículas como hongos, insectos y polen (Pérez et al., 2020).

Dada la escala temporal típica de estos procesos, esta área disciplinar de la meteorología pocas veces utiliza mediciones meteorológicas realizadas por las redes de estaciones dependientes de los servicios meteorológicos nacionales, donde la mejor resolución temporal de medición se logra en las estaciones sinópticas y es horaria. Debido a ello, es usual que existan experimentos a campo, tanto nacionales como internacionales, con mediciones de características micrometeorológicas. Hace 60 años atrás se iniciaban las primeras campañas de medición que duraban aproximadamente un mes, ya que eran muy difíciles de sostener en el tiempo (Foken, 2008). La principal debilidad de estas campañas era su costo operativo y la necesidad de contar con un nutrido grupo de recursos humanos altamente formados en la disciplina. Con el correr de las décadas, de forma lenta pero progresiva, se fue avanzando en consolidar este tipo de mediciones con estaciones que funcionan de forma operativa. Hoy existen numerosas estaciones micrometeorológicas con registros continuos, que en algunos casos superan las dos décadas. Estos datos se ofrecen a la comunidad científica a través de redes agrupadas por continentes (AmeriFlux, ICOS; AsiaFlux, OzFlux) o de carácter global, como Fluxnet.

LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN EN MICROMETEOROLOGÍA

Dado que la atmósfera “gana o pierde” de forma eficiente energía o masa de gases a través de los intercambios turbulentos con la superficie terrestre, uno de los objetivos más importantes de las mediciones micrometeorológicas es la determinación de la tasa de intercambio de propiedades para distintos tipos de superficies. Los diseños experimentales de instrumentos para medir estos intercambios in situ tienen dos métodos principales de medición. Uno de ellos se basa en la aplicación de los métodos de clausura de las ecuaciones de conservación de la atmósfera para escurrimientos turbulentos. En estos casos, la estimación de los flujos utiliza distintos métodos conocidos como el de los perfiles, el de Bowen o el de flujo-varianzas, entre muchos otros. Otra metodología, muy utilizada, se basa en arreglos instrumentales que consideran una simplificación de las ecuaciones de pronóstico para la evaluación de las covariaciones entre variables meteorológicas. Este último método es el denominado de covarianzas turbulentas o eddy covariance por su expresión en inglés. Mientras que los primeros métodos pueden utilizar instrumentos convencionales de respuesta lenta, el segundo requiere necesariamente instrumentos de respuesta rápida, capaces de medir las variables meteorológicas en frecuencias de 10 o 20 Hz. De esta forma se logra estudiar todos los aportes de las distintas escalas involucradas en la turbulencia atmosférica en la capa límite y que intervienen en

los transportes de propiedades, eliminando aquellas escalas que finalmente se disipan como calor en el aire (turbulencia isotrópica en la escala de Kolmogorov).

EL MÉTODO DE LAS COVARIANZAS TURBULENTAS

El método de medición a partir de las covarianzas turbulentas considera el volumen de control asociado al footprint de un sistema de medición ubicado cerca de la superficie del suelo (Figura 1). Se compone generalmente de dos instrumentos. Uno es un anemómetro sónico de tres dimensiones (3D) que logra medir las tres componentes del vector velocidad y la temperatura sónica del aire. El otro es un sensor óptico, que mide las variaciones de concentración de CO₂ y de vapor de agua asociados a los valores de absorbancia medidos con un haz de luz infrarroja dentro de una ventana abierta al paso del aire. Este sistema de medición permite evaluar en períodos de tiempos de la escala micrometeorológica (15 a 30 minutos) los transportes turbulentos de todas las componentes de velocidad del viento, conocido como el tensor de Reynolds, las tres componentes de los vectores de transporte turbulento de calor sensible (temperatura), de calor latente (vapor de agua) y de dióxido de carbono. Se pueden adicionar otros sensores que permiten medir los intercambios de metano y de óxido nítrico. Para estimar el balance de todo el sistema se incluyen otros sensores convencionales: piranómetros para medir radiación solar global, sensores fotovoltaicos para la banda solar visible, utilizada por la vegetación para la fotosíntesis, mediciones de temperatura y humedad del suelo, y finalmente cámaras estancas que permiten medir la tasa de incremento de la concentración de gases intercambiados directamente por el suelo, para estimar los aportes directos de ese sistema.

El volumen de información generado con este sistema de medición permite realizar investigaciones acerca de los balances de energía sobre superficies, de la evapotranspiración real de los ecosistemas naturales o antropizados bajo estudio, estudiar el ciclo del agua, de los intercambios de dióxido de carbono, metano u óxido nítrico para identificar fuentes o sumideros de estos gases de efecto invernadero, identificar prácticas de manejo que pueden ser negativas para la sustentabilidad de las actividades agropecuarias, etc.

En Argentina existen algunos grupos de investigación que trabajan con esta tecnología. Hay dos dentro del INTA (Castelar y Balcarce), uno en el CADIC-CONICET, y tres grupos más en las Universidades Nacionales de Chilecito, del Sur San Juan Bosco y la de Buenos Aires. Distintos factores, principalmente de política científica nacional, han impedido que a la fecha que exista un trabajo coordinado entre los distintos grupos de investigación, tendientes a conformar una red nacional de mediciones como la que existe en otros países.

RESULTADOS LOGRADOS

Nuestro grupo de investigación realiza estudios tendientes a conocer y caracterizar los flujos de distintas propiedades físicas intercambiadas entre superficies con vegetación y la atmósfera. Para ello realizamos campañas micrometeorológicas de mediciones desde 2007. Entre esa fecha y 2011, nuestro método de medición se basó en la técnica de los perfiles para estimar los flujos. A partir de 2012 comenzamos a implementar las mediciones con la técnica de las covarianzas turbulentas y ello nos permitió elaborar varios trabajos de investigación.

Evapotranspiración y patrones de extracción de agua en el suelo

Los flujos de vapor de agua intercambiados con las superficies estudiadas han permitido entre otras cosas generar modelos de balance de agua en la zona de raíces activas durante el ciclo de cultivo (Gassmann et al., 2011), calibraciones de sistemas de medición de humedad en el suelo (Curto et al., 2016) y aplicaciones para comprender los patrones de extracción de agua en el suelo por parte de cultivos de soja desarrollado bajo condiciones productivas típicas de la región pampeana (Curto

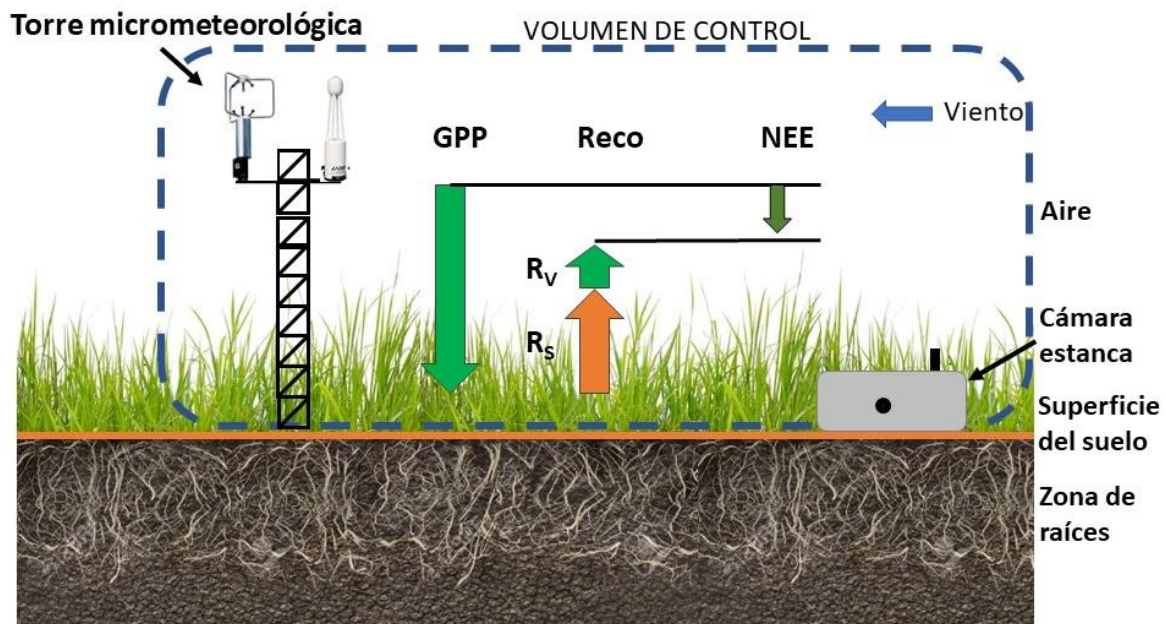


Figura 1. Diseño experimental de mediciones para flujos de dióxido de carbono en la atmósfera (NEE), vapor de agua o evapotranspiración (ET), calor sensible y de cantidad de movimiento con la técnica de covarianzas turbulentas (EC). El NEE está determinado por la diferencia entre la respiración de la vegetación (R_v) y del suelo (R_s) (fuente de CO₂ para la atmósfera) y la producción de biomasa aérea (GPP) por fotosíntesis (sumidero de CO₂ para la atmósfera). Si la diferencia resulta negativa, la superficie se comporta de forma neta como sumidero, o como fuente en caso contrario.

et al., 2019). A su vez la metodología de mediciones EC permitió encontrar formas de estimar la evapotranspiración real en función de observaciones convencionales de variables meteorológicas (Gassmann et al., 2019) y determinar umbrales de evapotranspiración para el manejo sostenible de la producción ganadera en pastizales salados (Gassmann et al., 2021). Por otra parte, mediciones en laboratorio de la retención máxima de agua de la planta de girasol, permitió determinar que la duración del agua acumulada en las axilas foliares es posiblemente el principal punto de entrada de patógenos generadores de la pudrición en períodos lluviosos y húmedos (Covi et al., 2024).

Flujos de CO₂. Análisis de datos y desarrollo de modelos vegetación-atmósfera

Las mediciones de los flujos de CO₂ han mostrado que el humedal salado de Mar Chiquita en la provincia de Buenos Aires secuestra este gas de la atmósfera más eficientemente que otras marismas del planeta (Tonti et al., 2018; Bautista et al., 2023), inclusive superior a la media mundial reportada por Murray et al. (2011). Asimismo, los estudios realizados en el cultivo extensivo de soja bajo condiciones productivas de secano, también revelaron tasas de secuestro superiores a las reportadas en otras regiones (Martínez et al., 2019). Estos resultados, si bien son muy relevantes para indicar la importancia de tener mediciones de carácter nacional, también permite calibrar modelos considerando las respuestas fisiológicas y fenológicas de nuestros ecosistemas. Ello permite escalar la información medida puntualmente a representaciones regionales a través de modelos acoplados vegetación-atmósfera. En ese sentido, se avanzó en la calibración del modelo Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM) acoplado al modelo Weather and Forecast Research Model (Merino & Gassmann, 2024). VPRM estima los flujos netos intercambiados con la atmósfera a partir del balance entre la producción primaria bruta representado por el modelo de Michaelis-Menten (Monson & Baldocchi, 2014) y un modelo de respiración, parametrizado con una función lineal dependiente de la temperatura en superficie. Los resultados permiten estudiar a largo plazo las tasas de emisión o secuestro neto de CO₂ de los ecosistemas presentes en la región núcleo productiva pampeana de nuestro país, considerando tanto períodos estacionales como anuales. A escala diaria, el modelo

calibrado también permite analizar el impacto de los distintos sistemas sinópticos que atraviesan la región y los cambios que produce en los flujos de CO₂ observados.

El rol de las estructuras de la turbulencia en los intercambios de propiedades en la atmósfera

Se analizaron las características de las estructuras turbulentas en las series temporales filtradas de 1 Hz aplicando las metodologías de los cuadrantes y wavelet (Curto et al., 2022; Curto & Gassmann, 2022). Los resultados indican que, para transportes en la dirección vertical, las estructuras de escalas temporales de 40 a 50 s, son las responsables del transporte de cantidad de movimiento dentro de la capa de superficie, mientras que las de escala temporal entre 350 y 400 s son las responsables de transportar escalares como temperatura (calor sensible) y humedad (calor latente) o dióxido de carbono en toda la capa límite. Las primeras se desarrollan principalmente bajo condiciones neutrales de estabilidad mientras que las segundas se generan preponderantemente en condiciones inestables. Estructuras coherentes de escalas temporales de hasta 50 s también están presentes bajo situaciones de libre convección, y transportan predominantemente calor sensible.

CONCLUSIONES

El acceso a recursos financieros para la adquisición de equipamiento de calidad adecuada para la investigación científica, ha permitido realizar varios trabajos originales, basados en información medida en nuestros ecosistemas, orientados a comprender los intercambios de energía y masa entre superficies con vegetación y la atmósfera. Un gran aporte original es la determinación real de las tasas de secuestro o emisión de CO₂ de nuestros ecosistemas. Además, ello facilitó formar un grupo creciente de recursos humanos en la temática, a quienes hay que preservar y sostener, para lograr mantener el desarrollo de este tipo de conocimiento que beneficia a nuestra sociedad y sus actividades económicas.

Agradecimientos Agradezco personalmente a quienes conforman y han conformado nuestro grupo de investigación: Doctores Claudio Pérez, Natalia Tonti, Lucía Curto y Mauro Covi, Licenciados Silvina Righetti, Rodrigo Merino, Antonella Burek, Nahuel Bautista y Facundo Martínez. Agradezco a las instituciones que han financiado nuestros trabajos a través de subsidios de investigación: Universidad de Buenos Aires, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y a la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación. También agradezco a las instituciones nacionales y empresariales que nos permitieron realizar las campañas de medición mencionadas en el presente trabajo (INTA-Balcarce, ARSA S.A., CELPA-MinDef, La Fayuca). Finalmente agradezco a los organizadores de la XXX Reunión de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas realizada en Buenos Aires durante el mes de abril de 2024 por su invitación para ofrecer esta presentación plenaria.

REFERENCIAS

- Bautista, N. E., Gassmann, M. I., & Pérez, C. F.** (2023). Gross primary production, ecosystem respiration, and net ecosystem production in a southeastern south american salt marsh. *Estuary and Coast*, 46(7), 1923–1937.
- Covi, M., Gassmann, M. I., & Aguirrezábal, L. N.** (2024). Unraveling space and time variability in maximum water storage among sunflower organs: Implications for wetness duration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 355. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110118>. En prensa
- Curto, L., Covi, M., & Gassmann, M. I.** (2019). Actual evapotranspiration and the pattern of soil water extraction of a soybean crop. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. UNCUYO*, 51(2), 125–141.
- Curto, L., Covi, M., Gassmann, M. I., Cambareri, M., & Della Maggiora, A. I.** (2016). Calibración de datos observados de contenido de agua en el suelo con sensores capacitivos. *Meteorologica*, 41(2), 49–63.

- Curto, L. & Gassmann, M. I.** (2022). Wavelet analysis of coherent structures above maize and soybean crops. *Boundary-Layer Meteorology*, 184(2), 231–249. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00705-w>
- Curto, L., Gassmann, M. I., Tonti, N., & Covi, M.** (2022). Study of turbulence coherent structures above two different crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 322, 109012. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109012>
- Gassmann, M. I., Gardiol, J. M., & Serio, L.** (2011). Performance evaluation of evapotranspiration estimations at a model of soil water balance. *Meteorological Applications*, 118(2), 211–222.
- Gassmann, M. I., Pérez, C. F., Tonti, N. E., Burek, A., & Covi, M.** (2021). The impact of livestock grazing on the evapotranspiration - vegetation biomass relationship in a southern hemisphere salt marsh, Buenos Aires (Argentina). *International Journal of Biometeorology*, 65, 873–882. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02065-x>
- Gassmann, M. I., Tonti, N. E., Burek, A., & Pérez, C. F.** (2019). Estimation of evapotranspiration of a salt marsh in southern South America with coupled Penman-Monteith and surface resistance models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 266-267, 109–118.
- Martínez, F., Tonti, N. E., & Gassmann, M. I.** (2019). Secuestro y emisiones de dióxido de carbono en un cultivo de soja. AA2019. IV Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental. <https://biblio.unaj.edu.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=6264>
- Merino, R. A. & Gassmann, M. I.** (2024). *Carbon dioxide exchange characterization for argentinean ecosystems using eddy covariance measurements*. Publicación en preparación.
- Monson, R. & Baldocchi, D.** (2014). *Terrestrial Biosphere-Atmosphere Fluxes*. Cambridge University Press.
- Murray, B. C., Linwood, P., Jenkins, W. A., & Sifleet, S.** (2011). Green payments for blue carbon economic incentives for protecting threatened coastal habitats. Reporte Técnico NI.R.11-04, Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions.
- Pérez, C. F., Gassmann, M. I., Tonti, N. E., & Curto, L.** (2020). Panorama sobre la producción, el transporte y depósito de aerosoles de origen biológico. *Meteorologica*, 45(1), 1–24.
- Stull, R.** (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publisher.
- Tonti, N. E., Gassmann, M. I., & Pérez, C. F.** (2018). First results of energy and mass exchange in a salt marsh on southeastern South America. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 59–68.