

Revista Argentina de Agrometeorología

ISSN 2545-8418

Editada por la
Asociación Argentina
de Agrometeorología

Revista Digital | Volumen X | Año 2019

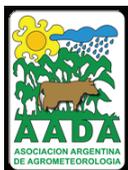



RADA
REVISTA ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGIA

Revista Argentina de

AGROMETEOROLOGIA

Volumen X. AÑO 2019



Asociación Argentina de Agrometeorología

Comisión Directiva

Presidente: Andrea Irigoyen

Vicepresidente: Olga Penalba

Secretaria: Andrea Rivarola

Secretaria de Actas: Gabriela Cruz

Tesorero: Ángel Blasón

Protesorero: Roberto Zanvettor

Vocales Titulares: Antonio de la Casa

Armando Brizuela

Vocales Suplentes: Ana Llames

Martín Pardi

Revista Argentina de

AGROMETEOROLOGÍA

Director: Pedro Enrique Boletta

Comité Científico

Coordinador: Andrés C. Ravelo

Integrantes del Comité Científico

Homero Bergamaschi

Antonio de la Casa

Patricia Figuerola

Denice Fontana

Andrea Irigoyen

Mario Murphy

Olga Penalba

Ana María Planchuelo

Andrés C. Ravelo

Rafael Rodríguez

Roberto Seiler

Paulo Senthelas

Leonardo Serio

Marta Vinocur

RADA

REVISTA ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGÍA

Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos
Agrícolas y Naturales Av. Valparaiso s/n - C.C. 509 -
C.P. 5000

Ciudad de Córdoba - ARGENTINA

www.crean.unc.edu.ar

Email: pecbol@gmail.com

Nota Editorial

En mi carácter de Director deseo expresar mi sentido pesar por el fallecimiento de quien fuera el fundador de la Revista de la Asociación Argentina de Agrometeorología, el Ing. Agr. Antonio J. Pascale. El Ing. Pascale fue un gran Profesor que fijó rumbos en la especialidad y así lo expresa con detalles el Ing. Agr. Guillermo Murphy en el obituario que ha realizado para rendir homenaje en su memoria.

El presente Volumen contiene seis trabajos que consideran distintos aspectos de interés en la Agrometeorología, de los cuales cuatro se refieren a distintos aspectos productivos y los otros dos están relacionados al cambio climático con la Agrometeorología.

Con la presente publicación ya son cuatro volúmenes que se publican en el nuevo formato digital y así se cumplen con los requisitos para su indexación en el Núcleo Básico de CONICET. Este proceso de incorporación al Núcleo Básico se ha iniciado recopilando los requisitos que se deben reunir, para iniciar el año próximo el trámite correspondiente y una vez aprobado trataremos de incorporar a RADA a Scielo, ya con una proyección internacional.

Creo necesario insistir con la solicitud a nuestra comunidad de agrometeorólogos de publicar sus investigaciones en RADA ya sean como trabajos completos, comunicaciones o notas breves. Para mantener de esta forma la continuidad de la publicación de la revista como un medio de difusión científica de los aportes de la Agrometeorología al desarrollo sustentable de nuestro país.

Ing. Ftal (M Sc.) Pedro Enrique Boletta
Director RADA



Ing. Agr. ANTONIO JUAN PASCALE 1921 - 2019

Con profunda tristeza comunicamos que en la tarde del domingo 8 de setiembre de 2019 falleció quien fuera el creador y primer Director de esta Revista Argentina de Agrometeorología.

Al momento de su deceso el Ing. Antonio J. Pascale era Profesor Titular Emérito de la Universidad de Buenos Aires en la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas, Director Fundador de la Editorial Facultad de Agronomía y Académico de Número de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria.

Nació en Buenos Aires, el 24 de enero de 1921, y egresó con Diploma de Honor de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad de Buenos Aires en abril de 1944, comenzando la brillante carrera que lo transformó en el entrañable maestro que hoy despedimos.

Ingresó, siendo todavía alumno, a la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas en 1943, realizó más de 180 trabajos científicos relacionados con la bioclimatología agrícola y la agroclimatología alcanzando gran prestigio nacional e internacional, siendo investigador invitado en Inglaterra, Canadá, Chile, Venezuela, Suiza, Colombia, Italia y Brasil.

Sus investigaciones constituyeron pilares fundamentales para la comprensión de las principales relaciones entre los cultivos y el ambiente, haciendo posible su difusión, producción e industrialización. A fines de los '60 y comienzos de los '70 identificó las limitantes para la soja en el país y determinó los "tipos agroclimáticos" del cultivo, que le permitieron el trazado de mapas de aptitud agroclimática regional para el cultivo. Es notable la coincidencia de estos mapas, trazados cuando el cultivo era casi desconocido en nuestro país, con los del área sembrada y rendimientos actuales. La metodología desarrollada y la rigurosidad científica en su aplicación le permitieron obtener resultados exitosos en otros cultivos de tan diferentes características como el trigo, girasol y pistachero.

Tenía la firme convicción de que la responsabilidad del docente universitario incluía también la publicación de sus investigaciones, su difusión y comunicación, no sólo a sus alumnos en sus clases, sino también en otros ámbitos que reuniesen a empresarios, profesionales y productores. En este sentido participó de la creación de la Comisión Permanente para el Fomento del Cultivo de la Soja, en la Bolsa de Cereales y asistió, con presentación de trabajos, a las 9 Reuniones Técnicas Nacionales de Soja, a 7 Reuniones Argentinas de Agrometeorología y a varias de las reuniones de la Asociación Brasileira de Agrometeorología. Creó la Revista de la Asociación Argentina de la Soja transformada luego en Oleaginosos. En 1980 fundó y dirigió la Revista de la Facultad de Agronomía, editada hasta 2011 y continuada por la revista Agronomía & Ambiente, que dirigió hasta la actualidad y en 2002 creó y dirigió hasta 2007 la Revista Argentina de Agrometeorología.

Tras el objetivo de lograr la trascendencia de los docentes al medio científico, tecnológico, productivo y educativo creó, en 1999, la Editorial Facultad de Agronomía (EFA), muchos de cuyos libros se han transformado en una referencia nacional e internacional de las disciplinas agronómicas y ambientales.

Otro aspecto de su actividad del cual el Ing. Pascale se sentía orgulloso, tanto como de los resultados de sus investigaciones, era su contribución a la formación de recursos humanos que hoy se dedican a la agrometeorología en nuestro país como en el resto de Latinoamérica.

Antonio tuvo en vida muchos homenajes y premios, pero tal vez, el reconocimiento como uno de los Grandes Maestros de la Universidad de Buenos Aires en 2011 sea el que represente mejor la magnitud de la huella que deja en los corazones de quienes lo conocieron personalmente o por sus acciones.

Querido Maestro, descanse en paz. Se lo merece.

Ing. Agr. Guillermo M. Murphy
Profesor Titular Consulto (FAUBA)
Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas

CONTENIDO

Proyecciones de los flujos de agua en el suelo a partir de los modelos climáticos globales del CMIP5 en Sudamérica y su impacto regional

Penalba, O.C. y V.C. Pántano 1

Evapotranspiración de Hargreaves en Argentina con datos grillados en alta resolución: Valores medios y tendencias

Serio, L.; M. Antelo y S. M. F. Zalazar 15

Evolución del área foliar en canopeos de maíz creciendo sobre cultivo de cobertura y sobre barbecho limpio bajo condiciones contrastantes de agua en el suelo

Irigoyen, A.I.; M. A. Cambareri; L. Echarte y R.E. Rivas 25

Balance hidrológico en un entorno SIG para un campo agrícola en Diamante, Entre Ríos

Kinderknecht, L. E.; M. B. Tóffoli; A. B. Brizuela y
C. A. Aguirre 35

Características del índice de temperatura y humedad modificado por el viento y radiación en Entre Ríos, Argentina

Rondán, G.A.; C.I. Michelin; A.B. Brizuela; N. Maltese; A. Kemerer y C. Aguirre 49

Conductores ambientales de la productividad de buffelgrass en el Chaco Árido de la Rioja (Argentina)

Luna Toledo, E. S.; P. I. Figuerola y A.R. Sancho 59

Proyecciones de los flujos de agua en el suelo a partir de los modelos climáticos globales del CMIP5 en Sudamérica y su impacto regional

Penalba, O. C. y V. C. Pántano

RESUMEN

Las distintas variables involucradas en la interacción suelo-atmósfera fueron analizadas en Sudamérica a partir de siete Modelos Climáticos Globales (MCG) del CMIP5. Dos períodos diferentes fueron utilizados: 1970-2005 como período climático de referencia para el experimento *historical* y 2065-2100 para las proyecciones bajo el escenario futuro (Representative Concentration Pathways) RCP 8.5. Se evaluó la sensibilidad climática de la humedad de suelo y el escurrimiento a la precipitación y evapotranspiración con foco en la región de secano de Argentina. El análisis reveló cuáles son las variables más sensibles para cada MCG.

Finalmente, los cambios futuros en los flujos de agua basados en los escenarios futuros de cambio climático fueron analizados en Sudamérica para las variables más sensibles. A pesar de que se proyectan aumentos tanto en la precipitación como en la evapotranspiración, algunos modelos muestran que los flujos de agua en el suelo responden a los incrementos en la precipitación. En base a los resultados de este estudio, no se recomienda el cálculo del ensamble para la humedad de suelo y el escurrimiento, sino que se sugiere el estudio por separado y sólo para aquellas variables sensibles al cambio climático.

Palabras clave: Balance hídrico; interacción suelo-atmósfera; escenarios de emisión futura.

Penalba, O. C. and V. C. Pántano, 2019. Soil water fluxes projections from global climate models of CMIP5 in South America and its regional impact. RADA X: 1-13

SUMMARY

The several variables involved in soil-atmosphere interaction were analyzed in South America from seven Global Climate Models (GCM) of CMIP5. Two different periods were used: 1970–2005 as climate reference for *historical* experiment and 2065–2100 for projections under the Representative Concentration Pathways scenario RCP 8.5. We assessed the climate sensitivity of soil moisture and runoff to precipitation and evapotranspiration focused on

the rainfed agriculture region of Argentina. The analysis revealed which are the more sensible variables for each GCM.

Finally, future changes in water fluxes based on future scenarios of climate change were analyzed in South America for the more sensible variables. Even though both precipitation and evapotranspiration are projected to increase, some models showed that soil water fluxes respond to increases in precipitation. Based on the results of this study, the ensemble of soil moisture and runoff is not recommended but we better suggest to study separately only for those variable sensible to climate change.

Keywords: Water balance; soil-atmosphere interaction; future emission scenarios.

O. C. Penalba y V. C. Pántano: Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Intendente Güiraldes 2160, Pabellón 2, 2° piso – Ciudad Universitaria, C1428EGA Buenos Aires, Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Av. Rivadavia 1917, C1033AA, Buenos Aires, Argentina. Correspondencia a: penalba@at.fcen.uba.ar

INTRODUCCIÓN

Las interacciones que caracterizan al sistema climático implican que el cambio en las variables de un subsistema repercute en los demás. En un contexto de cambio climático, los distintos acoplamientos que forman parte del sistema suelo-atmósfera pueden ser analizados a partir de los Modelos Climáticos Globales (MCGs). La Fase 5 del Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados (CMIP5) (Taylor *et al.*, 2012) reúne una variedad de MCGs que han crecido en complejidad a lo largo del tiempo, mejorando la representación de los procesos e incorporando nuevas incertidumbres asociadas a las distintas parametrizaciones. Sin embargo, aún presentan cierta dispersión entre ellos y en la definición de algunas variables, como aquellas involucradas en el balance hídrico del suelo.

A escala global, se han llevado a cabo algunos estudios sobre la interacción suelo-atmósfera, a partir de los MCGs del CMIP5. Por ejemplo, Dirmeyer *et al.* (2013) analizan los cambios proyectados en la interacción entre el suelo y la atmósfera a partir de 15 modelos del CMIP5 y concluyen que la misma se fortalecerá en la mayor parte del globo. Los autores indican que este resultado se debe a un aumento del control que realiza la humedad del suelo sobre los flujos de superficie en la baja tropósfera. En esa misma línea, Seneviratne *et al.* (2013) analizan el impacto

de las proyecciones futuras en los mecanismos de feedback entre suelo y atmósfera a partir de 5 modelos del CMIP5. Los autores advierten que los cambios proyectados en los regímenes de humedad de suelo impactarán en la temperatura media y extrema localmente y en latitudes medias. Sin embargo, hay pocos trabajos que abordan esta problemática a partir de los MCGs del CMIP5 en el Sudeste de Sudamérica, más específicamente en la región oriental húmeda y semi-húmeda de producción agrícola en secano de la Argentina (RS). Esta región constituye la principal base productiva, alimentaria y de exportación de la Argentina, organizándose como una región de suma importancia para la agricultura y ganadería, entre otros sectores productivos.

En un análisis más regional, se encuentran algunos trabajos en base a Modelos Climáticos Regionales (Sörensson y Menendez; 2011; Pessacg y Solman, 2012; Spennemann, 2015; entre otros). Cabe destacar los trabajos de Ruscica *et al.* (2015) y Zaninelli *et al.* (2018) que analizan los cambios proyectados para los principales flujos de interacción entre el suelo y la atmósfera: precipitación y evapotranspiración, en base a modelos climáticos regionales. Los autores concluyen que el Sudeste de Sudamérica se caracteriza por una tendencia significativa hacia condiciones más húmedas dadas por un incremento de agua disponible y de precipitación por sobre evapotranspiración.

Al llevar a cabo un estudio basado en MCGs, se deben tener en cuenta varios aspectos sobre la selección del grupo de modelos y el cómputo del ensamble. En primer lugar, determinados modelos representan mejor las variables climáticas en algunas regiones mientras que sobreestiman o subestiman en otras. A partir de esta variabilidad entre los modelos, se recomienda el uso de un "ensamble" multi-modelos que mejora el desempeño debido a la cancelación de los errores individuales por compensación (Knutti *et al.*, 2010). Knutti *et al.* (2013) indican que el ensamble puede estar sesgado por la inter-dependencia entre modelos por origen institucional o por códigos compartidos. Es por ello que los autores recomiendan que la selección busque la máxima independencia posible entre los modelos para mejorar el desempeño del ensamble.

Este tipo de metodologías es aplicable a las variables climáticas, como temperatura y precipitación, cuya definición es coincidente entre los modelos. Sin embargo, se encuentran en la bibliografía diferencias en la definición y cómputo de los flujos de agua que participan del submodelo suelo de cada MCG del CMIP5. Por lo tanto, las respuestas de estos flujos a los cambios en las variables climáticas también van a diferir entre los distintos modelos seleccionados.

A pesar de las limitaciones que presentan los MCGs, es un recurso que se utiliza para brindar información a los tomadores de decisiones políticas y económicas de diversos sectores y sobre el cual se generan convenios y compromisos políticos a nivel regional y global a largo plazo. Por lo tanto, la comunidad científica debe advertir sobre dichas limitaciones en la interpretación de las salidas de los MCGs.

A partir de lo expuesto, el objetivo de este trabajo es evaluar la sensibilidad en la respuesta de los principales flujos de agua involucrados en la interacción suelo-atmósfera en Sudamérica, con especial foco en la región de secano de Argentina, y analizar los cambios proyectados, a partir de los MCGs del CMIP5.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo a escala mensual, en Sudamérica, con especial atención en la región de producción agrícola en secano de la Argentina (Figura 1).

Para llevar a cabo este trabajo se utilizaron datos observacionales de precipitación mensual en puntos de retícula del Global Precipitation



Figura 1. Área de estudio considerada para el análisis e identificación de la región de secano: RS (28°S-38°S; 58°O-64°O).

Centre (GPCC) Full Data Reanalysis v6 (Schneider *et al.*, 2011) y salidas de los MCGs derivados de la base multi-modelo del CMIP5 (Taylor *et al.*, 2012). Para el análisis del tiempo presente se utilizó el experimento *historical* en el período 1970-2005 y las proyecciones bajo el escenario futuro (Representative Concentration Pathways) RCP 8.5 para el período 2065-2100.

La selección de los modelos consistió en 3 etapas. En primer lugar, se identificaron aquellos modelos disponibles para los experimentos con los que se iba a trabajar. Con el objetivo de utilizar un conjunto de modelos independientes (Knutti *et al.*, 2013), el proceso continuó con la selección de un solo modelo por institución. Debido a que algunos modelos pertenecientes a instituciones distintas presentan similitudes en sus códigos, cuando dos modelos comparten el mismo código del sub-modelo suelo, se seleccionó sólo uno de ellos. Finalmente, se estudiaron las parametrizaciones del sub-modelo suelo de cada modelo y se seleccionaron aquellos que permitían la mejor comparación con resultados previos (Pántano y Penalba, 2017). A partir de este proceso de selección, se dispuso de 7 MCGs detallados en la Tabla 1.

Tabla 1. Detalle de los Modelos Climáticos Globales seleccionados del CMIP5.

Modelo	ID de la Institución (País)	Submodelo Atmósfera	Sub-modelo Suelo y Referencias	Referencia del modelo
ACCESS 1.0	CSIRO-BOM (Australia)	AGCM v1.0	MOSES2 (Cox et al., 1999; Essery et al., 2001 y Essery y Clark, 2003)	Bi et al. (2013)
CanESM2	CCCMA (Canadá)	CanAM4	CLASS2.7 y CTEM1 (Arora y Matthews, 2009 y Arora y Boer, 2010)	Arora et al. (2011) y Christian et al (2010)
CESM1 (CAM5)	NSF-DOE-NCAR (Estados Unidos)	Community Atmosphere Model 5 (CAM5)	CLM4 (Oleson et al., 2010)	Lawrence et al. (2011)
EC-EARTH	EC-EARTH	IFS	Htessel (Balsamo et al., 2009)	Hazeleger et al. x2010).
IPSL-CM5A-MR	IPSL (Francia)	LMDZ4	ORCHIDEE (Krinner et al., 2005 y De Rosnay y Polcher, 1998)	Dufresne et al. (2013)
MIROC5	MIROC (Japón)	MIROC-AGCM6	MATSIRO (Takata et al., 2003)	Watanabe et al (2010)
MPI-ESM-MR	MPI-M (Alemania)	ECHAM6	JSBACH basado en BETHY (Knorr, 2000) y ECHAM5 (Roeckner et al., 2003)	Raddatz et al. (2007)

Para una mejor comparación de los resultados, las salidas de los MCGs y los datos observados fueron interpolados a una retícula común de 2° por 2°, utilizando el método de interpolación bilineal (Accadia *et al.*, 2003). El análisis se realizó para cada uno de los modelos y para ensamble multi-modelo.

La relación entre los flujos de agua involucrados en el sub-modelo de cada MCG se consideró a partir de la siguiente ecuación general de balance de humedad de suelo mensual basada en el principio de conservación de masa:

$$\frac{\partial(HS)}{\partial t} = PP - ET \pm E + otrosflujos \quad (1)$$

donde HS es la humedad del suelo; PP la precipitación; ET la evapotranspiración y E el escurrimiento. La mayoría de los modelos discriminan las variables HS y E en valores totales y superficiales. En este estudio, teniendo en cuenta las características de la región de interés, no se incluyen en el análisis los ingresos de agua al suelo por riego y por derretimiento de nieve. A su vez,

debido al enfoque climatológico del mismo, no se tienen en cuenta- los flujos de menor escala como, por ejemplo, la intercepción de precipitación por parte del canopeo. A partir de la ecuación (1), las variables que fueron utilizadas y sus unidades originales se detallan en la Tabla 2. Las unidades de los flujos de agua (precipitación, escurrimiento y evapotranspiración) fueron convertidas a mm de espesor de la lámina de agua por mes y la humedad de suelo a mm de espesor de la lámina de agua.

Los experimentos del CMIP5 consideran a la HS superficial en los primeros 10 cm del suelo, sin embargo su metodología de cálculo depende del modelo, al igual que la estimación del escurrimiento. Es por ello que para el análisis de estos flujos se evalúa la sensibilidad de las distintas variables para cada modelo a partir de probabilidades condicionales y el análisis estadístico de tablas de contingencia a través del estadístico Chi2 (Wilks, 2006).

Tabla 2. Variables utilizadas de los Modelos Climáticos Globales. (El nombre corto corresponde a las siglas con que fueron identificadas en este trabajo)

Variable	Nombre corto	Unidades originales	Submodelo
Precipitación	PP	kg m ⁻² s ⁻¹	Atmósfera
Evaporación	ET	kg m ⁻² s ⁻¹	Atmósfera
Humedad en la porción más alta de la columna de suelo.	HS sup	kg m ⁻²	Suelo
Contenido total de humedad en el suelo	HS total	kg m ⁻²	Suelo
Escurrimiento superficial	E sup	kg m ⁻² s ⁻¹	Suelo
Escurrimiento total	E total	kg m ⁻² s ⁻¹	Suelo

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1) Balance entre precipitación y evapotranspiración (exp. *Historical*)

El estudio fue llevado a cabo a escala mensual y anual y para uno de los modelos seleccionados y el ensamble. A modo de síntesis, algunos resultados serán mostrados en los meses enero y julio y otros a escala anual.

Inicialmente, se validó la precipitación de los MCGs en comparación con las observaciones de la base de datos del GPCC. En la Figura 2 se muestran los resultados del *bias* porcentual de los valores medios de PP de los meses de enero y julio con respecto a las observaciones, calculado según la siguiente ecuación:

$$\text{Bias (\%)} = \frac{(\text{Modelo} - \text{observaciones})}{\text{observaciones}} * 100 \quad (2)$$

La mayoría de los modelos subestiman la PP en la región del Amazonas y hacia el Sudeste de Sudamérica. Estas áreas se extienden o reducen según el mes (no se muestra). En el caso del ACCESS 1.0, sobreestima en algunas zonas del Amazonas. En general, en julio, las áreas de subestimación en el Amazonas se intensifican y extienden hacia el sur hasta la región RS. También se intensifica la sobreestimación del modelo ACCESS 1.0. Hacia el oeste (Cordillera de los Andes) y al sur de 40°S, los modelos sobreestiman la precipitación. Barros *et al.* (2002) advierte que los errores en los Andes se deben a la dificultad de los modelos en describir el flujo cercano a superficie y el ciclo diario. Sobre el noreste de

Brasil, se observa una sobreestimación de PP para algunos modelos. En cuanto a las magnitudes, el modelo que presenta las mayores diferencias sobre la región de interés de este estudio es el IPSL-CM5A-MR que supera la subestimación del 50% en julio. El ensamble sigue el mismo patrón de subestimación en el Amazonas y región RS y sobreestimación sobre los Andes y noreste de Brasil, principalmente. Mayor información sobre esta validación se puede consultar en Pántano (2016).

Posteriormente, se evaluaron los valores medios mensuales de PP-ET, integrando las limitaciones encontradas en la validación de la precipitación a fin de advertir sobre la interpretación del resultado. En la Figura 3 se presentan estos resultados para enero y julio, para el ensamble. En el Sur del Amazonas y centro de Sudamérica, las mayores PP características de los meses estivales prevalecen por sobre la ET; a pesar de que, en esa región, la PP es subestimada por los modelos. Por el contrario, durante los meses fríos, PP-ET es negativo. Sin embargo, debido a la subestimación de PP, no se puede ser concluyente sobre los resultados para este mes. En el Noroeste de Sudamérica los máximos de PP se dan en julio, de manera que en la figura se observa PP-ET negativo en enero y PP-ET positivo en julio. En el Sudoeste de la Patagonia, los altos valores de PP superan la baja ET todo el año, aunque la PP allí es sobreestimada. En el Norte de la Patagonia y centro-oeste de Argentina, la ET supera a la PP en enero. En la región de Secano (recuadro Figura 3), también ET supera a PP en enero pero el balance es de menor magnitud, mientras que en julio PP-ET es positivo con valores cercanos a cero.

Dada la importancia de estos resultados, en

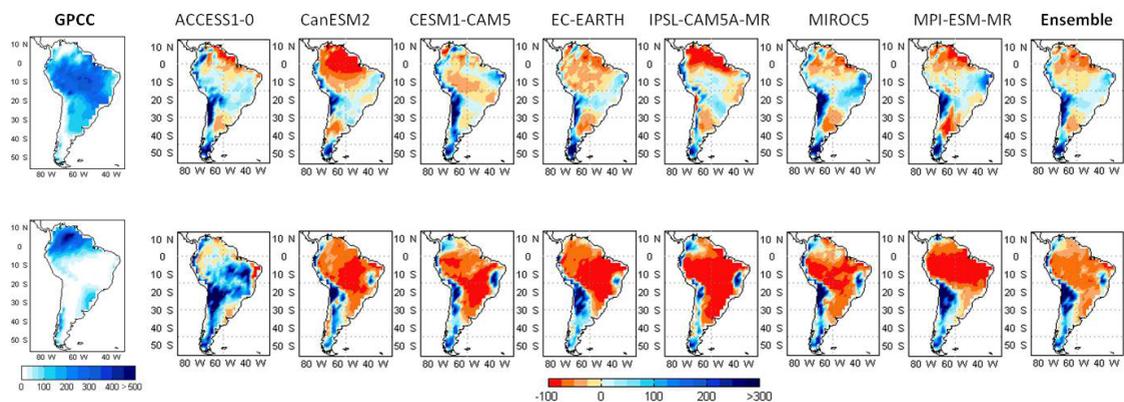


Figura 2: Panel izquierdo: Campos medios de precipitación acumulada mensual del GPCC. Paneles hacia la derecha: *Bias* porcentual (%) de los MCGs y el ensamble respecto a la base de datos GPCC en Sudamérica (superior: enero; inferior: julio).

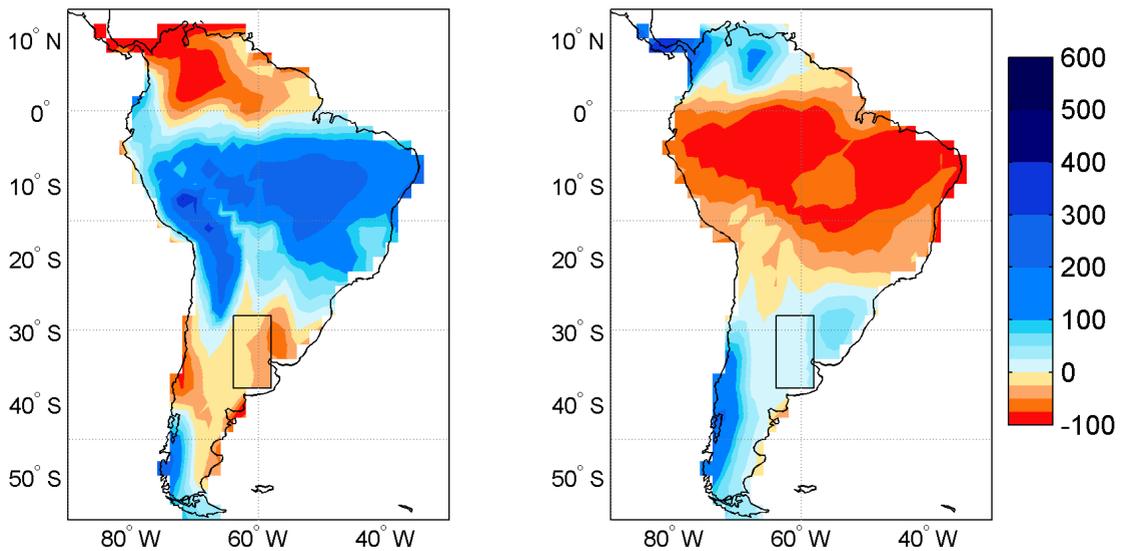


Figura 3. Distribución espacial de PP-ET media en mm para enero (izquierda) y julio (derecha), para el período 1970-2005, a partir del ensamble. En el recuadro se indica la región RS.

particular en la región de secano, se evalúa la representación del ciclo anual de PP-ET por parte de cada uno de los modelos (Figura 4). De la Figura se observa un predominio de PP por encima de ET en los meses de otoño y primavera. En los meses de invierno, en los que tanto PP como ET disminuyen (Pántano *et al.*, 2014), los modelos presentan valores bajos de PP-ET mientras que en los meses de verano predomina ET sobre PP.

Respuesta del suelo

El comportamiento será distinto para cada modelo, ya que depende de las parametrizaciones y ecuaciones termo-dinámicas del submodelo

suelo correspondiente a cada uno. Al respecto, en esta sección se analizan los flujos de cada modelo, para la región RS en particular.

Para ello se identifican los valores medios de los totales anuales de cada uno de los flujos que intervienen en la ecuación (1). En la Tabla 3 se muestran estos valores a escala anual promediados en la región RS. Los casilleros en blanco en la Tabla se deben a que algunos modelos no tienen disponibles las 4 variables. En primer lugar se analiza si los flujos anuales cumplen con las expectativas básicas de relación entre ellos, a pesar de las diferencias en sus parametrizaciones. A partir de este análisis, se

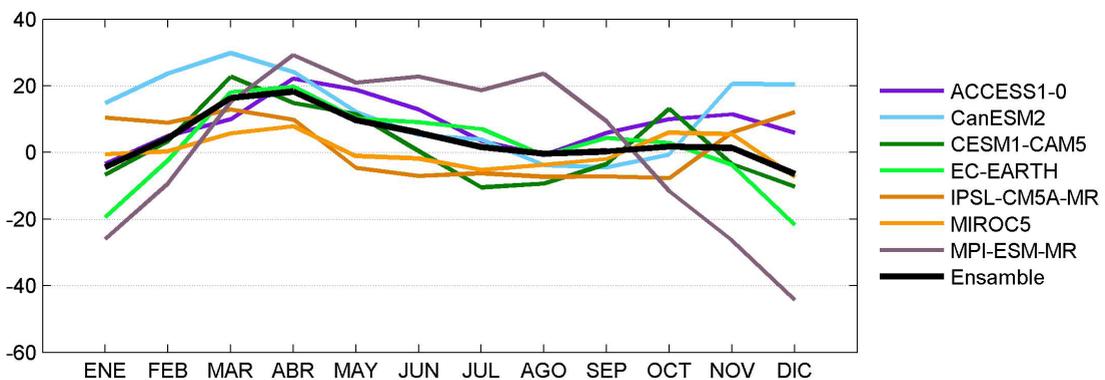


Figura 4. Ciclo anual medio de PP-ET media en mm, para el período 1970-2005, promediado en la región RS, para cada MCG y el ensamble.

corroborar que las variaciones de humedad de suelo son muy pequeñas, consistente con la escala de trabajo, mientras que la ET representa el flujo saliente más importante del subsistema suelo. El modelo ACCESS1.0 presenta valores de escurrimiento superficial mayores que los demás modelos y se debe a que en su submodelo MOSES 2.2 los excesos de agua en el suelo son removidos lateralmente contribuyendo a valores más altos de escurrimiento superficial (Kowalczyk *et al.*, 2013). El valor medio de PP del modelo CESM1-CAM5 es cercano al del modelo ACCESS 1.0, pero debido a que el primero genera valores más altos de ET, el escurrimiento, total y superficial, es menor. El modelo CanESM2 es el que presenta la mayor fracción de salida por escurrimiento total.

Con respecto al escurrimiento, no todos los modelos lo consideran como flujo entrante y saliente de la retícula. Para identificar cómo se comporta esta variable en cada modelo, en la Tabla 4 se contabilizan los valores positivos, negativos y nulos. Las celdas sombreadas indican aquellos modelos en los que el escurrimiento (total o superficial) contiene un gran número de ceros. Es interesante destacar que los modelos MIROC5 y CESM1-CAM5 consideran el ingreso de agua a la retícula por escurrimiento, mientras que para los demás modelos el escurrimiento es siempre mayor o igual a cero. En el caso del modelo IPSL-CM5A-MR, que presenta gran cantidad de ceros, De Rosnay y Polcher (1998) explican que

el sub-modelo SECHIBA cuantifica los valores de escurrimiento cuando el suelo está saturado y PP-ET es positivo, de lo contrario el escurrimiento está igualado a cero. Cabe destacar que si bien el escurrimiento total y superficial están disponibles en las salidas del CMIP5 de este modelo, el sub-modelo SECHIBA sólo considera escurrimiento profundo, por lo cual el escurrimiento superficial informado en la Tabla 4 para el modelo IPSL-CM5A-MR corresponde al escurrimiento profundo o total, dando valores iguales para las dos variables. Idéntica situación ocurre con el modelo MPI-ESM-MR en el que la variable corresponde al escurrimiento superficial (Roeckner *et al.*, 2003). A partir de los resultados de la Tabla 4, los casos en que el escurrimiento contiene una gran número de ceros fueron considerados independientes de la variabilidad de PP-ET y, por lo tanto, no se tuvieron en cuenta en el análisis que se continúa.

Con el fin de identificar la sensibilidad del escurrimiento y la humedad de suelo, se estudió la coherencia con PP-ET a partir de rangos de percentiles, separando en condiciones normales (P40 a P60), valores altos (P60 a P80), bajos (P20 a P40) y extremos (<P20 y >P80). A modo de ejemplo, en la Figura 5 se muestra la probabilidad de que la variable se encuentre en cada categoría para el modelo MPI-ESM-MR, condicionado a valores extremos bajos de PP-ET. En este caso, el escurrimiento superficial responde al balance PP-ET con una probabilidad del 53% de presentar

Tabla 3. Valores medios anuales de precipitación (PP), evapotranspiración (ET), variación de humedad de suelo (VHS) total y superficial, escurrimiento (E) total y superficial; promediados sobre la región RS.

	PP	ET	VHS _{total}	VHS _{sup}	E _{total}	E _{sup}
ACCESS1.0	884	783	0	0		123
CanESM2	908	761	0	0	145	12
CESM1-CAM5	879	857	0	0	25	25
EC-EARTH	820	796				39
IPSL-CM5A-MR	478	458	0	0	34	2
MIROC5	560	556	0	0	24	22
MPI-ESM-MR	665	643	1		20	12

Tabla 4. Cantidad de casos de Escurrimiento (total y superficial) positivo, negativo o nulo.

	E _{total}			E _{sup}		
	>0	0	<0	>0	0	<0
ACCESS1.0				10368	0	0
CanESM2	10332	36	0	1556	8812	0
CESM1-CAM5	9259	0	1109	10368	0	0
EC-EARTH				10368	0	0
IPSL-CM5A-MR	1726	8642	0	1726	8642	0
MIROC5	7812	2538	18	4840	5477	51
MPI-ESM-MR	10368	0	0	10367	0	1

valores extremos bajos. El escurrimiento total también responde a PP-ET mientras que no se evidencia la respuesta en la humedad de suelo total. La relación entre todos los intervalos de PP-ET y, por ejemplo, el escurrimiento superficial se resume en una Tabla de Contingencia como se muestra en la Tabla 5.

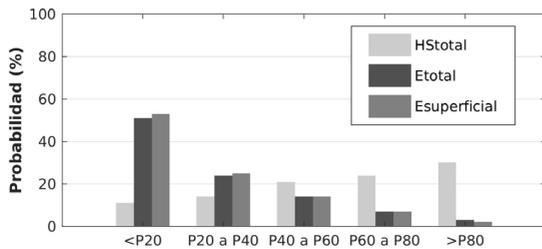


Figura 5. Probabilidad de ocurrencia de humedad del suelo (HS) total, escurrimiento (E) total y superficial dados valores extremos bajos de PP-ET, para el modelo MPI-ESM-MR

En general, para los diferentes modelos, los resultados muestran que algunas variables son más sensibles a las variaciones de PP-ET que otras. Con el fin de evaluar la significancia de esta relación se aplicó un test de Chi2, con un nivel significancia 5% (Tabla 6).

El análisis revela que las variables más sensibles para cada modelo son:

- ACCESS 1.0: humedad de suelo superficial y escurrimiento superficial.
- CanESM2: humedad de suelo total y superficial y escurrimiento total.
- CESM1-CAM5: humedad de suelo superficial y escurrimiento total y superficial.
- EC-EARTH: ninguno
- IPSL-CM5A-MR: humedad de suelo superficial.
- MIROC5: humedad de suelo superficial.
- MPI-ESM-MR: escurrimiento total y superficial.

Tabla 6. Valor del estadístico Chi2 empírico de la relación entre cada variable (HS total, HS sup, E total, E sup) y PP-ET de cada modelo. Se indican las variables que muestran independencia con PP-ET (rojo) y las que presentan dependencia significativa (azul) (valor del estadístico Chi2 teórico: 28.9; significancia: 5%).

Chi2	HS total	HS sup	E total	E sup
ACCESS 1.0	18	105		391
CanESM2	36	169	43	
CESM1 (CAM5)	1	98	515	538
EC-EARTH				2
IPSL-CM5A-MR	25	170		
MIROC5	24	107		
MPI-ESM-MR	27		325	353

2) Proyecciones en el período 2065-2100

El incremento en la emisión de gases de efecto de invernadero ha contribuido, entre otros factores, a los cambios observados en las variables climáticas a escala global y regional (IPCC, 2007). La respuesta del sistema climático a este forzante seguirá teniendo consecuencias en el futuro, aún si las emisiones se estabilizan en el valor estimado de los últimos años (IPCC, 2014).

A partir del escenario de emisión de gases de efecto invernadero RCP8.5 para el periodo 2065-2100, se analizó el cambio porcentual proyectado para las principales variables involucradas en los flujos de agua (PP y ET), en forma multiplicativa (futuro/historical).

En las Figuras 6, 7 y 8 se muestran estos resultados para los meses de enero y julio, para PP, ET y balance entre ambas variables, respectivamente, a partir del ensamble. Esta información se complementa con el acuerdo (*agreement*) entre los 7 MCGs con respecto a los aumentos.

Tanto en enero como en julio, se proyectan aumentos de PP en la Región RS (Figura 6). En enero, la mayoría de los modelos concuerdan con estos aumentos en dicha región, al igual que al este de Brasil y Perú, mientras que se proyectan disminuciones en el extremo sur y extremo norte

Tabla 5. Probabilidad de ocurrencia de los flujos en las distintas categorías, condicionados a las distintas condiciones de PP-ET, para el modelo MPI-ESM-MR.

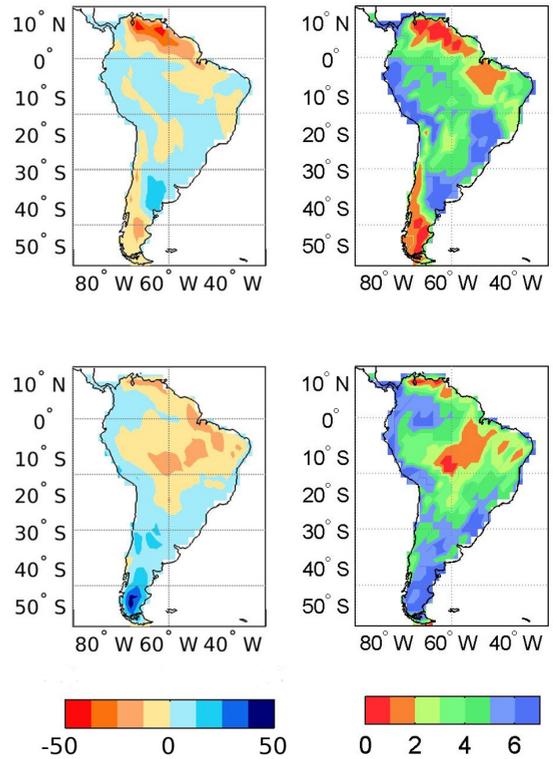
MPI-ESM-MR		E sup				
< P20		P20 a 40	P40 a 60	P60 a 80	> P80	
PP-ET	< P20	53	25	14	7	2
	P20 a 40	31	35	21	9	3
	P40 a 60	10	25	39	18	8
	P60 a 80	4	10	27	41	18
	> P80	1	2	7	22	68

de Sudamérica con alto acuerdo entre modelos. En julio, hay acuerdo en el aumento en la región RS y centro-este de Brasil, y en la disminución en el noreste de Brasil y centro de Chile.

Para la ET (Figura 7) se proyectan incrementos en la mayor parte de Sudamérica en enero y del centro hacia el sur en julio. Las disminuciones de ET se proyectan en el noreste de Brasil y la Patagonia en enero.

Dado que las proyecciones indican incrementos tanto en PP como en ET, en la Figura 8 se presentan los resultados para PP-ET. Particularmente, en la región de interés, los incrementos tanto de PP como de ET se compensan y, por lo tanto, se observa un bajo acuerdo entre modelos en PP-ET (Figura 8), aumentando la incertidumbre. Aún así, el aumento proyectado para enero coincide con lo obtenido por Menéndez *et al.* (2016) para los meses de verano.

Finalmente, con el foco en la región RS, se analizaron las proyecciones en el escurrimiento para aquellos modelos en los que esta variable es sensible a los cambios de PP-ET. En la Figura 9 se puede observar que en todos los casos responden



Figuras 7. Como Figura 6, para ET.

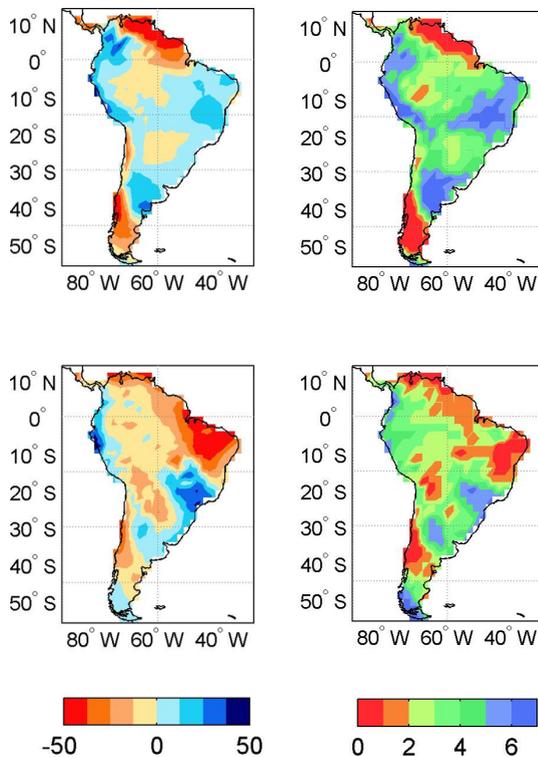
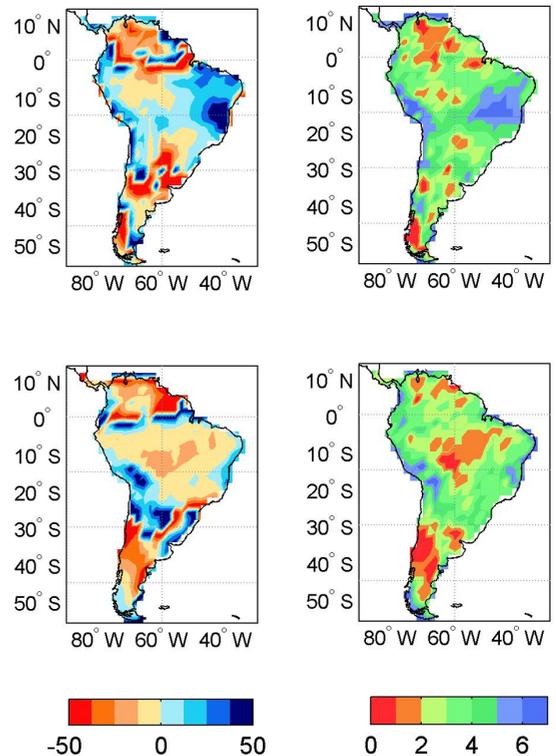


Figura 6. Cambio proyectado para precipitación (panel izquierdo) y acuerdo entre los 7 MCGs en el aumento (panel derecho) para enero (superior) y julio (inferior).



Figuras 8. Como Figura 6, para PP-ET.

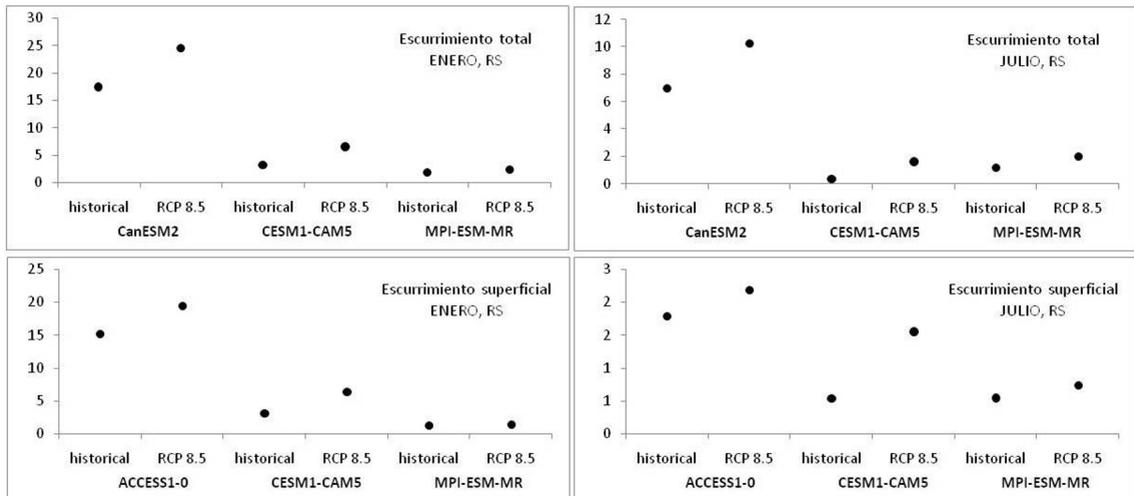


Figura 9. Esgurrimento total (arriba) y superficial (abajo) futuro (RCP8.5) e *historical*, en los modelos más dependientes de los valores de PP-ET para enero (izquierda) y julio (derecha).

con aumentos, pero de distinta magnitud. Por ejemplo, se proyectan aumentos de esgurrimento superficial según ACCESS 1.0 y CESM1-CAM5i en enero y julio, mientras que los cambios en MPI-ESM-MR son pequeños. A su vez, se proyectan aumentos de esgurrimento total según CanESM2 y CESM1-CAM5 en ambos meses de mayor magnitud que según MPI-ESM-MR.

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudiaron los principales flujos de agua involucrados en la interacción entre el suelo y la atmósfera, a partir de las salidas de los modelos seleccionados del CMIP5 y sus proyecciones bajo el escenario de cambio climático.

Por un lado, se identificaron las variables más sensibles a las variaciones de PP-ET para cada modelo en Sudamérica y particularmente en la Región de Secano; este análisis se llevó a cabo por intervalos de percentiles. El resultado pone en evidencia que la sensibilidad de cada variable depende de las ecuaciones que describen las parametrizaciones de cada modelo. Por ejemplo, el suelo puede saturar a partir de distintos umbrales para distintos modelos, por lo cual una determinada magnitud de precipitación va a aportar al aumento de humedad del suelo para algunos y va a generar esgurrimento en otros. Este resultado está en concordancia con Williams *et al.* (2012) que explican que la simulación del impacto de las precipitaciones sobre la humedad

del suelo, dependen de las ecuaciones propuestas para el esgurrimento y la infiltración. Los autores encuentran que, debido a que los modelos utilizan distintas parametrizaciones, la representación de los acoplamientos entre la temperatura, la precipitación y la humedad del suelo y en el tiempo de respuesta a escala diaria es diferente para cada modelo.

Por otro lado, se mostraron los aumentos proyectados para precipitación y evapotranspiración en Sudamérica. Estos resultados están en concordancia con las proyecciones obtenidas por Ruscica *et al.* (2015) y Menéndez *et al.* (2016) a partir de un Modelo Climático Regional. En respuesta a los aumentos de precipitación, aquellos modelos más sensibles proyectan aumentos en el esgurrimento. Complementariamente a este resultado, Pántano *et al.* (2017) muestran que los aumentos proyectados para la temperatura influyen en el balance hídrico con un aumento de la demanda atmosférica de vapor de agua. De acuerdo a los resultados encontrados en este trabajo, ese aumento no alcanzaría a amortiguar el aumento del balance entre la precipitación y la evapotranspiración. Sin embargo, es necesario puntualizar que los resultados que se mostraron son en términos medios y que el cambio puede ocurrir en la variabilidad. Con lo cual, un aumento del balance entre el ingreso y la salida de agua al suelo no deja exenta a la región de la posible ocurrencia de extremos de sequía. En este sentido, Penalba y Rivera (2016) muestran que las proyecciones para un escenario futuro presentan incrementos en la frecuencia de

sequías caracterizadas por duraciones más cortas y mayor severidad. Los impactos sobre el balance hídrico no sólo dependen de la temperatura y la precipitación, sino también del tipo de suelo y del uso de la tierra.

En este trabajo se buscó identificar las variables más sensibles a la respuesta entre PP y ET y evaluar su incertidumbre. Los resultados muestran las diferencias entre los modelos en la representación de los flujos de agua involucrados en el balance hídrico del suelo que luego se deriva en una respuesta diversa del escurrimiento a los cambios proyectados en precipitación y evapotranspiración. En base a los resultados obtenidos, este estudio recomienda que el análisis de los flujos de agua en el suelo a partir de MCGs se realice individualmente para cada modelo por separado y no a partir de un ensamble, a diferencia de lo que se recomienda para las variables climáticas.

AGRADECIMIENTOS

A los proyectos UBACyT2018 20020170100 357BA y CONICET PIP 0137.

BIBLIOGRAFÍA

- Accadia, C.; S. Mariani, M. Casaioli, A. Lavagnini, A. Speranza, 2003. Sensitivity of Precipitation Forecast Skill Scores to Bilinear Interpolation and a Simple Nearest-Neighbor Average Method on High-Resolution Verification Grids. *Weather and Forecasting* 18 (5): 918-932.
- Arora, V.K. y G.J. Boer, 2010. Uncertainties in the 20th century carbon budget associated with land use change, *Global Change Biology* 16(12): 3327-3348.
- Arora V.K. y H.D. Matthews, 2009. Characterizing uncertainty in modeling primary terrestrial ecosystem processes. *Global Biogeochemical Cycles* 23 (2): 14 pp.
- Arora V.K.; J.F. Scinocca, G.J. Boer, J.R. Christian, K.L. Denman, G.M. Flato, V.V. Kharin, W.G. Lee y W.J. Merryfield, 2011. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters* 38 (5): 6 pp.
- Balsamo G.; P. Viterbo, A. Beljaars, B. Van Den Hurk, M. Hirschi, A.K. Betts y K. Scipal, 2009. A Revised Hydrology for the ECMWF Model: Verification from Field Site to Terrestrial Water Storage and Impact in the Integrated Forecast System. *American Meteorological Society* 10(3): 623-643.
- Barros, V.; M. Doyle, M. González, I. Camilloni, R. Bejaran, R.M. Cafferla, 2002. Climate variability over subtropical South America and the South American monsoon: A review. *Meteorologica* 27: 33-57.
- Bi D.; M. Dix, S.J. Marsland, S. O'Farrell, H.A. Rashid, P. Uotila, A.C. Hirst, E. Kowalczyk, M. Golebiewski, A. Sullivan, H. Yan, N. Hannah, C. Franklin, Z. Sun, P. Vohralik, I. Watterson, X. Zhou, R. Fiedler, M. Collier, Y. Ma, J. Noonan, L. Stevens, P. Uhe, H. Zhu, S.M. Griffies, R. Hill, C. Harris y K. Puri, 2013. The ACCESS coupled model: description, control climate and evaluation. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal* 63: 41-64
- Christian J.R.; V.K. Arora, G.J. Boer, C.L. Curry, K. Zahariev, K.L. Denman, G.M. Flato, W.G. Lee, W.J. Merryfield, N.T. Roulet y J.F. Scinocca, 2010. The global carbon cycle in the Canadian Earth system model (CanESM1): Preindustrial control simulation, *Journal of Geophysical Research* 115, no G3
- Cox P.M.; R.A. Betts, C.B. Bunton, R.L.H. Essery, P.R. Rowntree y J. Smith, 1999. The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dynamics* 15(3): 183-203.
- De Rosnay, P. y J. Polcher, 1998. Modelling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM. *Hydrology and Earth System Sciences* 2 (2-3): 239-255.
- Dirmeyer, P.A.; Y. Jin, B. Singh, X. Yan, 2013. Evolving Land-Atmosphere Interactions over North America from CMIP5 Simulations. *Journal of Climate* 26 (19): 7313-7327
- Dufresne J.L.; M.A. Foujols, S. Denvil, A. Caubel, O. Marti, O. Aumont, Y. Balkanski, S. Bekki, H. Bellenger, R. Benshila, S. Bony, L. Bopp, P. Braconnot, P. Brockmann, P. Cadule, F. Cheruy, F. Codron, A. Cozic, D. Cugnet, N. de Noblet, J.P. Duvel, C. Ethé, L. Fairhead, T. Fichefet, S. Flavoni, P. Friedlingstein, J.Y. Grandpeix, L. Guez, E. Guilyardi, D. Hauglustaine, F. Hourdin, A. Idelkadi, J. Ghattas, S. Joussaume, M. Kageyama, G. Krinner, S. Labetoulle, A. Lahellec, M.-P. Lefebvre, F. Lefevre, C. Levy, Z.X. Li, J. Lloyd, F. Lott, G. Madec, M. Mancip, M. Marchand, S. Masson, Y. Meurdesoif, J. Mignot, I. Musat, S. Parouty, J. Polcher, C. Rio, M. Schulz, D. Swingedouw, S. Szopa, C. Talandier, P. Terray, N. Viovy, N. Vuichard, 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics* 40: 2123-2165.
- Essery R.; M. Best y P. Cox, 2001. MOSES 2.2 Technical Documentation. Nota técnica 30 del Hadley Centre del 14 de Agosto de 2001.
- Essery R. y D.B. Clark, 2003. Developments in the MOSES 2 land-surface model for PILPS 2e. *Global and Planetary Change* 38(1): 161-164.
- Hazeleger W.; C. Severijns, T. Semmler, S. Stefanescu, S. Yang, X. Wang, K. Wyser E. Dutra, J.M. Baldasano,

- R. Bintanja, P. Bougeault, R. Caballero, A.M.L. Ekman, J.H. Christensen, B. van den Hurk, P. Jimenez, C. Jones, P. Kållberg, T. Koenigk, R. McGrath, P. Miranda, T. Van Noije, T. Palmer, J.A. Parodi, T. Schmith, F. Selten, T. Storelvmo, A. Sterl, H. Tapamo, M. Vancoppenolle, P. Viterbo y Willén U.; 2010. EC-Earth: a seamless earth-system prediction approach in action. *Bulletin of American Meteorological Society* 91: 1357–1363.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds: Core Writing Team, Pachauri R.K. y Meyer L.A.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Knorr W.; 2000. Annual and interannual CO₂ exchanges of the terrestrial biosphere: Process based simulations and uncertainties. *Global Ecology and Biogeography* 9(3): 225-252.
- Knutti, R.; R. Furrer, C. Tebaldi, J. Cermak, G.A. Meehl, 2010. Challenges in combining projections from multiple climate models. *J Clim* 23(10): 2739–2758.
- Knutti, R.; D. Masson, A. Gettelman, 2013. Climate model genealogy: generation CMIP5 and how we got there. *Geophys Res Lett* 40(6): 1194–1199.
- Kowalczyk, E.; L. Stevens, R. Law, M. Dix, Y. Wang, I. Harman, K. Haynes, J. Srbnovsky, B. Pak, T. Ziehn, 2013. The land surface model component of ACCESS: description and impact on the simulated surface climatology. *Australian Met. and Oceanographic Journal* 63: 65–82.
- Krinner G.; N. Viovy, N. de Noblet Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch y I.C. Prentice, 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles* 19(1): 33 pp.
- Lawrence D.M.; K.W. Oleson, M.G. Flanner, P.E. Thornton, S.C. Swenson, P.J. Lawrence, X. Zeng, Z.-L. Yang, S. Levis, K. Sakaguchi, G.B. Bonan y A.G. Slater, 2011. Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the Community Land Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 3(1): 27 pp.
- Menéndez, C.G. ; P.G. Zaninelli, A.F. Carril, E. Sánchez, 2016. Hydrological cycle, temperature, and land surface atmosphere interaction in the La Plata Basin during summer: Response to climate change. *Climate Research* 68(2-3): 231-241.
- Oleson K.W.; D.M. Lawrence, G.B. Bonan, M.G. Flanner, E. Kluzek, P.J. Lawrence, S. Levis, S.C. Swenson, P.E. Thornton, A. Dai, M. Decker, R. Dickinson, J. Feddema, C.L. Heald, F. Hoffman, J.F. Lamarque, N. Mahowald, G.-Y. Niu, T. Qian, J. Randerson, S. Running, K. Sakaguchi, A. Slater, R. Stockli, A. Wang, Z.-L. Yang, X. Zeng y X. Zeng, 2010: Technical description of version 4.0 of the Community Land Model. *Nota Técnica NCAR*, 257.
- Pántano V.; 2016. Sensibilidad de la interacción suelo-atmósfera a los extremos de temperatura y precipitación en el sudeste de Sudamérica. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires, <https://digital.bl.fcen.uba.ar/gsd-282/cgi-bin/library.cgi?p=about&c=tesis> Buenos Aires.
- Pántano, V.C. y O.C. Penalba, 2017. Soil response to long-term projections of extreme temperature and precipitation in the southern La Plata Basin. *Theoretical and Applied Climatology* 134: 1257–1268
- Penalba, O.C.; J.A. Rivera, 2016. Regional aspects of future precipitation and meteorological drought characteristics over Southern South America projected by a CMIP5 multi-model ensemble. *International Journal of Climatology* 36: 974 - 986
- Pessacg, N.; S. y Solman, 2012. Effects of land-use changes on climate in southern South America. *Climate Research* 55: 33–51
- Raddatz T.J.; C.H. Reick, W. Knorr, J. Kattge, E. Roeckner, R. Schnur, K.-G. Schnitzler, P. Wetzela y J. Jungclaus, 2007. Will the tropical land biosphere dominate the climate-carbon cycle feedback during the twenty first century? *Climate Dynamics* 29: 565-574.
- Roeckner, E.; G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornblueh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida, A. Tompkins. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Max Planck Institut für Meteorologie. Report No. 349
- Ruscica, R.C.; C.G. Menendez, A.A. Sörensson, 2015. Land surface–atmosphere interaction in future South American climate using a multi model ensemble. *Atmospheric Science Letters* 17(2): 141-147.
- Schneider, U.; A. Becker, P. Finger, A. Meyer-Christoffer, B. Rudolf, M. Ziese, 2011. GPCP Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. GPCP, Offenbach, Germany, DOI: 10.5676/DWD_GPCP/FD_M_V6_050
- Seneviratne, S.I.; M. Wilhelm, T. Stanelle, B. van den Hurk, S. Hagemann, A. Berg, F. Cheruy, M.E. Higgins, A. Meier, V. Brovkin, M. Claussen, A. Ducharne, J.L. Dufresne, K.L. Findell, J. Ghattas, D.M. Lawrence, S. Malyshev, M. Rummukainen, B. Smith, 2013. Impact of soil moisture climate feedbacks on CMIP5 projections: First results from the GLACE CMIP5 experiment. *Geophysical Research Letters* 40 (19): 5212-5217.
- Sörensson A. y C. Menendez. 2011. Summer soil–precipitation coupling in South America. *Tellus* 63A: 56–68

- Spennemann P.; 2015. Estudio sobre la variabilidad temporal y espacial de la humedad del suelo sobre Sudamérica, y su rol en modular la evapotranspiración y la precipitación en distintas escalas temporales. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Takata K.; S. Emori, y T. Watanabe; 2003. Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and planetary Change*, 38(1): 209-222.
- Taylor, K.E.; R.J. Stouffer, G.A. Meehl, 2012. An Overview of CMIP5 and the experiment design." *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 93: 485-498.
- Watanabe M.; T. Suzuki, R. O'ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe y M. Kimoto; 2010. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate* 23(23): 6312-6335.
- Wilks, D.; 2006. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Second Edition. Academic Press, 627 pp.
- Williams, C.J.R.; R.P. Allan, D.R. Kniveton, 2012. Diagnosing atmosphere–land feedbacks in CMIP5 climate models. *Environmental Research Letters*, 7(4), 044003.
- Zaninelli, P.G.; C.G. Menéndez, M. Falco, N. López-Franca, A.F. Carril, 2018. Future hydroclimatological changes in South America based on an ensemble of regional climate models. *Climate Dynamics*, 1-12.

Evapotranspiración de Hargreaves en Argentina con datos grillados en alta resolución: valores medios y tendencias

Serio, L.; M. Antelo y S. M. F. Zalazar

RESUMEN

El aumento de la demanda mundial de alimentos requiere de una mejora continua de la eficiencia de uso de los recursos, en particular del agua. Gran parte del territorio argentino ha experimentado aumentos de temperatura durante las últimas décadas, que a su vez pueden haber afectado la cantidad de vapor que potencialmente se puede transferir hacia la atmósfera por evapotranspiración. En este trabajo se intenta cuantificar ese impacto. Para ello se utilizaron datos grillados en alta resolución espacial (0,5° de latitud y longitud) de temperaturas máximas, mínimas y medias, con cobertura en todo el territorio continental argentino, del período 1960-2010. Se observaron aumentos de la evapotranspiración potencial total anual en zonas áridas del NOA y Patagonia y disminución en el centro del país. Los cambios más significativos ocurrieron durante el verano, coincidiendo con la época de mayor demanda evaporativa. En particular, en la zona central del país se observó una tendencia en disminución del 4% respecto a la media anual y del 10% en la época estival. Se presume que esto podría ser un agravante para la situación frecuente de excesos hídricos en la región, acompañando al aumento documentado que experimentaron las precipitaciones.

Palabras clave: temperatura, cambio climático, ciclo hidrológico

Serio, L.; M. Antelo and S. M. F. Zalazar, 2019. Hargreaves evapotranspiration in Argentina with high-resolution gridded data. RADA X: 15-23

SUMMARY

The increase in world demand for food requires a continuous improvement in the efficiency of the use of resources, particularly of water. Much of the Argentine territory has experienced increase in temperatures during the last decades, which may have affected the amount of vapor that can potentially be transferred to the atmosphere by evapotranspiration. In this work, we try to quantify this impact. For this purpose, high-resolution spatial data (0.5 ° latitude and longitude) of maximum, minimum and average temperatures were used, with coverage throughout the Argentine mainland, from 1960-2010. Increases

in annual total potential evapotranspiration were observed in arid parts of the Northwest and Patagonia and decrease in the center of the country. The most significant changes occurred during the summer, coinciding with the period of greatest evaporative demand. In particular, in the central areas of the country, a downward trend of 4% was observed with respect to the annual average and 10% in the summer period. It is presumed that this could be an aggravating circumstance for the frequent situation of water excesses in the region, accompanying the documented increase in precipitation.

Key words: temperature, climate change, hydrological cycle

L. Serio y M. Antelo: Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. Av. San Martín 4453, C1417DSE CABA, Argentina. S. M. F. Zalazar: Universidad de Morón, Facultad de Agronomía y Ciencias Agroalimentarias, Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas. Cabildo 134, B1708JPD Morón, Buenos Aires, Argentina. Correspondencia a: serio@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

El término evapotranspiración (ET) se utiliza para unificar los procesos del ciclo hidrológico mediante los cuales el agua se incorpora a la atmósfera desde la superficie terrestre: la evaporación y la transpiración. Su cuantificación resulta de gran importancia en la planificación de múltiples actividades, como la hidrología, la generación de energía y la producción agropecuaria, entre otras.

En particular, se ha estimado que la agricultura bajo riego contribuirá a satisfacer el 70% del aumento de la demanda mundial de alimentos en el primer cuarto del siglo XXI (Hargreaves y Allen, 2003). El manejo del agua y los rendimientos de los cultivos pueden ser optimizados a partir de la cuantificación precisa de la ET. Dada la dificultad de su medición, la optimización del uso del agua en la agricultura se puede alcanzar mediante el desarrollo y la aplicación de métodos de estimación o modelado de la ET cada vez más confiables.

El modelado de la ET requiere ciertas definiciones conceptuales bajo las cuales el resultado obtenido mediante el modelo es válido. En particular, el concepto de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), definido originalmente por Doorenbos y Pruitt (1977) en un estudio patrocinado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), es una de las tantas medidas de la potencial demanda atmosférica en ausencia de controles o limitaciones impuestas desde la superficie. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético con características específicas: una

gramínea verde, en activo crecimiento, de entre 8 y 15 cm de altura (Allen *et al.*, 2006). En él las condiciones edáficas y de cobertura vegetal son similares a la condición de potencialidad (máxima cobertura y buena provisión de agua), definida previamente por Thornthwaite (1948). Esto implica una dependencia de ET_0 exclusivamente en función de la demanda atmosférica, que permite utilizarla como referencia para estimar las necesidades hídricas de otras especies vegetales y así optimizar la producción agrícola, hortícola o forestal.

Existe una amplia variedad de metodologías para la estimación de ET_0 , aunque la recomendación final de la FAO (Allen *et al.*, 2006) recae sobre una variante propia del método micrometeorológico de Penman-Monteith (Monteith, 1965), ajustado para las características aerodinámicas del cultivo de referencia. Sin embargo, este método presenta la desventaja de requerir ciertos datos meteorológicos, como velocidad del viento y humedad relativa, cuya disponibilidad está generalmente limitada. Como alternativa, la FAO ha recomendado aplicar para el cálculo de ET_0 el método de Hargreaves modificado por Samani (Hargreaves y Samani, 1985), dependiente exclusivamente de la temperatura, para ser aplicado cuando no se dispone de datos de humedad atmosférica y/o intensidad del viento (Hargreaves y Allen, 2003; Allen *et al.*, 2006).

Por otra parte, la comunidad científica internacional ha reconocido la existencia de un calentamiento del sistema climático global, definido por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático como "inequívoco" (IPCC, 2013). El aumento observado de la temperatura media

global se ha estimado recientemente en 1,0 °C, con rango de incertidumbre entre 0,8 y 1,2 °C (IPCC, 2018). Se supone que esto debería traer aparejado un aumento de la capacidad de retención de vapor de agua en la atmósfera. En este sentido, Bormann (2011) indicó que se puede derivar un aumento en la presión de vapor de saturación de 6-7% por cada grado centígrado de aumento de la temperatura. Como consecuencia de ello, se puede asumir que ha existido un aumento simultáneo, aun no del todo cuantificado, de la ET_0 .

El Gobierno de la República Argentina, como parte del proceso de comunicación ante la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, ha coordinado la realización de estudios de diagnóstico tendientes a comprender los efectos regionales del cambio climático, como así también un análisis de posibles impactos futuros (SAyDS, 2014). Dichos estudios, si bien han permitido ampliar el conocimiento del clima actual y sus proyecciones de cambio en la Argentina, sólo estuvieron enfocados a dos variables (precipitación y temperatura) y algunos índices derivados de estas. En particular, a partir de estos estudios se han confirmado algunas fluctuaciones previamente observadas de la temperatura (Rusticucci y Barrucand, 2004; Zalazar y Serio, 2012), que bien pueden haber afectado en forma directa o indirecta a la ET_0 . Entre las conclusiones se destaca el aumento de la temperatura media de hasta 1 °C en la Patagonia y de alrededor de 0,5 °C en el resto del país, aumento casi generalizado de las temperaturas mínimas y poco cambio en las máximas, excepto en Patagonia donde también aumentaron.

El objetivo de este trabajo es cuantificar el impacto de los cambios que ocurrieron durante las últimas décadas en el régimen térmico, tanto en la temperatura media como en la máxima y la mínima, sobre el potencial de evapotranspiración en la Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos utilizados para este trabajo fueron extraídos de la Base de Datos Climáticos de la 3ra Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CIMA, 2014). Entre los datos disponibles se optó por los producidos por el modelo CRU_TS3.21, desarrollado originalmente por la Climatic Research Unit (CRU) de la University of East Anglia, Reino Unido. Tal decisión estuvo basada en que se trata de datos grillados de alta resolución (0,5° de latitud x 0,5° de longitud), en

el dominio espacial comprendido entre los 20° y 60° de latitud sur y los 50° y 80° de longitud oeste, o sea que tiene cobertura en todo el territorio continental argentino (Figura 1), incluyendo las islas Malvinas, aunque estas no fueron incluidas en el análisis posterior. Las variables utilizadas fueron temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales del período 1960-2010. Tanto el origen de los datos como las técnicas empleadas por la CRU para la confección de la base de datos fueron explicados por Harris *et al.* (2014).



Figura 1. Cobertura espacial de la Base de Datos. Fuente: CIMA (2014).

La ET_0 fue estimada con el método de Hargreaves-Samani (Hargreaves y Samani, 1985), dependiente de la temperatura y la radiación global, según la siguiente expresión:

$$ET_0 = 0,0135 * RG * (T + 17,78) \quad (1)$$

donde T es la temperatura media mensual (°C) y RG la radiación global (convertida a unidades de mm.d⁻¹ teniendo en cuenta el calor latente de vaporización). RG es estimada en función de la radiación astronómica (dependiente de la latitud y la época del año) y de la amplitud térmica, siguiendo el método recomendado por Hargreaves y Samani (1985) para suplir la falta de datos observados de RG:

$$RG = 0,17 * (Tmax - Tmin)^{0,5} * RA \quad (2)$$

donde T_{max} y T_{min} son las temperaturas máxima y mínima medias mensuales, respectivamente, y RA la radiación astronómica media mensual, también convertida a unidades de $mm \cdot d^{-1}$, calculada en función de la latitud y la época del año según la metodología explicada por Fernández Long *et al.* (2015). Cabe aclarar que los coeficientes en las ecuaciones 1 y 2 fueron obtenidos empíricamente por los autores citados. La aplicación de éstos a todo el territorio argentino puede traer aparejados errores por la heterogeneidad espacial de los factores geográficos que afectan a la temperatura y su amplitud.

Se calcularon las series de valores mensuales de ET_0 en cada punto de grilla y para todo el período considerado. A partir de ellos se obtuvieron los valores medios mensuales, estacionales y anuales y luego se calcularon las tendencias mediante un análisis de regresión lineal. Las tendencias obtenidas se expresaron en valor absoluto ($mm/año$) y en valor porcentual respecto a la media de todo el período. Se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Salmi *et al.*, 2002) para analizar la significancia estadística ($\alpha = 0,05$) de la tendencia en cada punto de grilla, tanto para los valores de ET_0 mensuales, como para los estacionales y los anuales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por cuestiones de espacio, la discusión de resultados sólo se concentra en las ET_0 estacionales y las anuales. En las figuras 2 y 3 se pueden observar los resultados obtenidos para la ET_0 media anual y las estacionales, respectivamente, considerando el período completo (1960-2010). La distribución espacial y la magnitud de los valores anuales (figura 2) coincide en gran medida con los obtenidos previamente por Serio *et al.* (2006) usando datos de la red de observaciones del Servicio Meteorológico Nacional. A diferencia de aquel trabajo, los métodos de interpolación y extrapolación aplicados por la CRU para generar los datos de temperatura en la zona cordillerana permiten realizar una estimación razonable de la variación de la ET_0 en esa región.

En las figuras 4 y 5 están representados los valores de tendencia calculados para las series temporales de ET_0 en cada uno de los puntos de grilla, expresados como porcentaje respecto a la media de todo el período. Los tonos de azul indican tendencias negativas y los de naranja positivas. Las áreas rayadas con contorno gris señalan las regiones donde las tendencias resultaron estadísticamente significativas luego de aplicar la

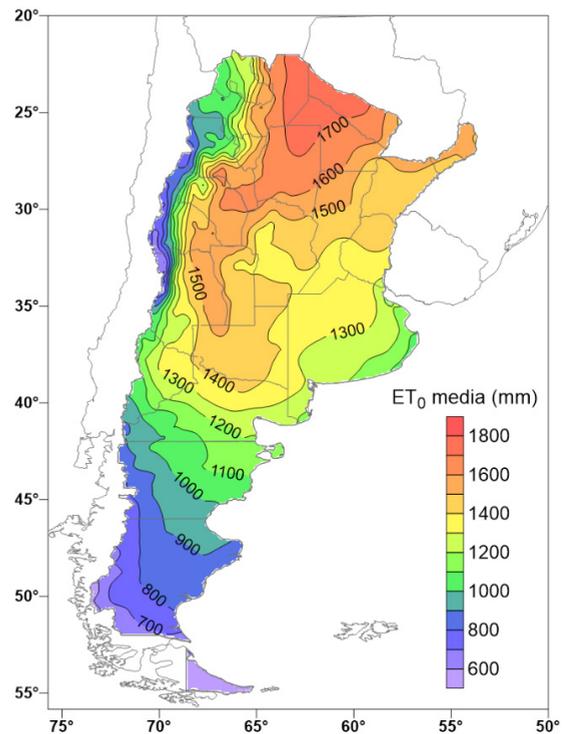


Figura 2. Evapotranspiración de referencia (ET_0) anual media 1960-2010.

prueba de Mann-Kendall.

La figura 4 corresponde a la ET_0 total anual, allí se detectaron dos zonas donde las tendencias fueron positivas: una localizada en la Puna jujeña y la otra abarca la mayor parte de la región patagónica (Neuquén, oeste y sur de Río Negro, este de Chubut y este de Santa Cruz). En ambas zonas los valores máximos de tendencia superan el 5%. Estas zonas coinciden con aquellas donde se han producido los aumentos más significativos de las temperaturas máximas, según los mapas publicados en la Tercera Comunicación de la Argentina a la Convención de Cambio Climático (SAyDS, 2014). En el caso de la Patagonia, también aumentaron las temperaturas mínimas y media, por lo que el incremento observado de la ET_0 puede ser asociado al aumento de la temperatura media. En cambio, en la Puna el aumento de la temperatura media fue menor y la mínima presentó una leve disminución, permitiendo inferir que el aumento de la ET_0 se debió a una mayor amplitud térmica, posiblemente asociada a una menor nubosidad.

Por otro lado, en la figura 4 se observan tendencias negativas de la ET_0 en la zona central del país (Córdoba, Entre Ríos, centro de Santa Fe,

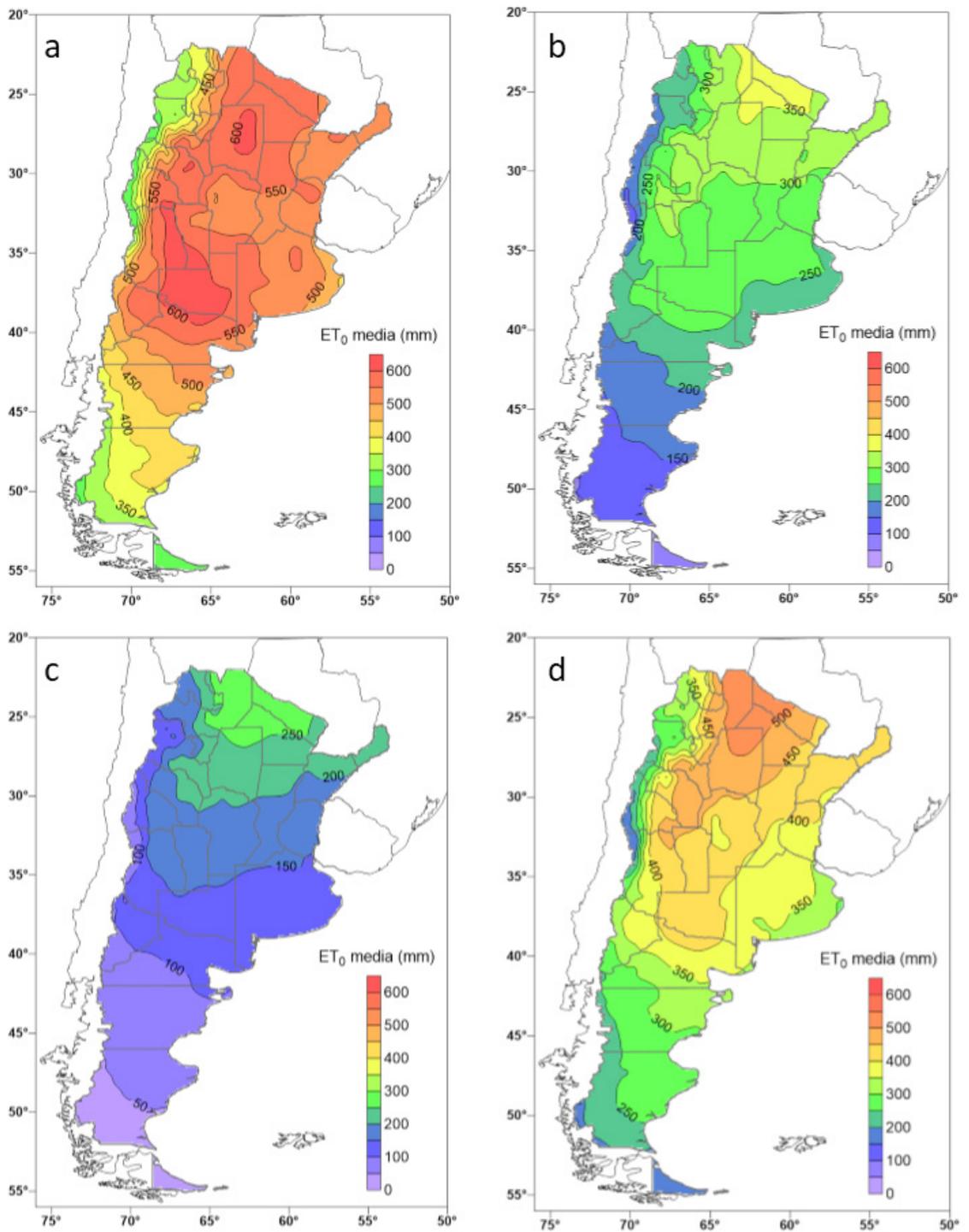


Figura 3. Evapotranspiración de referencia (ET_0) estacional media 1960-2010: a) verano, b) otoño, c) invierno, d) primavera.

noroeste de Buenos Aires, noreste de La Pampa y este de San Luis) con valores que llegan a estar entre -5 y -7%. En el informe de la SAyDS (2014) se observó que en estas zonas del país la temperatura mínima aumentó, pero hubo poco cambio, incluso una leve disminución, en la máxima. Por lo tanto, puede asumirse que la disminución de la ET_0 se debió a una menor amplitud térmica.

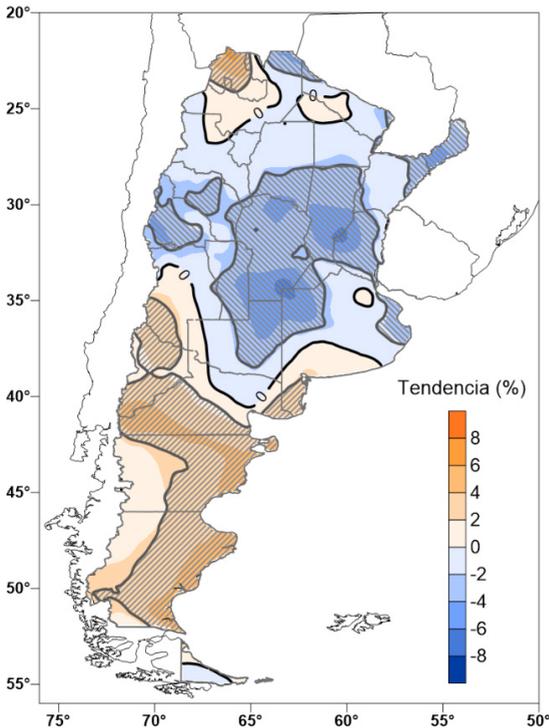


Figura 4. Tendencia porcentual de la evapotranspiración de referencia (ET_0) anual. Las áreas rayadas con contorno gris indican regiones con tendencia significativa.

En la figura 5 están representadas las tendencias estacionales de la ET_0 . Se observa que los cambios más significativos ocurrieron durante el verano, coincidiendo con la época del año de mayor demanda evaporativa. El patrón geográfico de distribución de las áreas con tendencias significativas en verano (figura 5.a) es similar al de la ET_0 anual, pero con una tendencia negativa mucho más intensa en la región del sur de Córdoba, sur de Santa Fe y noroeste de Buenos Aires que arrojó valores entre -7% y -10%. En esta zona del país, frecuentemente afectada por inundaciones, la reducción observada de la ET_0 coincide con el aumento significativo de la precipitación reportado, entre muchos otros, por Barros *et al.* (2015). En cuanto a la región patagónica, las mayores tendencias positivas se encontraron al oeste de Río Negro y sur de Neuquén, donde los valores fueron entre el 5% y 7%, con alto nivel de significancia.

En otoño (figura 5.b) se observa un patrón espacial similar al del verano, pero con menor magnitud y una reducción de tamaño de las áreas donde las tendencias observadas resultaron estadísticamente significativas. Lo más destacable del invierno (figura 5.c) es que se mantienen las tendencias positivas de la ET_0 en casi toda la Patagonia, en concordancia con el aumento de la temperatura media invernal en la región (Rusticucci y Barrucand, 2004). En la provincia de Buenos Aires ya no se observan tendencias negativas, estas quedan limitadas sólo a una franja central que comprende el sur de Córdoba y San Luis, este de La Pampa y este de Río Negro. En primavera (figura 5.d), prácticamente no se registraron cambios significativos en la ET_0 en todo el país.

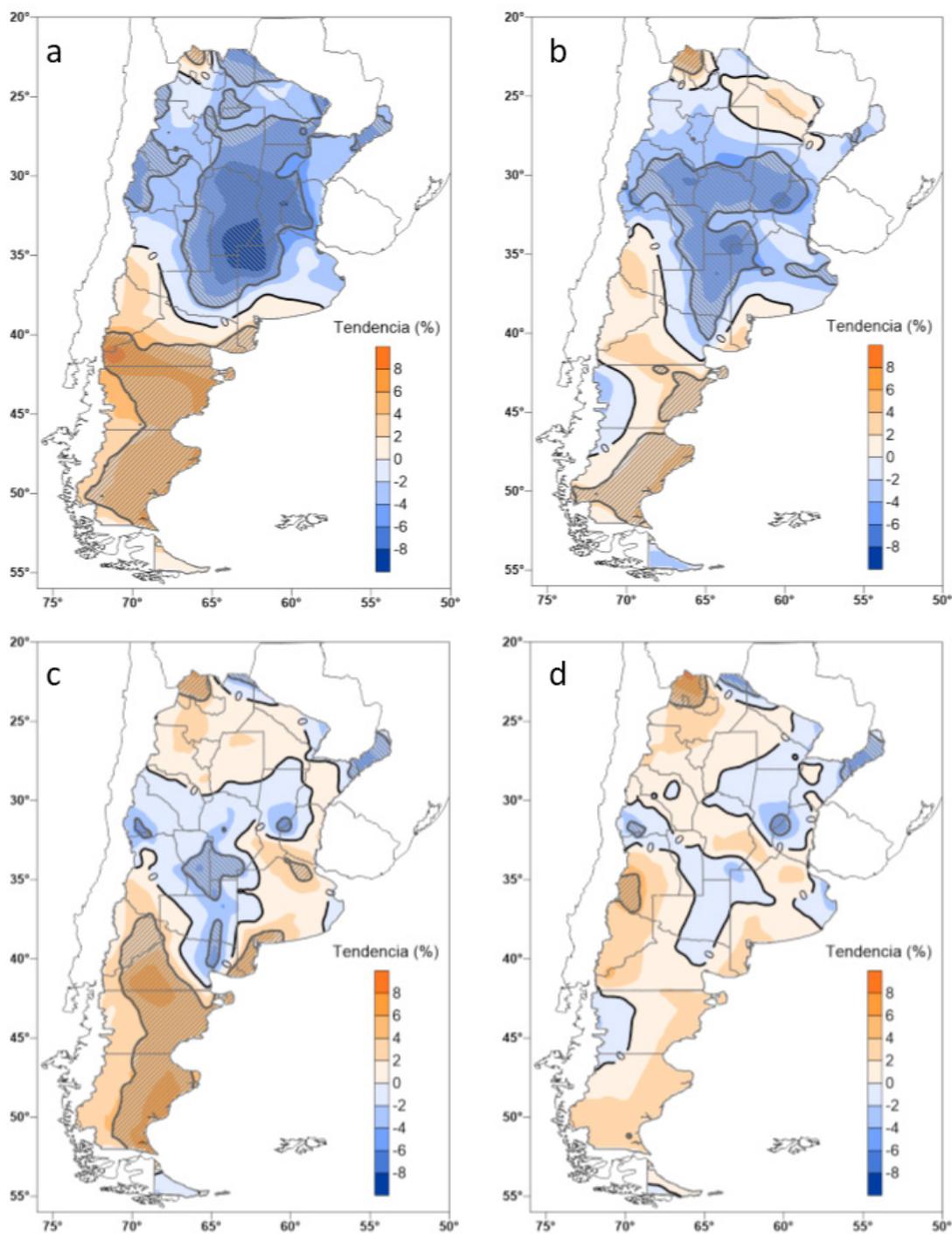


Figura 5. Idem figura 4, pero para las ET_0 estacionales: a) verano, b) otoño, c) invierno, d) primavera.

CONCLUSIONES

El uso de la base de datos grillados de temperaturas en alta resolución permitió calcular la ET_0 aún en las zonas del país donde no se cuenta con registros continuos de meteorológicos o climáticos.

A partir del análisis realizado, se concluye que el territorio argentino ha experimentado durante las últimas 5 décadas tendencias significativas de la ET_0 , tanto anual como estacional.

En particular, se observó una tendencia en aumento de la ET_0 anual en el extremo noroeste del país (localizado en la Puna de la provincia de Jujuy) y otra zona de gran extensión en la región patagónica. En la zona central del país se observó una tendencia en disminución de aproximadamente el 5% respecto a la media del período 1960-2010.

La mayor parte de los cambios a escala anual se explican por los cambios ocurridos en la época estival. La tendencia en la zona central indica una disminución de un 10% en la demanda evaporativa. Se presume que esto podría ser un agravante para la situación de excesos hídricos que afecta frecuentemente a la región.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Buenos Aires, por la financiación a través de los proyectos PDS UBA PG05 y UBACyT 20620170100012BA.

Al CIMA/CONICET-UBA, por la provisión de los datos climáticos de la 3ra. Comunicación Nacional sobre Cambio Climático.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith, 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56. United Nations Food and Agriculture Organization, Roma. 298 p.

Barros, V.R.; J.A. Boninsegna, I.A. Camilloni, M. Chidiak, G.O. Magrín y M. Rusticucci, 2015. Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation. WIREs Climate Change 6: 151-169.

Bormann, H, 2011. Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations. Climatic Change 104: 729-753.

CIMA, 2014. Base de Datos Climáticos de la 3ra. Comunicación Nacional de la República Argentina a

la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. <http://3cn.cima.fcen.uba.ar/>. Consultado el 8/3/2016.

Doorenbos, J. y W. Pruitt, 1977. Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 24. United Nations Food and Agriculture Organization, Roma. 144 p.

Fernández Long, M.E.; R. Hurtado y L. Spescha, 2015. Planilla de cálculo de variables astronómicas (VARAST 1.0). Agronomía y Ambiente 35(2): 171-177.

Hargreaves, G.H. y R. G. Allen, 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 129: 53-63.

Hargreaves, G.H. y Z.A. Samani, 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Transaction of ASAE 1(2):96-99.

Harris, I., P.D. Jones, T.J. Osborn y D.H. Lister, 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. International Journal of Climatology 34: 623-642.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, UK. 1535 pp.

IPCC, 2018. Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

Monteith, J.L., 1965: Evaporation and environment. Symp. Soc. Exp. Biol. XIX, Cambridge Univ. Press: 205-234.

Rusticucci, M., y M. Barrucand, 2004. Changes in temperature extremes over Argentina. Journal of Climate 17: 4099-4107.

SaYDS, 2014. Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. "Cambio Climático en Argentina: Tendencias y Proyecciones" (Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera). Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, Buenos Aires, Argentina, 342 p.

Salmi, T.; A. Määttä, P. Anttila, T. Ruoho-Airola y T. Amnell, 2002. Detecting trends of annual values of

- atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates – the Excel template application MAKESENS. Publications on Air Quality No. 31, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, 35 p.
- Serio, L.; H. Vich, R. Hurtado, A. Carreira y G. Murphy; 2006. Evapotranspiración potencial media anual en Argentina en el período 1971-2000. Actas XI Reunión Argentina de Agrometeorología. La Plata, Buenos Aires, Argentina, pp 76-77.
- Thorntwaite, C.W., 1948. An approach to a rational classification of climate. *Geographical Review* 38: 55-94.
- Zalazar, S.M.F. y L. Serio, 2012. Análisis de las tendencias mensuales de las temperaturas máximas y mínimas en el este de la Argentina (1950-2011). *Revista de la Facultad de Agronomía y Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Morón* 3(6): 71-80.

Evolución del área foliar en canopeos de maíz creciendo sobre cultivo de cobertura y sobre barbecho limpio bajo condiciones contrastantes de agua en el suelo

Irigoyen, A.I.; M. A. Cambareri; L. Echarte y R. E. Rivas

RESUMEN

El desarrollo del canopeo influencia la interceptación de radiación, asimilación y partición de los productos fotosintéticos y así, el rendimiento del cultivo. Los objetivos del presente trabajo fueron a) describir la evolución del área foliar en canopeos de maíz creciendo bajo diferente disponibilidad de agua con y sin cobertura de la superficie con residuos vegetales y b) caracterizar los atributos morfológicos de las hojas mediante el tamaño máximo alcanzado. Un experimento a campo fue conducido en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Balcarce, Argentina) durante la campaña agrícola 2016-2017. Se sembró un híbrido de ciclo intermedio (DK692 VT3P RR) el 15 de noviembre a la densidad media de 8 plantas m². Los tratamientos incluyeron la combinación de (i) dos niveles de disponibilidad de agua (con riego, R y secano, S) y (ii) dos tipos de cobertura (sin cobertura, conv, y suelo con un cultivo de cobertura previo de vicia (*Vicia villosa* Roth.) y avena (*Avena sativa* L.), CC). El área foliar por planta fue menor en los canopeos con cultivo de cobertura (CC) previo al maíz bajo condiciones limitantes de agua. Sin limitantes de agua, los atributos morfológicos de las hojas de maíz creciendo en secuencia a un cultivo de cobertura (CC) no se modificaron significativamente con respecto a los canopeos que se desarrollaron después de un barbecho limpio (conv). En secano, las diferencias de tamaño más significativas se detectaron en las hojas de mayor dimensión, en las cuales se modificó tanto el ancho como la longitud. Se observó un retraso y una reducción de la duración del período con tasas máximas de expansión foliar en la estación de crecimiento del tratamiento SCC.

Palabras clave: área foliar relativo; tiempo térmico; expansión foliar

Irigoyen, A.I.; M. A. Cambareri; L. Echarte and R. E. Rivas 2019. Evolution of leaf area in maize canopies growing on cover crop and clean fallow under contrasting soil water availability. RADA X: 25-34

SUMMARY

Canopy development influences the radiation interception, assimilation and partitioning of photosynthetic products and final crop yield. The objectives of the present work were: a) to describe the evolution of leaf area in maize canopy growing under contrasting soil water availability and soil surface cover with plant; and b) to characterize the morphologic attributes of individual leaves by the maximum attained size. One field experiment was conducted in southern of Buenos Aires province (Balcarce, Argentina) during the 2016-2017 growing season. An intermediate maize hybrid (DK692 VT3P RR) was sown on 15 November with a plant density of 8 plants m⁻². Treatments included the combination of (i) two water regimes (irrigated, R and rainfed, S) and (ii) two soil covers (without soil cover, conv, and soil with a previous cover crop of vicia (*Vicia villosa* Roth.) and oat (*Avena sativa* L.), CC). The leaf area per plant was reduced in canopies with cover crop (CC) prior to maize under water-limiting conditions. Without water limitations, the morphological attributes of maize leaves growing in sequence to a cover crop (CC) were not significantly modified with respect to canopy that did develop after a clean fallow (conv). In rainfed conditions, the most significant size differences were detected in the larger leaves, in which both the width and length were modified. A delay and a reduction of the duration of period of maximum rates in the leaf expansion was observed at the growing season for SCC treatment.

Key words: relative leaf area; thermal time; leaf expansion

A.I. Irigoyen ; M. A. Cambareri; L. Echarte y R. E. Rivas. Unidad Integrada Balcarce: Fac. de Ciencias Agrarias UNMdP -INTA Balcarce. Ruta Nac. 226, km 73,5, Balcarce CC 276 (7620), Argentina. Correspondencia a: irigoyen.andrea@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El desarrollo del canopeo influye en la interceptación de radiación, asimilación y la partición de los productos fotosintéticos que determinan el rendimiento final del cultivo. En maíz, el hábito de crecimiento del híbrido es uno de los factores que afecta la generación de área foliar verde (Birch *et al.*, 2003; Maune, 2014). A su vez, la estructura del canopeo también puede modificarse por prácticas de manejo como la fecha de siembra, la densidad de plantas y la disponibilidad de nutrientes y agua (Maddoni *et al.*, 2001; Birch *et al.*, 2003; Valentinuz y Tollenaar, 2006; Birch *et al.*, 2008; Maune, 2014; Díaz, 2015; Corral, 2016).

En el sudeste bonaerense se ha descrito la variación de los atributos físicos y funcionales del canopeo asociados a prácticas de manejo del cultivo (Maune, 2014; Díaz, 2015; Irigoyen *et al.*, 2015; Corral, 2016). En los últimos años, se ha iniciado la evaluación biofísica para el manejo de maíz implantado después de un cultivo de cobertura (Irigoyen *et al.*, 2016), práctica que se promueve actualmente en la región para un uso más eficiente de los recursos del ambiente. Los CC son establecidos entre dos cultivos de verano

y no son pastoreados, cosechados ni incorporados (Álvarez y Scianca, 2006).

Es de interés evaluar si el uso del CC provoca variaciones en la generación y mantenimiento del área foliar verde, por las implicancias directas sobre el uso de agua y la producción de biomasa y rendimiento. Las deficiencias de agua durante el desarrollo vegetativo del cultivo de maíz reducen la tasa de expansión y división celular, provocando una disminución en el área foliar verde y en la altura de las plantas (NeSmith y Ritchie, 1992; Andrade *et al.*, 1996; Tardieu *et al.*, 2000). El número total de hojas (NTH) en condiciones no limitantes queda determinado por el tiempo térmico desde emergencia a la aparición de la inflorescencia masculina (Capristo *et al.*, 2007). Por otra parte, el NTH se ha mostrado sensible a las condiciones ambientales como la temperatura y el fotoperíodo (Andrade *et al.*, 1996; Maune, 2014), pero no a las condiciones nutricionales (Lemcoff y Loomis, 1986; Muchow y Davis, 1988; Colomb *et al.*, 2000).

La tasa y la duración de la expansión foliar definen el crecimiento de la planta ya que el área foliar controla la interceptación de la radiación usada en fotosíntesis y así la producción de materia seca (Andrade *et al.*, 1996). La tasa de expansión foliar puede considerarse constante por unidad de

tiempo térmico bajo condiciones ambientales no limitantes (Lizaso *et al.*, 2003; Sadok *et al.*, 2007). A su vez, existe una máxima tasa de expansión para cada una de las hojas que depende de la posición de la hoja en la planta (Andrieu *et al.*, 2006). Por su parte, el tamaño máximo individual de cada hoja en este cultivo puede ser descrito a partir de una función en forma de campana con relación al número de hoja (Dwyer y Stewart, 1986), aunque también ha sido demostrado que las prácticas de manejo pueden modificar la forma de esa curva (Valentinuz y Tollenaar, 2006; Karadavut *et al.*, 2010; Maune, 2014; Díaz, 2015, Corral, 2016). La evolución de la senescencia puede ser simulada con una función exponencial al tiempo térmico acumulado desde la siembra (Wilson *et al.*, 1995).

Debido a que la información detallada sobre la expansión y la senescencia de hojas individuales ha permitido mejorar la precisión de modelos de área foliar (Stewart and Dwyer, 1994; Birch *et al.*, 1998; Lizaso *et al.* 2003) y que la descripción de los atributos morfológicos del canopeo en determinados momentos fenológicos puede contribuir a la predicción del rendimiento (España *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2014), es de interés también caracterizar aspectos morfológicos del canopeo a escala de hoja individual.

Si bien, se han descrito algunos indicadores del desarrollo foliar para canopeos de maíz luego de un cultivo de cobertura (CC) en el sudeste bonaerense (Irigoyen *et al.*, 2016; Irigoyen *et al.*, 2018) aún no se han analizado en detalle los mecanismos de desarrollo y senescencia foliar que determinan un menor área foliar por planta en el canopeo CC respecto al canopeo de manejo convencional de barbecho limpio (conv) cuando se maneja en seco (S) y, que a su vez, no diferencian el área foliar entre los tratamientos de cobertura (conv y CC) bajo un manejo sin limitantes de agua (R).

Los objetivos del presente trabajo fueron a) describir la evolución del área foliar en canopeos de maíz creciendo bajo diferente disponibilidad de agua con y sin cobertura de la superficie con residuos vegetales y b) caracterizar los atributos morfológicos de las hojas mediante el tamaño máximo alcanzado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante la campaña agrícola 2016-2017 fue conducido un experimento en Balcarce, Argentina (37°45' S, 58°18' O; 130m snm) sobre un suelo Argiudol típico con una profundidad efectiva de 1,7 m. Se evaluaron condiciones de disponibilidad

de agua (secano S y riego R) en dos manejos: (i) barbecho limpio con siembra convencional (conv) y (ii) con residuos vegetales en superficie por cultivo de cobertura previo (CC).

El CC estuvo compuesto por vicia (*Vicia villosa* Roth.) y avena (*Avena sativa* L.). El maíz (DK692 VT3, MR118) se sembró el 15/11 a una densidad de 8 plantas m². La emergencia del cultivo fue registrada el 25/11 y el 27/11 para los manejos conv y CC, respectivamente. Los tratamientos estuvieron dispuestos en un arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones. Los tratamientos de riego fueron asignados a la parcela principal y los de cobertura a la subparcela. Cada subparcela comprendió seis hileras de 12 m de longitud.

El contenido de agua en el suelo se midió semanalmente, con una combinación del método gravimétrico (0-0,10 m) y del método de dispersión de neutrones (0,1 -1,7m). El contenido de agua en cada subparcela experimental fue determinado como la suma del contenido en cada una de las capas medidas. Se expresó la disponibilidad en relación con la capacidad de agua disponible del perfil que se obtuvo a partir de la profundidad (1,7 m) y los límites máximo y mínimo de almacenaje de agua (3,6 y 2 mm cm⁻¹, respectivamente). En los tratamientos R se utilizó riego por goteo, para asegurar un nivel de agua en el suelo por encima del 50% de agua disponible (AD).

Las determinaciones fenométricas y fenológicas fueron realizadas semanalmente sobre 15 plantas por tratamiento. El área foliar verde por planta (AFV) fue determinado para cada fecha de monitoreo mediante la integración del área de hojas individuales, que a su vez fue estimado mediante un modelo multiplicativo entre longitud (L), ancho máximo de la lámina (A) y un factor constante (0,75) atribuido a la forma de la hoja. En el momento de máximo desarrollo foliar se determinó número total de hojas (NTH), altura total de plantas (ATOT) e índice de área foliar (IAF máximo).

La evolución del área foliar durante la estación de crecimiento fue expresada como área foliar verde por planta (AFV) y como área foliar relativo (AFV/AFV máximo de cada tratamiento). Se calculó el tiempo térmico (TT) acumulado desde la siembra hasta cada una de las fechas de determinación, empleando el método residual con temperatura base de 8°C.

Se contabilizó por tratamiento el número de hojas por planta agrupadas según el estado de desarrollo: a) hojas en desarrollo o expansión (cuando aún no alcanzaron su tamaño máximo), b) hojas con tamaño final o área máxima (AFmax) y c) hojas senescentes (cuando ya comenzaron

a disminuir el área foliar activa). A partir de las determinaciones consecutivas se caracterizaron los atributos morfológicos de las láminas finales de cada hoja mediante los valores medios de: área máxima (AFmax), ancho máximo (Amax) y longitud máxima (Lmax). Las hojas fueron numeradas por orden de aparición nodal desde la base al tope del canopeo.

Se utilizaron las hojas nodales 8,10 y 12 para describir la evolución de la elongación promedio en función del tiempo térmico desde siembra hasta la expansión completa (estados fenológicos V8, V10 y V12, respectivamente).

Se realizó el análisis de varianza (ANOVA) empleando el procedimiento PROC MIXED del paquete SAS (SAS/IML® 14.1, 2015) para testear los efectos de la disponibilidad de agua y la cobertura de la superficie (C) y sus interacciones en el IAF máximo, el número total de hojas (NHT) y altura final (ATOT). Cuando las interacciones fueron significativas se aplicó test de contrastes para comparar los valores medios (con nivel de significancia 0,05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presenta la evolución del agua disponible en el perfil de suelo, la distribución de las precipitaciones y el riego aplicado durante la estación de crecimiento. Los manejos en secano (SCC y Sconv) tienen un período de restricción

hídrica durante el desarrollo vegetativo, mientras que los manejos con aplicación adicional de agua (RCC y Rconv) no presentan condicionantes para el desarrollo y crecimiento debidos a la falta de agua. La evolución del contenido de agua en el suelo para cada tratamiento y su relación con el uso de agua y rendimiento fue descrita en Cambareri *et al.* (2018 a y b).

En la Tabla 1 se presentan los atributos alcanzados por canopeo (IAF máximo) y por planta (NTH y ATOT) en el momento de la aparición de la inflorescencia masculina (VT). Hubo interacción significativa de los efectos de la disponibilidad de agua y de la cobertura para los atributos IAF máximo y NTH. Sin limitantes de agua, el IAF máximo alcanzado en los canopeos de RCC no se diferenció significativamente del obtenido con Rconv. El canopeo limitado por agua (SCC) afectó sensiblemente el IAF máximo respecto al canopeo del manejo RCC. El NTH fue el atributo menos afectado por los tratamientos. En general, se pueden describir efectos importantes para este atributo cuando los tratamientos exponen al cultivo a diferentes temperaturas o fotoperíodos (Andrade *et al.*, 1996; Maune, 2014).

El período de generación de área foliar (hasta VT) se extendió hasta los 70 y 72 días desde siembra en los canopeos de barbecho limpio (Rconv y Sconv) y hasta los 77 y 84 días en los canopeos que siguieron al cultivo de cobertura (RCC y SCC, respectivamente). El retraso inicial observado por efecto de CC desde la siembra a la

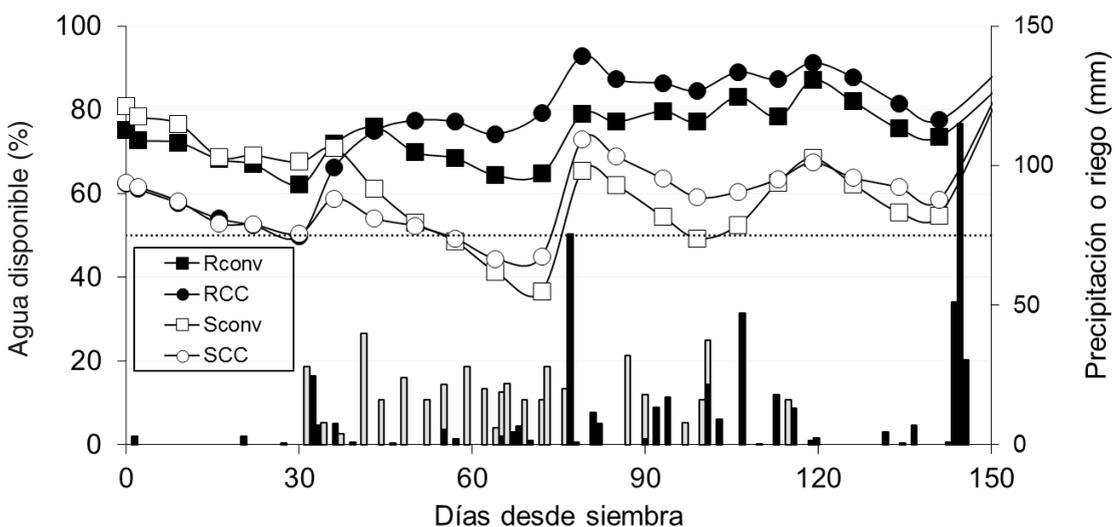


Figura 1. Agua disponible en el perfil total de suelo (1,7 m profundidad) para canopeos de maíz creciendo con y sin cultivo de cobertura previo (CC y conv) en secano (S) y bajo riego (R). Las barras verticales en negro indican precipitación diaria (mm) y las barras verticales sin relleno indican lámina de riego diaria (mm) en los tratamientos R. La línea punteada al 50% de agua disponible representa un nivel seguro para la mayoría de los cultivos.

emergencia del cultivo (2 días) se incrementó hasta VT, pero no fue suficiente ese desplazamiento para modificar las condiciones de exposición a temperatura y fotoperíodo capaces de generar cambios significativos en el NTH, como que los que observan al modificar la fecha de siembra a intervalos de un mes o más (Andrade *et al.*, 1996; Maune, 2014). No hubo interacción significativa para el ATOT, observándose menor altura en las plantas del canopeo CC que en las del canopeo conv, independientemente de la disponibilidad de agua.

Tabla 1. Índice de área foliar máximo (IAF máximo), número total de hojas (NTH) y altura final (ATOT) en canopeos de maíz creciendo con y sin cultivo de cobertura previo (CC y conv) en seco (S) y bajo riego (R). Se indica el momento de IAF máximo para cada tratamiento en días desde siembra (DDS).

Tratamiento	IAF máximo (m ² /m ²)	NTH	ATOT(m)
RCC	4,2 A (77 DDS)	19,9 B	1,94 B
Rconv	4,7 A (70 DDS)	20,5 A	2,13 A
SCC	2,2 b (84 DDS)	20,5 a	1,11 b
Sconv	3,8 a (72 DDS)	20,6 a	1,53 a

Interacción disponibilidad de agua x cobertura:
IAF máximo interacción significativa ($p=0,0015$)
NTH interacción significativa ($p=0,0001$)
ATOT interacción no significativa ($p=0,0675$)

En la Figura 2 puede observarse la evolución del área foliar verde de acuerdo con los tratamientos de manejo de residuos en superficie (CC y conv) y de disponibilidad de agua en el suelo (R y S). El área foliar verde por planta (Figura 2a) en CC se diferenció desde el inicio del monitoreo, con un retraso en la expansión foliar. A partir de los 400 °C día y durante el restante período de generación del área foliar (hasta la aparición de la inflorescencia masculina, VT), el manejo en seco y sobre cultivo de cobertura (SCC) exhibió una reducción significativa respecto a los demás tratamientos. Entre los 30 a 70 días desde siembra (300 a 900 °C día aproximadamente), la disponibilidad de agua en seco disminuyó continuamente, iniciando a los 50 días (520 °C día) un período de limitación (menor a 50% de agua disponible), como se puede observar en la Figura 1. Por otra parte, el manejo con cobertura y en condiciones no limitantes (RCC), con una aplicación de riego de 428 mm, aunque inicialmente mostró un retraso en el desarrollo foliar, exhibió mecanismos de generación y mantenimiento del área foliar verde que no diferenciaron el área foliar máxima del manejo convencional con barbecho limpio (Rconv).

La descripción del área foliar relativa al máximo en cada tratamiento (Figura 2 b) brinda información para la toma de decisiones del momento de monitoreo y puede ser útil para el

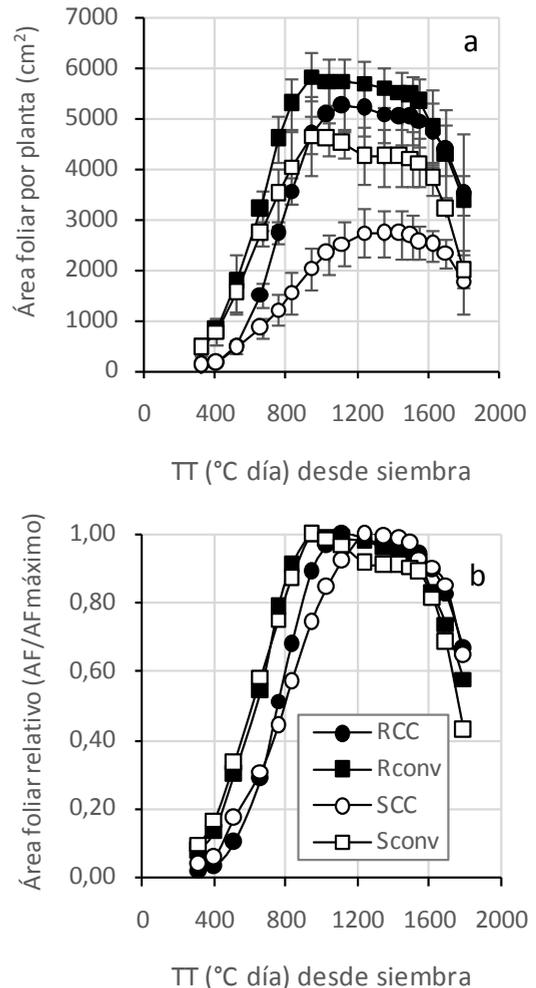


Figura 2. Evolución del área foliar verde por planta en canopeos de maíz creciendo con y sin cultivo de cobertura previo (CC y conv) en seco (S) y bajo riego (R). a. Área foliar verde por planta. b. Área foliar relativo. Se indica con la barra vertical el error estándar.

pronóstico anticipado de rendimiento (España *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2014). Aproximadamente a la mitad de la estación de crecimiento (937°C día) los manejos sin cobertura (Sconv y Rconv) alcanzaron su máximo valor y mostraron capacidad de mantener el área foliar superior al 0,9 del máximo alcanzado hasta los 1500°C día. Por su parte, el canopeo más limitado (SCC) alcanzó el máximo a los 1100 °C día (dos semanas posteriores a los manejos conv) y conservó valores mayores a 0,90 del máximo alcanzado también hasta los 1500 °C día. El manejo RCC alcanzó su valor máximo aproximadamente a los 1033 °C día y consiguió mantener por encima de 0,90 también hasta los 1500°C día. Tanto en el manejo RCC como Rconv, los canopeos se mantuvieron por encima del 90%

del máximo alcanzado por un período de 50 días, aunque desplazados en el tiempo.

Bajo condiciones ambientales semejantes a la campaña agrícola evaluada, si se monitorea a los 58 días desde siembra (752 °C día), el área foliar por planta estará próxima al 75% del máximo alcanzable en los manejos Sconv y al 80% en Rconv y apenas 51 y 44% en los manejos RCC y SCC, respectivamente. A su vez, si se monitorea el área foliar a la mitad de la estación de crecimiento (próximo a los 937 °C día), el área foliar tiene el máximo alcanzable en los canopeos de manejo convencional, mientras que representará alrededor del 89 y 74% del máximo esperable en canopeos con restricciones en el desarrollo (RCC y SCC, respectivamente). Estos resultados muestran que en condiciones limitantes de agua sería recomendable retrasar en el canopeo CC el momento de monitoreo para la determinación del área foliar máxima y otros atributos funcionales (*i.e* unidades de clorofila) importantes para la definición del rendimiento final.

El área foliar verde (AFV) por planta en un momento dado de la estación de crecimiento está determinado por el número de hojas por planta y el tamaño de cada hoja. La expansión foliar, que incluye tanto la elongación como el aumento en el ancho de la lámina, determina el tamaño final alcanzado por cada hoja (AFmax). Entre los 900 y 1400 °C día se observó el mayor número de hojas con el tamaño máximo (Figura 3a), antes y después de ese período son relevantes la expansión y la senescencia foliar. La expansión completa de un número importante de hojas en el canopeo SCC a partir de los 950°C día determinó un incremento significativo de área foliar por planta (Figura 2a).

El número de hojas por planta en expansión aumentó progresivamente hasta los 700-900 °C día (de acuerdo con el tratamiento) y luego decreció a 0, cuando estaban todas las hojas completamente expandidas (Figura 3b). Entre los 1600 °C día y la madurez fisiológica, el número de hojas senescentes por planta aumentó sustancialmente (Figura 3c) cualquiera sea el tratamiento. En el momento de máximo desarrollo del canopeo ya estaban senescentes entre 8 y 10 hojas, por lo que el crecimiento de los granos debió ser a expensas de la traslocación desde los tallos y la funcionalidad de las hojas del canopeo superior.

En la Figura 4 se muestra la distribución de los atributos morfológicos (AFmax, Lmax y Amax) de acuerdo con la posición nodal de las hojas en el canopeo. Aunque se observaron algunas diferencias en el área foliar máxima (AFmax) entre los tratamientos (Kruskal Wallis, significancia

de 0,05) en la porción central de canopeo, la distribución del tamaño máximo de las hojas siguiendo una curva en forma de campana se mantuvo en cada uno de los tratamientos, en concordancia con lo reportado en la literatura para varias prácticas de manejo del cultivo (Valentinuz y Tollenaar, 2006; Karadavut *et al.*, 2010; Maune, 2014; Díaz, 2015; Corral, 2016).

Se observaron cambios diferenciados asociados con los manejos CC y conv en la distribución de tamaños de hojas de acuerdo con la disponibilidad de agua. Bajo el manejo conv, el suministro adicional de agua desplazó el centro de simetría de la curva de distribución de área foliar máxima hacia las hojas que aparecieron posteriormente (hoja 12 a hoja 14-15), mientras que en el manejo CC no modificó el centro, pero si el tamaño final de hojas. Este efecto debe relacionarse con el momento y magnitud de las deficiencias de agua en la campaña agrícola (Figura 1).

Valores reducidos de AFmax (Figura 4a) en las hojas del canopeo SCC se deben a una disminución simultánea de la longitud (Figura 4b) y del ancho de las láminas (Figura 4c). Las diferencias en área foliar por planta entre tratamientos, en parte pueden explicarse por el tamaño máximo alcanzado por cada hoja individual (Figura 4a) y en parte, por el número de hojas que se expanden o senescen en un determinado momento (Figura 3) que afectan la tasa relativa de crecimiento del canopeo en general.

Sin limitación hídrica, la duración de la elongación aumentó a medida que aumentó la posición nodal de las hojas hacia el centro del canopeo en los dos manejos conv y CC (Figura 5). Se observó un retraso en el proceso de expansión foliar en la estación de crecimiento para el tratamiento SCC y a su vez, una reducción de la duración del período con tasas máximas (Figura 5 a, b y c). Algunos estados fenológicos (*i.e* V8 y V10) se registraron posteriormente en el manejo más restrictivo (SCC) y cuando algún estado se alcanzó en simultáneo con los demás tratamientos (*i.e* V12), la menor duración de la expansión debida al retraso en la iniciación de la expansión determinó un tamaño significativamente menor de la hoja. El estado de 12 hojas desarrolladas (V12) es clave en la fisiología del rendimiento, ya que en este momento se definen el número potencial de granos y el tamaño de la espiga (Ritchie *et al.*, 1997). Por otra parte, la hoja 12 es frecuentemente la hoja de la espiga y por esa razón es empleada para describir algunos modelos de desarrollo foliar y rendimiento del cultivo (España *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2014). El canopeo de maíz siguiendo a un cultivo de cobertura y sin limitantes (RCC)

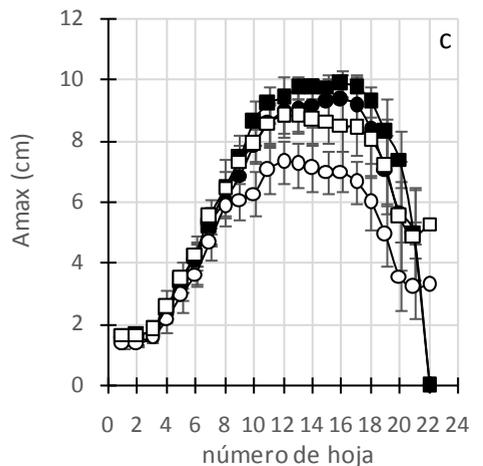
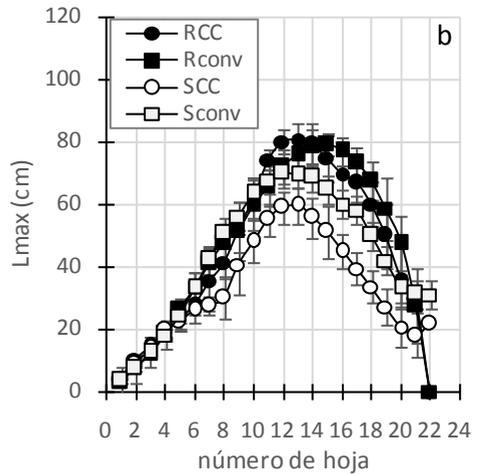
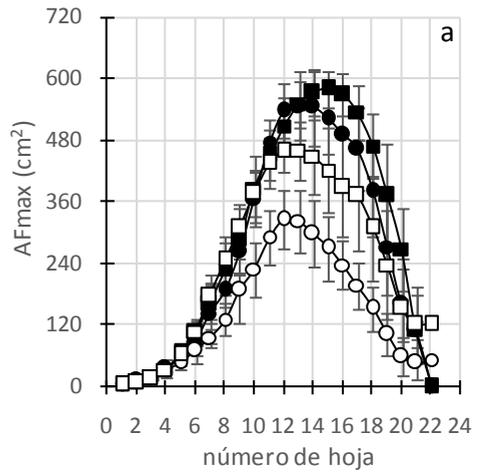
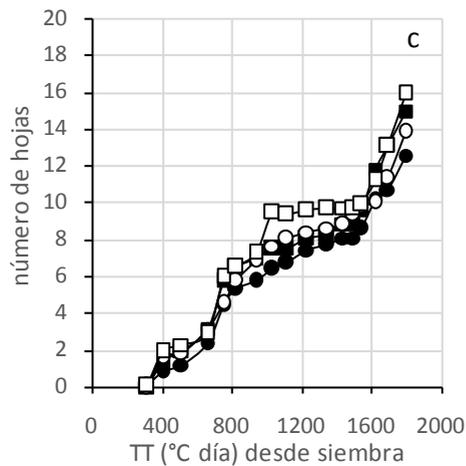
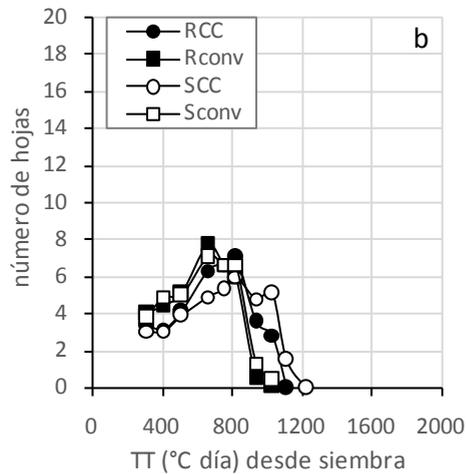
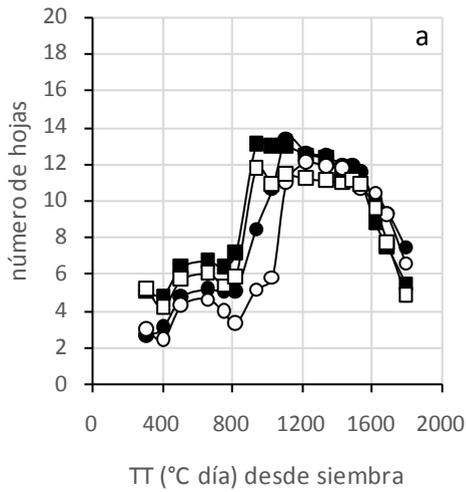


Figura 3. Evolución del número de hojas por planta de acuerdo con el estado de desarrollo en canopeos de maíz creciendo con y sin cultivo de cobertura CC y conv) en seco (S) y bajo riego (R). a. Hojas con el área máxima alcanzada (AFmax). b. Hojas en desarrollo. c. Hojas senescentes.

Figura 4. Valores medios de los atributos morfológicos de las hojas en canopeos de maíz creciendo con y sin cultivo de cobertura previo (CC y conv) en seco (S) y bajo riego (R). a. Área foliar máxima (AFmax). b. Longitud máxima (Lmax). c. Ancho máximo (Amax). Se indica con la barra vertical el error estándar.

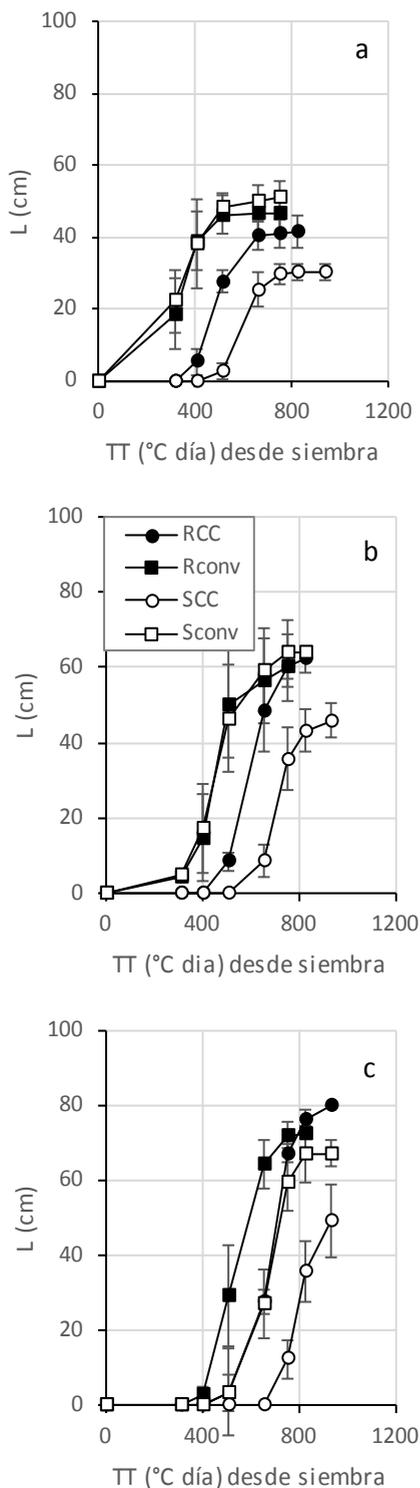


Figura 5. Evolución de la longitud de la lámina (L) hasta alcanzar la longitud máxima (Lmax) en hojas seleccionadas de canopeos de maíz con y sin cultivo de cobertura previo (CC y conv) en secoano (S) y bajo riego (R). a. Hoja 8. b. Hoja 10. c. Hoja 12. Se indica con la barra vertical el error estándar.

mostró tasas de elongación semejantes e incluso superiores a las observadas en canopeos con los manejos de barbecho limpio con y sin limitantes (Sconv y Rconv).

CONCLUSIONES

En este estudio se caracteriza la influencia de la inclusión de un cultivo de cobertura (CC) y el contenido de agua en el suelo sobre atributos estructurales del canopeo de maíz (*i.e.* área foliar) y de las hojas individuales (*i.e.* área foliar máxima, longitud máxima y ancho máximo).

Se demostró que la presencia de un cultivo de cobertura modifica la generación de área foliar si existen limitantes de agua durante el desarrollo vegetativo, como las experimentadas en secoano durante la campaña agrícola 2016-2017; mientras que, bajo condiciones no limitantes, a pesar del retraso en el crecimiento y desarrollo foliar, el índice de área foliar máximo en canopeos siguiendo al cultivo de cobertura pueden no diferenciarse de los alcanzados con el manejo convencional de barbecho limpio.

Sin limitantes de agua, los atributos morfológicos de las hojas de maíz creciendo luego de un cultivo de cobertura no se modifican significativamente con respecto a los canopeos que se desarrollan después de un barbecho limpio (conv). En secoano, las diferencias de tamaño más significativas se detectan en las hojas de mayor dimensión y son debidas a una reducción tanto del ancho como de la longitud.

Nuestro trabajo sugiere que los atributos del canopeo se modifican con la inclusión de CC si hay limitantes de agua y esta condición debiera considerarse si se propone el manejo en secoano de maíz siguiendo a un cultivo de cobertura para no afectar negativamente la intercepción de radiación y el ulterior rendimiento del cultivo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP) y a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) que han provisto la financiación del presente trabajo. A. Irigoyen y R. Rivas son investigadores de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC). L. Echarte es investigadora del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet).

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, C.; Scianca, C. 2006. Cultivos de cobertura en Molisoles de la Región Pampeana. Aporte de carbono e influencia sobre las propiedades edáficas. Jornada Profesional Agrícola 2006. INTA, Estación Experimental Agropecuaria General Villegas. 16 p.
- Andrade, F.H.; Cirilo, A.; Uhart, S.; Otegui, M.E. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. DekalbPress. Balcarce, Argentina. 292 p.
- Andrieu, B.; Hillier, J.; Birch, C. 2006. Onset of the sheath extension and duration of lamina extension are major determinants of the response of maize lamina length to plant density. *Annals of Botany* 98: 1005-1016.
- Birch, C.J.; Hammer, G.L.; Rickert, K.G. 1998. Improved methods for predicting individual leaf area and leaf senescence in maize (*Zea mays*). *Australian Journal of Agricultural Research* 49: 249-262.
- Birch, C.J.; Vos, J.; van Der Putten, P.E.L. 2003. Plant development and leaf area production in contrasting cultivars of maize grown in a cool temperate environment in the field. *European Journal of Agronomy* 19: 173-188.
- Birch, C.J.; Thornby D.; Adkins S.; Andrieu B.; Hanan, J. 2008. Architectural modelling of maize under water stress. *Australian J. Exp. Agriculture* 48: 335-341.
- Cambareri, M. A.; Irigoyen, A.I.; Echarte, L.; Fereres, E. 2018 a. Evapotranspiración y eficiencia en el uso del agua de maíz sobre cultivo de cobertura en el sudeste bonaerense. I: Condiciones de secano. XVII Reunión Argentina de Agrometeorología. Villa de Merlo.
- Cambareri, M. A.; Irigoyen, A.I.; Echarte, L.; Fereres, E. 2018 b. Evapotranspiración y eficiencia en el uso del agua de maíz sobre cultivo de cobertura en el sudeste bonaerense. II: Condiciones de agua no limitante. XVII Reunión Argentina de Agrometeorología. Villa de Merlo.
- Chen, G.; Zhang, J.; Liu, P; Dong, S. 2014. An empirical model for changes in the leaf area of maize. *Can. J. Plant Sci.* (2014) 94: 749-757.
- Colomb, B.; Kiniry, J.R.; Debaeke, P. 2000. Effect of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamics of field-grown maize. *Agronomy Journal* 92: 428-435.
- Corral, A. 2016. Densidad de plantas y estructura del canopeo de maíz. Tesis de graduación. UNMdP, Argentina. 54 p.
- Díaz, V. 2015. Área foliar verde y estructura del canopeo en el cultivo de maíz bajo sistemas con diferente grado de intensificación en la producción de granos. Tesis de graduación. UNMdP, Argentina. 42 p.
- Dwyer, L. M.; Stewart, D. W. 1986. Leaf area development in field grown maize. *Agronomy J.* 78: 334-343.
- España, M. L.; Baret, F.; Aries, F.; Chelle, M.; Andrieu, B. and Prévot, L. 1999. Modeling maize canopy 3D architecture application to reflectance simulation. *Ecol. Model.* 122: 25-43.
- Irigoyen, A.; Corral, A.; Díaz, V.N.; Echarte, L. 2015. Chlorophyll leaf profile and light attenuation during reproductive stages of maize as affected by plant population. In: de Campos, A.B.; Gabriels, D. and Deyanira, L.L. (ed.) *Impacts of Agroecosystems on Environment*. CH. I. Environmental sustainability of agrosystems: 23-28. UNESCO Chair of Eremology, Ghent University, Belgium and International Centre of Eremology (ICE), Ghent University, Belgium.
- Irigoyen, A.I.; Cambareri, M.A.; Echarte, L. 2016. Estructura vertical del canopeo de maíz en panojamiento: Efecto de la cobertura de la superficie, agua y nitrógeno. XVI Reunión Argentina y VIII Reunión Latinoamericana de Agrometeorología. Puerto Madryn.
- Irigoyen, A.I.; Cambareri, M.A.; Echarte, L.; Bayala, M.I.; Rivas, R.E. 2018. Efectos de la cobertura de la superficie, agua y nitrógeno sobre atributos del canopeo de maíz en panojamiento. *Revista Argentina de Agrometeorología*, v. IX: 75-84.
- Karadavut, U.; Palta, C.; Kokten, K.; Bakoglu. 2010. Comparative study on some non-linear growth models for describing leaf growth of maize. *Int. J. Agric. Biol.* 12: 227-230.
- Lemcoff, J. H.; Loomis, R. S. 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize. *Crop Science* 26:1017-1022.
- Lizaso, J.T.; Batchelor, W.D.; Wesgate, M. E. 2003. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. *Field Crops Research* 80:1-17.
- Maddonni, G.A.; Otegui, M.E.; Cirilo, A.G. 2001. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize architecture and light attenuation. *Field Crops Res.* 71: 183-193.
- Maune, C. 2014. Fechas de siembra y desarrollo del área foliar pre-antesis en híbridos de maíz de diferente madurez relativa. Tesis de graduación, UNMdP, Balcarce, Argentina. 46 p.
- Muchow, R. C.; Davis, R. 1988. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Res.* 18:17-30.
- NeSmith, D. S.; Ritchie, J.T. 1992. Short and long-term response of corn to pre-anthesis soil water deficit. *Agron. J.* 84:107- 113.
- Ritchie, S. W.; Hanway, J. H.; Benson, G. O. 1997. How a corn plant develops. Ames: Cooperative Extension Service. 21 p.

- Sadok, W.; Naudin, P.; Boussuge, Muller, B.; Welcker, C.; Tardieu, F. 2007. Leaf growth rate per unit thermal time follows QTL dependent daily patterns in hundreds of maize lines under naturally fluctuating conditions. *Plant, Cell and Environment* 30: 135-146.
- SAS University Edition. 2015. SAS/IML® 14.1 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Stewart, D. W.; Dwyer, L. M. 1994. A model of expansion and senescence of individual leaves of field-grown maize (*Zea mays* L.). *Can. J. Plant Sci.* 74: 37-42.
- Tardieu, F.; Reymond, M.; Hamard, P.; Granier, C.; Muller, B. 2000. Spatial distributions of expansion rate, cell division rate and cell size in maize leaves. *Journal of Experimental Botany* 51: 1505-1514.
- Valentinuz, O.R.; Tollenaar, M. 2006. Effect of genotype, nitrogen, plant density and row spacing on the area-per-leaf profile in maize. *Agron. J.* 98:94-99.
- Wilson, D.R.; Muchow, R.C; Murgatroyd, C.J. 1995. Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in a cool climate. *Field Crops Research* 43: 1-18.

Balance hidrológico en un entorno SIG para un campo agrícola en Diamante, Entre Ríos

Kinderknecht, L. E.; M. B. Tóffoli; A. B. Brizuela y C. A. Aguirre

RESUMEN

El departamento Diamante en la provincia de Entre Ríos se caracteriza por su topografía ondulada que influye a escala de lote sobre la variabilidad de la humedad de suelo. Las herramientas proporcionadas por los sistemas de información geográfica facilitan el tratamiento y análisis de dicha variable mediante una representación matricial de las entradas y salidas de agua para cada celda del lote. El presente trabajo de carácter exploratorio, propone adaptar el balance hidrológico operativo de la Oficina de Riesgos Agropecuarios para su uso a escala predial incorporando el escurrimiento superficial en función de un mapa de acumulación de flujo. Se determinaron los sectores de loma, media loma y bajo del predio, por medio de un índice topográfico. Se obtuvieron mapas de almacenaje hídrico del campo cada 10 días en la capa de suelo superficial (0-20 cm), entre el 1 de septiembre de 2017 y el 31 de agosto de 2018 para una grilla de 10 m de resolución. La metodología propuesta, da cuenta de los cambios de la humedad de suelo que presentan especialmente los sectores más bajos del predio, lo cual resulta necesario validar con datos de campo.

Palabras clave: Humedad de suelo; Índice topográfico; Modelo digital de elevación; Acumulación de flujo

Kinderknecht, L. E.; M. B. Tóffoli; A. B. Brizuela and C. A. Aguirre-2019. Hydrological balance in a gis environment for an agricultural field in Diamante, Entre Ríos. RADA X: 35-47

SUMMARY

The Diamante department in Entre Ríos province is characterized by its undulating topography that influences the variability of soil moisture on a batch scale. The tools provided by the geographic information systems facilitate the treatment and analysis of said variable through a matrix representation of the water inputs and outputs for each cell in the batch. This exploratory paper proposes adapting the operational hydrological balance of the Office of Agricultural Risks for use at a field scale incorporating surface runoff based on a flow accumulation map. The hill, half-hill and low-lying areas of the field were determined by means of a topographic index. Water storage maps of the field were obtained every 10 days in the surface soil layer (0-20 cm), between September 1, 2017 and August 31, 2018 for a 10 m resolution grid.

The proposed methodology gives an account of the changes in soil moisture, especially in the lower sectors of the field, which is necessary to validate with field data.

Key words: Soil moisture - Topographic index - Digital elevation model - Flow accumulation.

Kinderknecht, L. E.; M. B. Tóffoli; A. B. Brizuela y C. A. Aguirre: Cátedra de Climatología Agrícola y Sistemas de Información Geográfica. Facultad de Ciencias Agropecuarias. UNER. (3101) Oro Verde, Ruta 11, Km 10,5. Entre Ríos. Argentina. A. B. Brizuela y C. A. Aguirre: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Correspondencia a: kinderknechtleandro1@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Tanto el departamento Diamante como otros en la provincia de Entre Ríos (Argentina), se caracterizan por su topografía ondulada y variabilidad altimétrica (Plan Mapa de Suelos, 1991). Esta condición junto a otras propiedades del suelo explican las variaciones de la humedad edáfica en el interior de los lotes a lo largo del tiempo. Por ello resulta necesario estudiar la variabilidad espacio - temporal de la humedad de suelo a escala predial incorporando al análisis procesos hidrológicos de impacto local.

Según Kravchenko y Bullock (2000), tanto la curvatura, la pendiente y la acumulación de flujo afectan significativamente el rendimiento de los cultivos sólo bajo ciertas condiciones, como ubicaciones topográficas extremas (depresiones no drenadas o cimas erosionadas) combinadas con precipitaciones muy altas o bajas.

Kravchenko y Bullock (2002) estudiaron la influencia de las características topográficas como elevación, pendiente y curvatura del terreno sobre el contenido de proteína y la concentración de aceite en soja [*Glycine max* (L.) Merr.]. Posteriormente caracterizaron la variabilidad espacio-temporal en los rendimientos de maíz (*Zea mays* L), soja y trigo (*Triticum aestivum* L.) a escala de lote. Para tal fin analizaron los efectos de las prácticas de manejo, las características topográficas y las condiciones climáticas (Kravchenko *et al.*, 2005).

Kaspar *et al.* (2003) analizaron una serie de años con precipitaciones tanto superiores como inferiores a los valores medios para relacionar

los atributos del terreno con los rendimientos del cultivo de maíz en las distintas campañas. A su vez, establecieron patrones espaciales de rendimiento a partir de un modelo de regresión lineal múltiple.

Castro Franco *et al.* (2012) mostraron, para un lote y para una campaña de soja, que los atributos primarios y secundarios de la topografía están relacionados con el rendimiento. En particular, consideran que es una efectiva manera de cuantificar el efecto de la topografía sobre el rendimiento y que los atributos primarios, con excepción de la pendiente, explican en gran parte la variabilidad espacial del rendimiento.

De acuerdo a lo mencionado en párrafos anteriores, queda claro que la variabilidad topográfica influye sobre ciertas propiedades de suelo -como la disponibilidad hídrica-, siendo este uno de los principales factores que ocasiona una variación en los rendimientos en cultivos agrícolas.

Un procedimiento utilizado generalmente para estimar la humedad en el suelo es el balance hidrológico, "se trata de un modelo simplificado de la reserva de agua en la zona de exploración radicular o sea en la zona insaturada del suelo" (Fernández Long *et al.*, 2012). En éste trabajo la autora describe numerosos modelos desarrollados a lo largo de tiempo, y considera que el estudio del agua en el suelo y su relación con los rendimientos, a escala de departamento o partido, representa una contribución para explicar la productividad de los cultivos en la Región Pampeana Argentina.

Para analizar la variabilidad espacial de la humedad en el suelo se utilizan aplicaciones de teledetección y Sistemas de Información

Geográfica (SIG). Estas herramientas ofrecen un abanico de posibilidades para la elaboración de mapas digitales de atributos hídricos-topográficos. Qiu *et al.* (2001) realizaron mediciones de humedad de suelo en 5 profundidades y encontraron que el perfil y las características dinámicas de la humedad del suelo se controlan tanto por el uso del suelo como por la topografía (por ejemplo, aspecto, posición, pendiente y elevación relativa). Por otro lado, Teuling *et al.* (2006) destacan que la variabilidad de la humedad edáfica es el resultado de una interacción compleja entre las características del suelo, la vegetación y el paisaje.

Se podrían lograr mejores aproximaciones para caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la humedad de suelo, en un campo o en un lote mediante la utilización de registros meteorológicos 'in situ', descripción del perfil de suelo con sus constantes hídricas, estimación de almacenamiento de agua en el suelo -con un balance hidrológico seriado aplicado a escala de píxel-, o bien la inclusión de modelos o índices teniendo en cuenta que la humedad de suelo está relacionada con los factores edáficos y topográficos. A tal efecto Dyer, (2009) resalta el papel de la topografía en el control sobre los patrones de humedad del suelo y por lo tanto la influencia en la composición de los bosques.

Por su parte, Leiva Gutierrez (2012) expone una metodología, con técnicas geoestadísticas y análisis de regresión multivariada, para estimar la humedad disponible en forma mensual a través del balance hídrico. Encontró que en la época lluviosa son relevantes los aportes de las variables topográficas como la curvatura, la pendiente y el índice de posición topográfica; mientras que en la época seca, lo son las formas del terreno y el índice topográfico de humedad relativa.

En los campos agrícolas, donde la topografía varía en cortas distancias, es necesario tomar en cuenta el escurrimiento superficial en las estimaciones de almacenamiento de agua en el suelo y en la distribución espacial del mismo. Para ayudar a comprender la complejidad de representar los procesos hidrológicos de la superficie terrestre, Schaake *et al.*, (1996) desarrollaron un modelo de balance de agua paramétrico, basado en el promedio estadístico de los principales procesos hidrológicos que tiene por objetivo simular la escorrentía de manera simple en modelos atmosféricos / hidrológicos acoplados. Otros autores como Flores y Ruíz (1998) incorporaron la variable espacial del escurrimiento superficial en los modelos a partir de las curvas número (CN) (U.S. Soil Conservation Service, 1968).

Aun cuando es ampliamente reconocido que la humedad de suelo –medida o estimada- es una variable apreciada si estuviera disponible durante las campañas agrícolas y, especialmente en los períodos críticos de los cultivos, resulta complejo lograr aplicaciones en tiempo real con resultados certeros. En este sentido un modelo operativo ha sido implementado en nuestro país por la Oficina Riesgo Agropecuario (ORA); la cual brinda información actualizada de las condiciones de humedad de los suelos en diferentes regiones del país. A tal efecto, utiliza un balance hídrico de paso diario que incluye el escurrimiento superficial y estima un paulatino escurrimiento de los excesos eventualmente acumulados en superficie luego de lluvias intensas (Basualdo y Occhiuzzi, 2005).

En el presente trabajo se explora un esquema para incluir, en el balance hidrológico utilizado por ORA, la variabilidad espacial a escala de un lote agrícola. A su vez, se indagan probables cambios por escurrimiento teniendo en cuenta un mapa de acumulación de flujo derivado de un Modelo Digital de Elevación (MDE).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo sobre la totalidad del área productiva correspondiente al campo experimental "R. Roldán" que posee la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER) en el Departamento Diamante (provincia de Entre Ríos), que está ubicado entre los paralelos: 31° 51' 10" a 31° 51' 56" de latitud sur y meridianos: 60° 38' 59" a 60° 37' 48" de longitud oeste (Figura 1). El campo cuenta con una superficie de 124 ha y se encuentra dividido en lotes donde se realizan distintos cultivos de invierno y verano siguiendo un esquema de rotación. Además, en el predio se realizan ensayos de cultivos y actividades de docencia e investigación a menor escala.

El suelo pertenece a la serie Tezanos Pinto. En la Tabla 1 se resumen algunas propiedades edáficas determinadas a campo que presenta el horizonte superficial (Ap) en las diferentes posiciones dentro del paisaje.

Los datos meteorológicos corresponden al observatorio agrometeorológico de INTA Paraná ubicado a 11 km en dirección NE del predio a Latitud: 31° 50' S - Longitud: 60° 32' O, Elevación 105 m s.n.m. Se obtuvieron los datos diarios de precipitación (mm), radiación global (MJ/m²), temperaturas máxima y mínima (°C), humedad

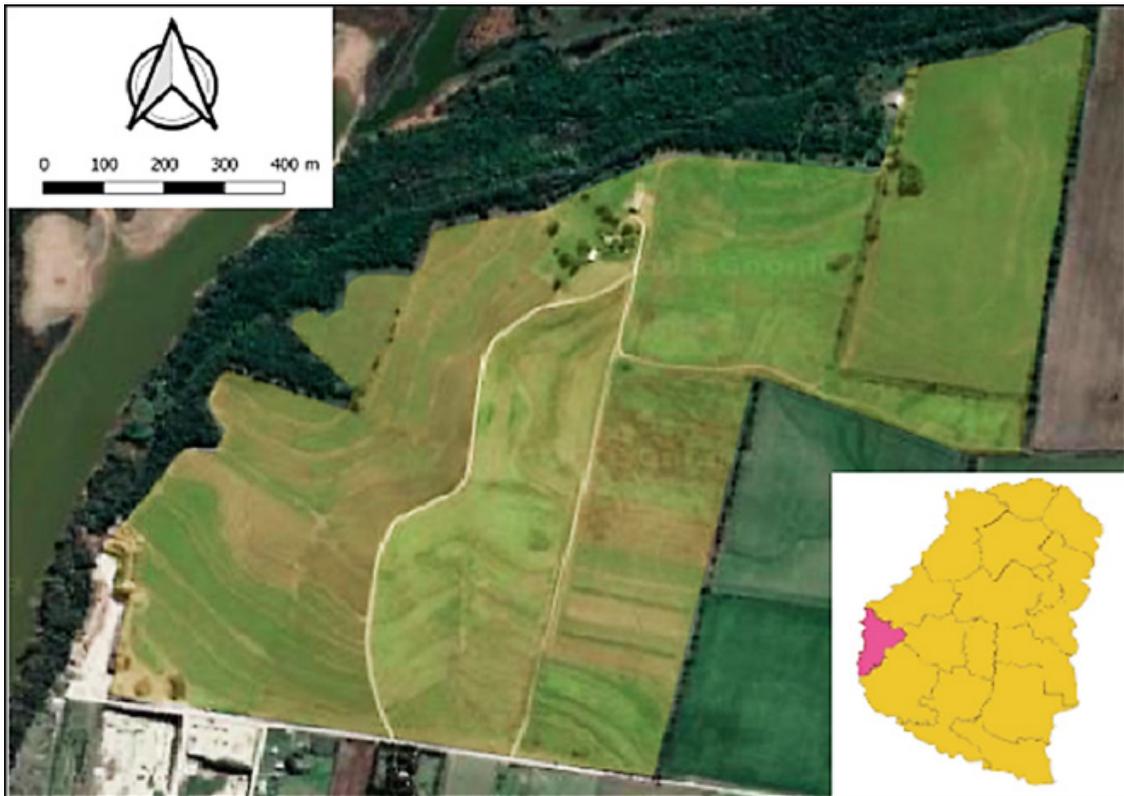


Figura 1: Ubicación del Campo Roldán –FCA UNER en el departamento Diamante de la Provincia de Entre Ríos, Argentina (Google Earth, 2018)

Tabla 1: Propiedades edáficas del horizonte superficial Ap en loma, media loma y bajo (CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente y Dap: densidad aparente).

Posición topográfica	Profundidad (cm)	D _{ap} (Kg /m ³)	CC (%)	PMP (%)
Loma	20	1,47	27,39	15,62
Media loma	18	1,41	28,69	14,96
Bajo	22	1,34	29,37	15,73

relativa (%) y velocidad de viento (m/s), durante el período comprendido entre el 1° de septiembre de 2017 al 31 de agosto del 2018. A partir de estas observaciones se obtuvo la precipitación (Pp) y la evapotranspiración (ETo) - mediante el método de Penman Monteith modificado por FAO (Allen, *et al.*, 1998) - acumuladas en el período de 10 días. También se contó con un relevamiento altimétrico con GPS del campo experimental para generar un modelo digital de elevación (MDE).

El predio fue representado con una resolución de 10 m x 10 m de tal manera que las variables conformaron capas raster con esas dimensiones de los píxeles. La profundidad de suelo considerada fue de 20 cm puesto que a la fecha no se cuentan con datos a mayor profundidad.

La humedad de suelo, que se analizó en ésta etapa hasta los primeros 20 cm de profundidad, fue estimada mediante un balance hidrológico decádico con un procedimiento similar a la metodología propuesta por (Basualdo y Occhiuzzi, 2005).

Se generó el MDE con la resolución mencionada y se utilizó para obtener el índice topográfico (TPI) (Figura 2) que es apto para la clasificación de geoformas. Con éste índice es posible definir la posición topográfica de 'loma', 'media loma' y 'bajo' que poseen las propiedades de CC y PMP que se indican en la Tabla 1. Los valores positivos de TPI indican que la elevación de un píxel es mayor que la de sus vecinos, valores negativos indican que es más baja y cercanos a cero podrían corresponder a un área llana o de media ladera, por lo que la pendiente se puede utilizar para distinguir la posición o la categoría de la geoforma. En este trabajo se asignaron las categorías de 'loma' (TPI > 0,7), 'media loma' (-0,8 ≤ TPI ≤ 0,7) y 'bajo' (TPI < -0,8).

Esta caracterización es similar a la propuesta por Weiss (2001) quien advierte que en la definición de los umbrales de las clases se deben

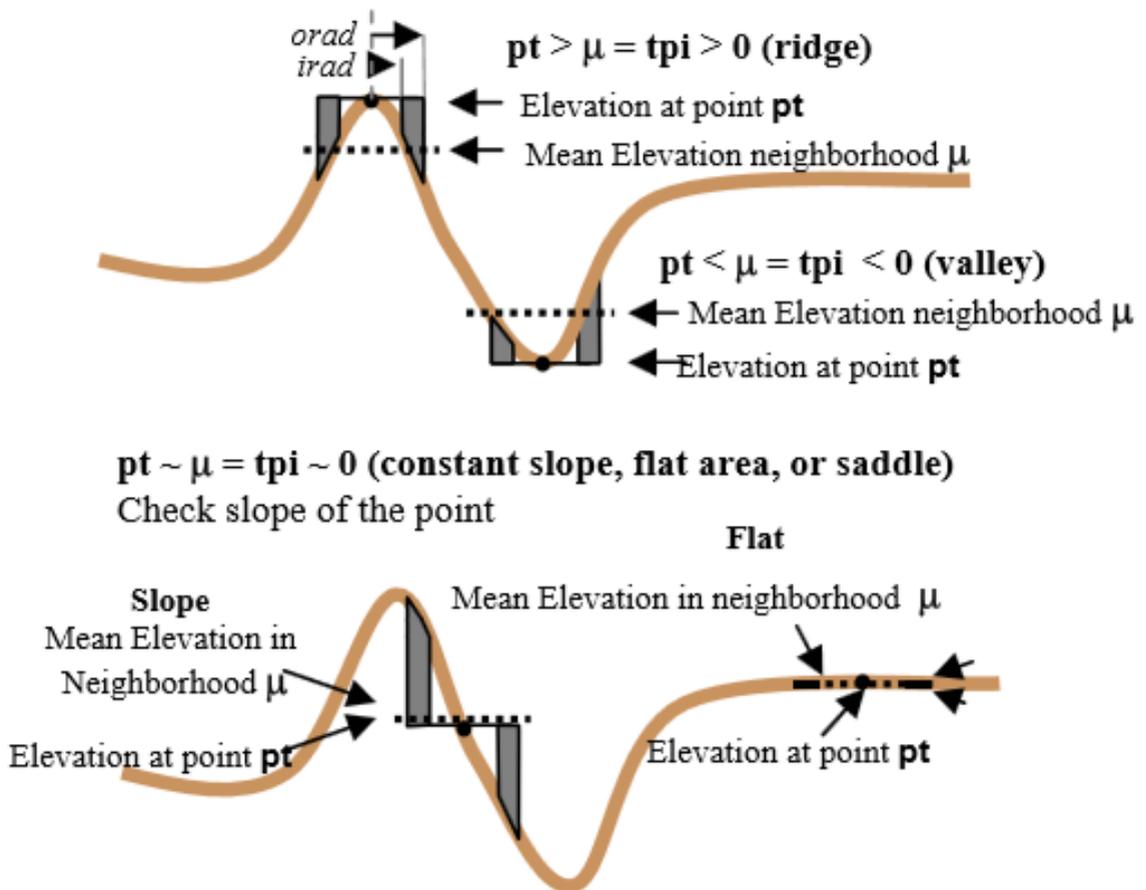


Figura 2. Esquema de la metodología para la obtención del TPI (Weiss, 2001)

tener en cuenta: el paisaje específico, la escala del índice y el problema que se está abordando. El autor sostiene que se podrían ajustar los límites de los intervalos de clase incorporando métricas adicionales como la varianza de la pendiente con la que se pueden definir 6 clases: cresta, pendientes: superior, media o plana, baja y valle.

Teniendo en cuenta el mapa con la clasificación en tres clases se llevó a cabo el cálculo del BH decádico para cada zona topográfica

El procesamiento se realizó en un entorno SIG con las siguientes aproximaciones:

- La precipitación y evapotranspiración de referencia (ET_o), para el cálculo del almacenamiento de agua en cada período, son uniformes para todos los píxeles.
- El almacenaje de agua se estima en los primeros 20 cm de suelo y se asume que al inicio (1/09/2017) el campo se encontraba en capacidad de campo producto de las lluvias previas.

- Cada sector del campo (loma, media loma y bajo) tiene determinadas constantes hídricas (CC y PMP), densidad aparente (Dap) y profundidad del horizonte Ap.
- Los excesos de agua se extinguen por escurrimiento durante el período de 10 días en el que ocurren
- El escurrimiento superficial sigue el patrón de acumulación de flujo (cantidad de agua que circula por una celda) determinado en función de la configuración tridimensional que presenta el terreno.

Balance hidrológico decádico.

En la Figura 3 se muestran las componentes consideradas en el balance hídrico ilustrando un píxel típico. El balance se hizo operativo en un entorno SIG mediante la obtención de mapas en formato raster de almacenaje, escurrimiento, percolación y evapotranspiración real.

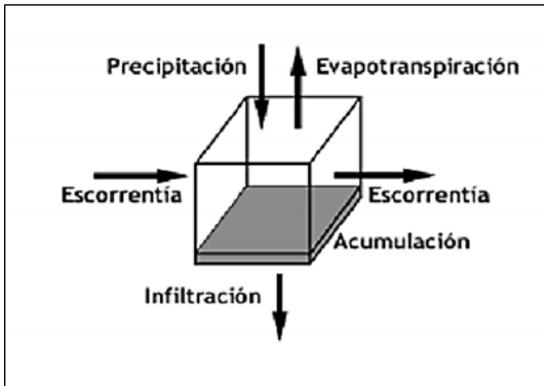


Figura 3. Balance hídrico en una celda (Tomado de Olaya, 2004)

Para cada pixel de la imagen, se aplica el balance hidrológico (BH) y se obtiene para cada período el valor de almacenaje que corresponde a una capa de suelo superficial. El valor de humedad de suelo por pixel, estará comprendido entre CC y almacenaje mínimo. En el modelo de balance utilizado se considera que el almacenaje de agua en un período (t) en la capa superficial de suelo (20 cm), depende de las precipitaciones, evapotranspiración, excesos, escurrimiento y percolación. Utilizando el programa QGIS se generaron los mapas.

Las siguientes variables intervienen en la estimación del almacenaje en el período:

- El límite de desecamiento (LD): que representa una fracción del contenido de agua, que retiene el suelo, por debajo de la cual la evaporación y la percolación no ocurren o son despreciables. Se aplica para valores entre 0 –suelos arenosos de poca retención- y 1 –suelos arcillosos-. (ecuación 1)

$$LD = [(PMP/CC) - 0.4] * 2.5 \quad (1)$$

Dónde:

PMP: punto de marchitez permanente y;

CC: capacidad de campo.

- Almacenaje mínimo (ALM_{min}): es un valor inferior al PMP, que se asume como el umbral inferior de desecamiento que podría ocurrir.

$$ALM_{min} = LD * PMP \quad (2)$$

- La evapotranspiración real (ETR) es estimada en función de las condiciones del almacenaje del período anterior (ALM_{t-1}) y de

la evapotranspiración de referencia (ETot). ETR es máxima si $ALM_{t-1} = CC$ y decrece a medida que almacenaje disminuye según la siguiente relación empírica:

$$ETR(t) = ETo * ALM(t-1) / CC \quad (3)$$

- El escurrimiento superficial asociado normalmente a las precipitaciones (PP), especialmente cuando son moderadas o abundantes, se estima de acuerdo con la precipitación del período (PPt), un coeficiente de escurrimiento (CE) y la capacidad de infiltración del suelo (CI):

$$ESC(t) = CE * (PP(t) + EXC(t-1)) \exp [-CI / (PP(t) + EXC(t-1))] \quad (4)$$

si $EXC(t-1) \neq 0$ ó $PP(t) \neq 0$

$$ESC_t = 0 \quad (4)$$

si $EXC(t-1) = 0$ y $PP(t) = 0$

$$CI_t = CC - ALM(t-1) \quad (5)$$

Este valor de CI corresponde a la cantidad de agua en mm que podría admitir el suelo hasta llegar a capacidad de campo.

Se consideró que el coeficiente de escurrimiento $CE = 0,3$ es representativo para las condiciones del campo en cuanto a pendiente, composición y poca cobertura vegetal y fue derivado del trabajo de Mahmoud y Alazba (2015).

En el esquema utilizado para establecer el almacenamiento de agua en el suelo por períodos de diez días, se consideró un término que corresponde a la infiltración profunda o percolación (PER). Representa un valor que depende del tipo de suelo y de la humedad inicial. Se supone que la percolación es máxima cuando se alcanza la capacidad de campo, disminuye cuando la humedad del suelo es inferior a CC y tiende a un umbral (UI). Por debajo de UI la percolación es considerada nula.

$$UI = PMP + 0,5 * (CC - PMP) \quad (6)$$

También Basualdo y Occhiuzzi (2005) indican que el coeficiente de percolación (CP) se calcula teniendo en cuenta el porcentaje de arcilla (X) y la profundidad de la capa de suelo considerada (Y) en mm según:

$$CP = 5,32 * X - 1,042 / Y \quad (7)$$

Los datos de porcentaje de arcilla del horizonte superficial para la serie Tezanos Pinto necesarios

para el cálculo fueron obtenidos por Picotti (2010). A partir de esto se estima la percolación como:

$$PER(t) = CP * (ALM(t-1) - UI) \quad (8)$$

Cuando $UI \leq ALM \leq CC$ y nula en otro caso.

Se plantea un balance hidrológico por períodos de 10 días cuyo resultado posibilita determinar el almacenamiento (ALMt) teniendo en cuenta los componentes descritos

$$ALM(t) = ALM(t-1) + PP(t) - ETR(t) - ESC(t) - PER(t) \quad (9)$$

Se asume que $ALMt = CC$ cuando la cantidad de agua acumulada iguala o supera a CC y $ALMt = UI$ cuando hay desecamiento y el valor según (9) resulta inferior a UI .

Como se indicó se elaboró un MDE con resolución espacial de 10 m x 10 m y se obtuvieron los siguientes productos: índice de posición topográfica (TPI) y un mapa de acumulación de flujo (MAF). El MAF representa en una grilla de datos el aporte de agua que recibe una celda determinada. Significa el número de píxeles que vuelcan el agua hacia la celda en cuestión (Figura 4).

Las celdas con acumulación de flujo nula o muy baja están asociadas localmente a mayores alturas topográficas y ayudan a identificar crestas. El mapa representa la cantidad de agua de lluvia que puede fluir por cada celda, asumiendo los excedentes se convierten en escorrenría,

compensan la evapotranspiración o la variación de almacenaje.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El MDE del campo (Figura 5) indica que la superficie presenta una variación en la elevación de aproximadamente 20 metros entre las zonas más altas (rojos) y las zonas más bajas (azules). Las curvas de nivel presentan una variación relativamente suave dando lugar a pendientes suaves con laderas largas.

El índice TPI (Figura 6), derivado del DEM, toma valores entre -1,5 a 1,6. De acuerdo a Weiss (2001), valores negativos indican zonas bajas dentro del área de estudio (en color rojo); valores positivos reflejan zonas de loma (en color verde); mientras que valores próximos a cero, representan zonas de media loma (colores naranja, amarillo y verde claro).

Este índice pone de manifiesto una de las características más importantes de la región en cuanto a su topografía ondulada. La delimitación de zonas de loma, media loma y bajo se muestran en la Figura 7.

El balance hidrológico propuesto en este trabajo de acuerdo a las pautas establecidas, da como resultado el almacenaje de agua en el suelo en cada período de diez días; como así también estimaciones de escurrimiento, percolación y evapotranspiración. La marcha de la humedad de suelo a 20 cm de profundidad durante el período evaluado en cada sitio correspondiente a loma, media loma y bajo da cuenta de una época

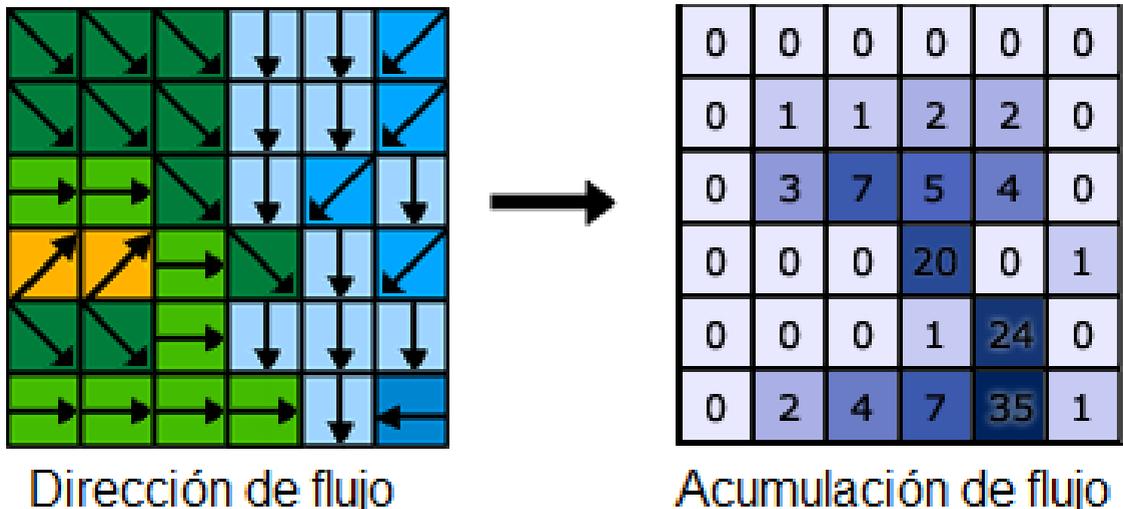


Figura 4. Cuadrícula indicando el esquema de la dirección y acumulación de flujo (Esri, 2014)

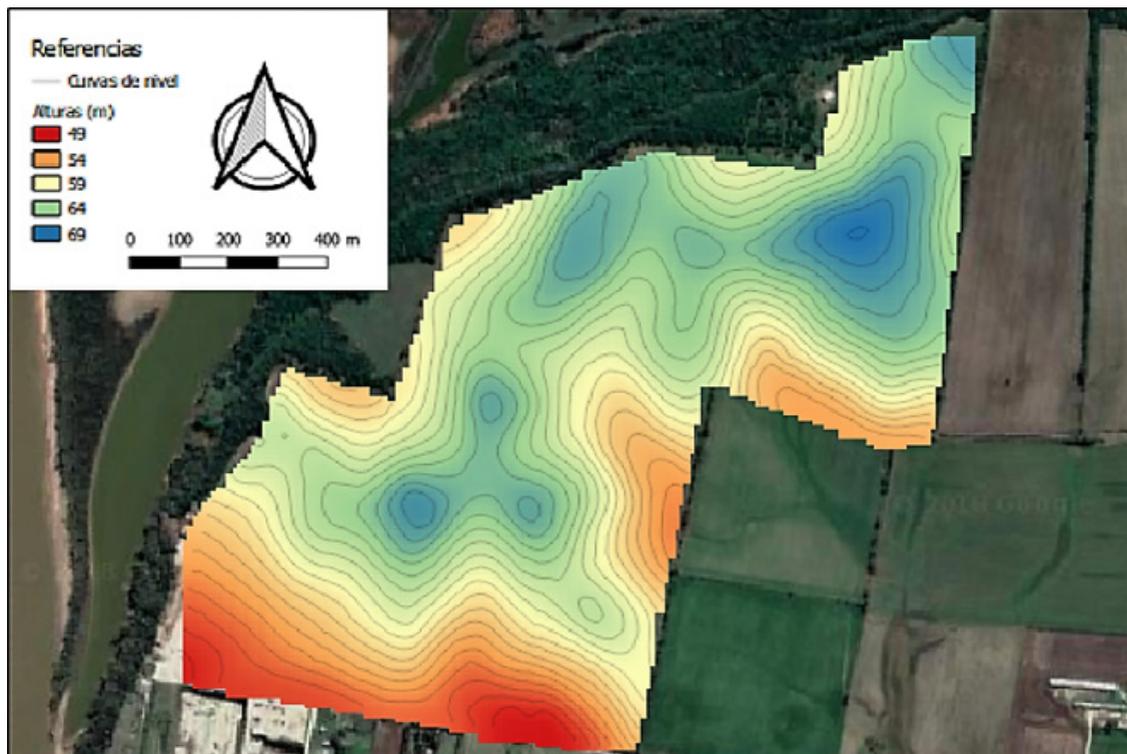


Figura 5. MDE y curvas de nivel del campo de la FCA.

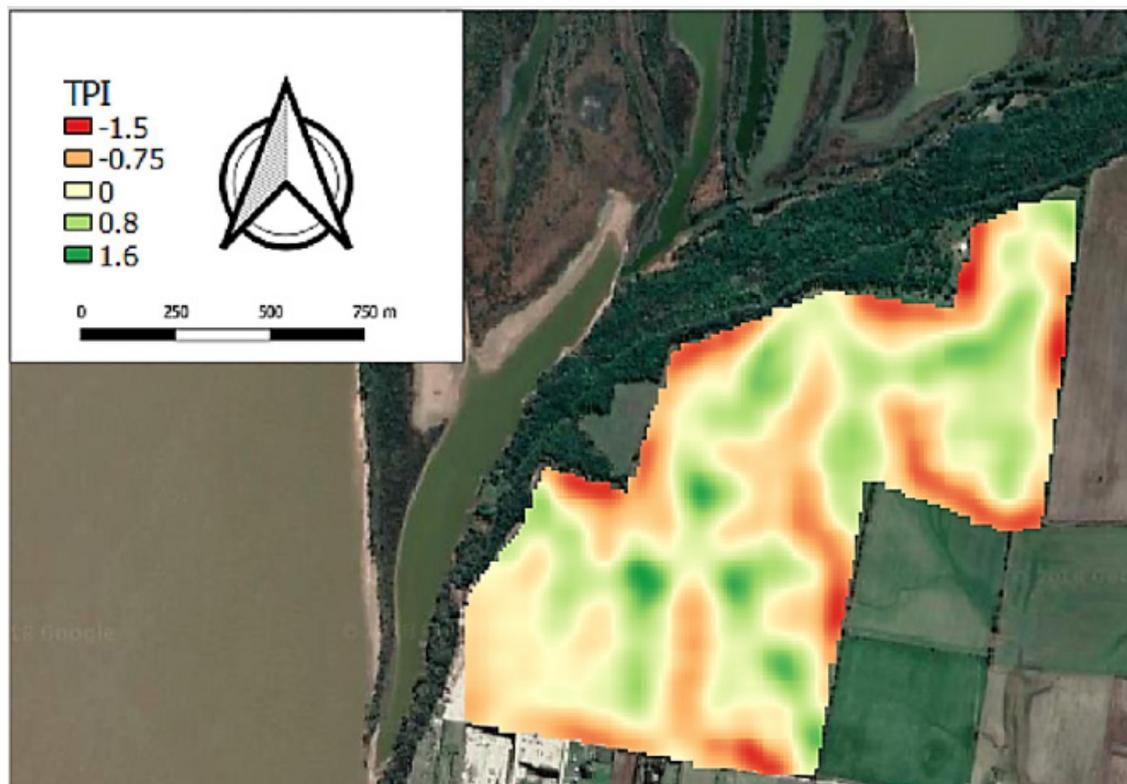


Figura 6. Índice de Posición topográfica (TPI) del área de estudio

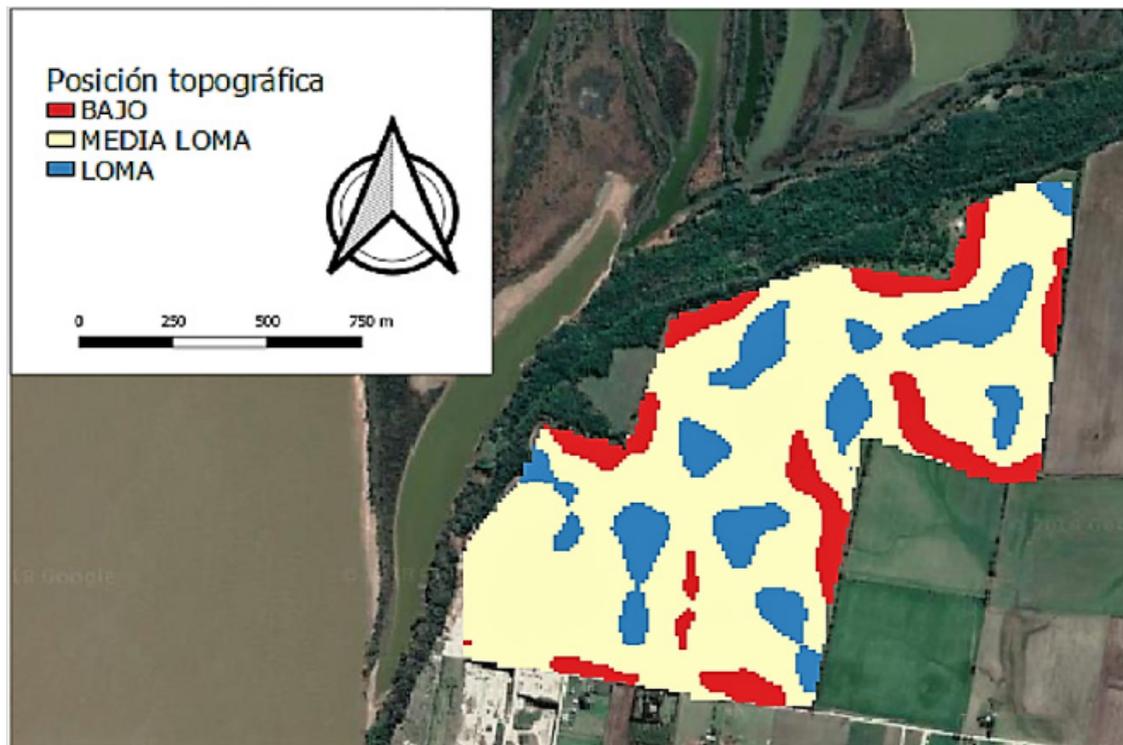


Figura 7. Clasificación de zonas; loma, media loma y bajo a partir del TPI

húmeda en la que se alcanza CC –última década de abril y primera de mayo- y otra más extensa – entre el 15/12/17 y el 15/03/18- con valores mínimos de humedad que llegan al umbral inferior de cada clase (Figura 8)

Si se compara para las tres clases topográficas el almacenaje de cada período respecto al valor de PMP, se verifica que en pocas oportunidades (un 20% de casos) iguala o supera el PMP. Una de esas situaciones ocurrió desde el 31/10/17 al 09/11/17 que se representa en el mapa de humedad de suelo superficial de la Figura 9.

En este período se incorpora al suelo parte de la lluvia, el resto forma parte del excedente. Como a su vez hay evapotranspiración, percolación y escurrimiento no se alcanza la capacidad de campo al final de ese período. Naturalmente el agua que escurre desde los sectores más altos hacia los más bajos, tiende a acumularse siguiendo un recorrido y da lugar a un mapa de acumulación de flujo. Por lo tanto es posible esperar que en algunas áreas, aguas abajo del campo, este aporte incremente la humedad del suelo hasta llegar a CC e incluso producir encharcamiento. Para analizar esa situación se generó, a partir del MDE, el MAF que se muestra en la Figura 10.

En éste trabajo el MAF se utiliza para describir el

escurrimiento superficial ya que señala claramente las celdas por las que fluye el agua y delimita las celdas que reciben, por este mecanismo, mayor aporte. Se observa que los menores valores de acumulación de flujo se ubican en zonas altas del campo.

Se postula que el escurrimiento superficial además de acumularse, de acuerdo con el MAF, incrementa la humedad de las celdas que se encuentran en el recorrido del flujo. Para simular este proceso se recalculó el almacenaje en todas las celdas, para el período del 30/10/17 al 9/11/17 ya indicado, considerando los aportes que pueden ocurrir del escurrimiento de píxeles vecinos. En este caso exploratorio se postula el supuesto de que sólo una parte (10%) del escurrimiento superficial de cada celda es retenida por el suelo si se encuentra por debajo de CC. El almacenaje modificado (ALMmod) se estima de la siguiente manera:

$$ALM(t)_{mod} = ALM(t) + 0.1 * ESC(t) * MAF \quad (10)$$

El mapa resultante se presenta en la Figura 11 que puede ser confrontada con la situación presente en la Figura 8. Como se desprende de la comparación de dichas figuras la humedad de

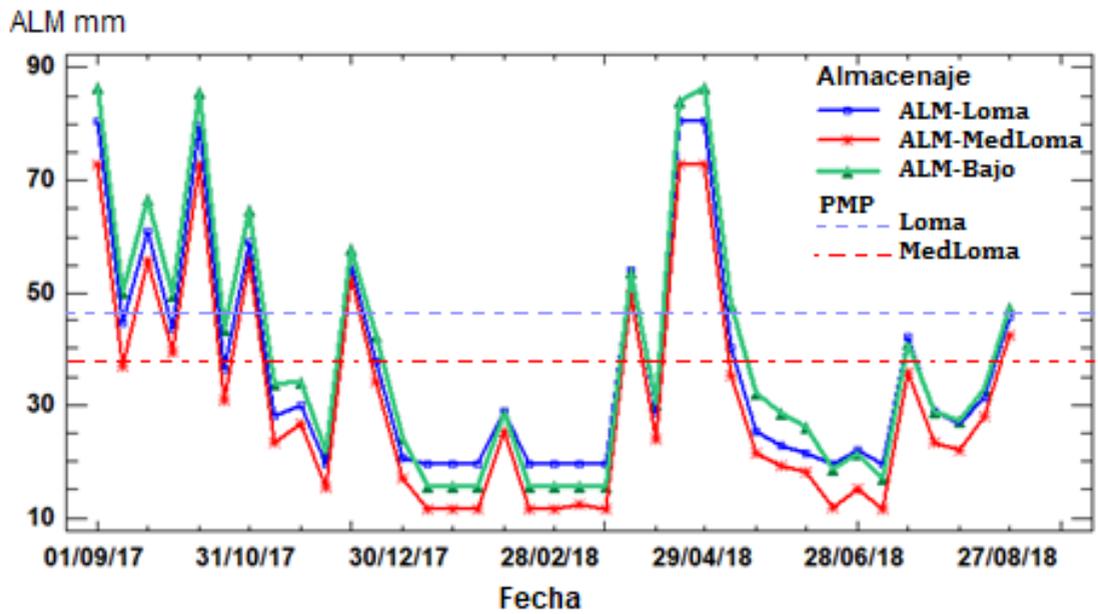


Figura 8. Evolución del almacenaje de agua en el suelo superficial en las 3 condiciones topográficas.

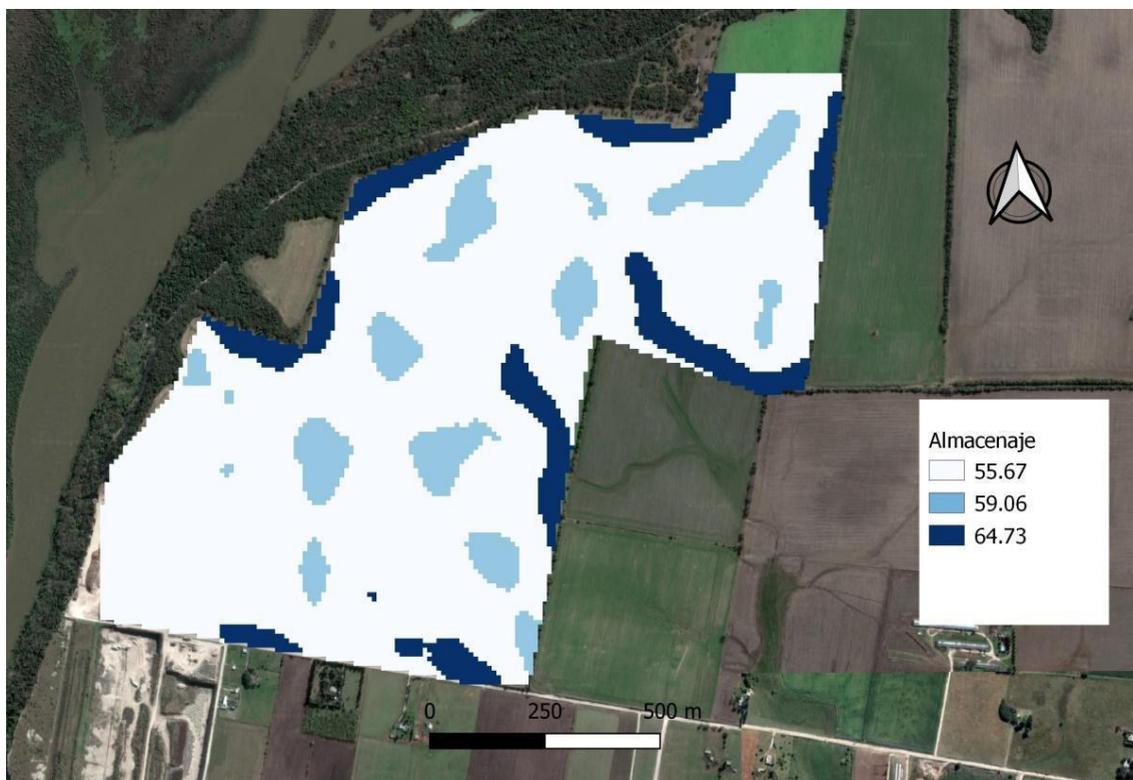


Figura 9. Almacenaje de agua en la capa de suelo superficial (20 cm) en el período 31/10/17 al 09/11/17

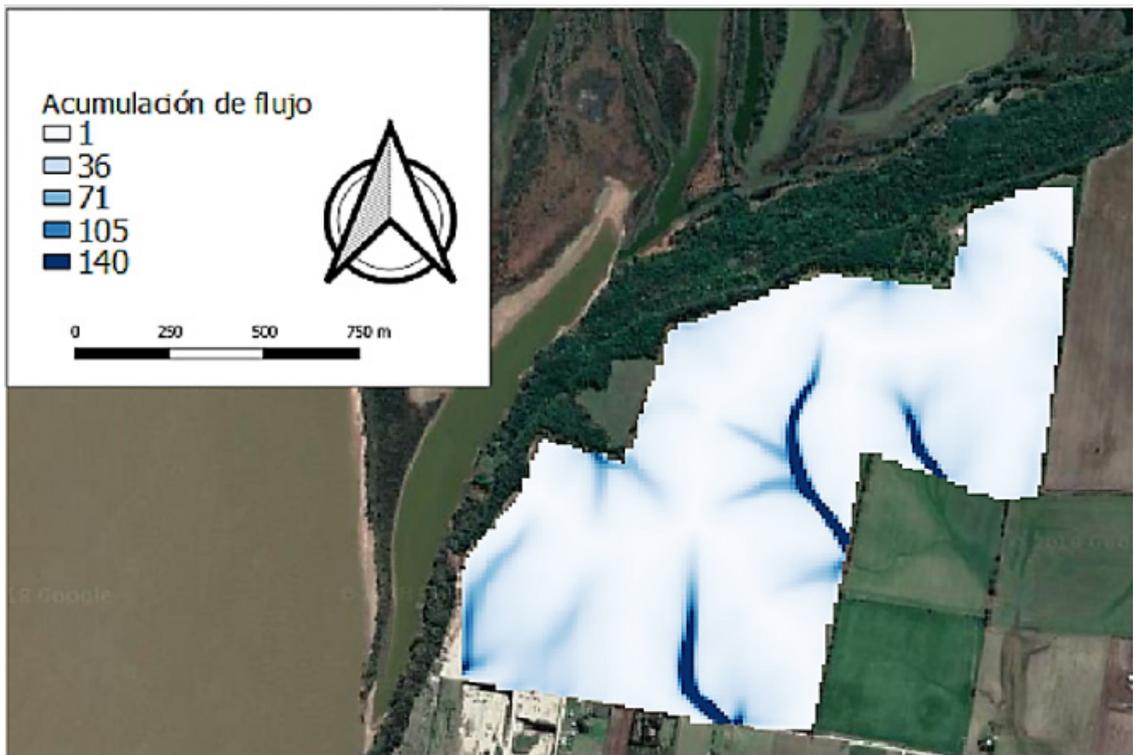


Figura 10. Mapa de acumulación de flujo

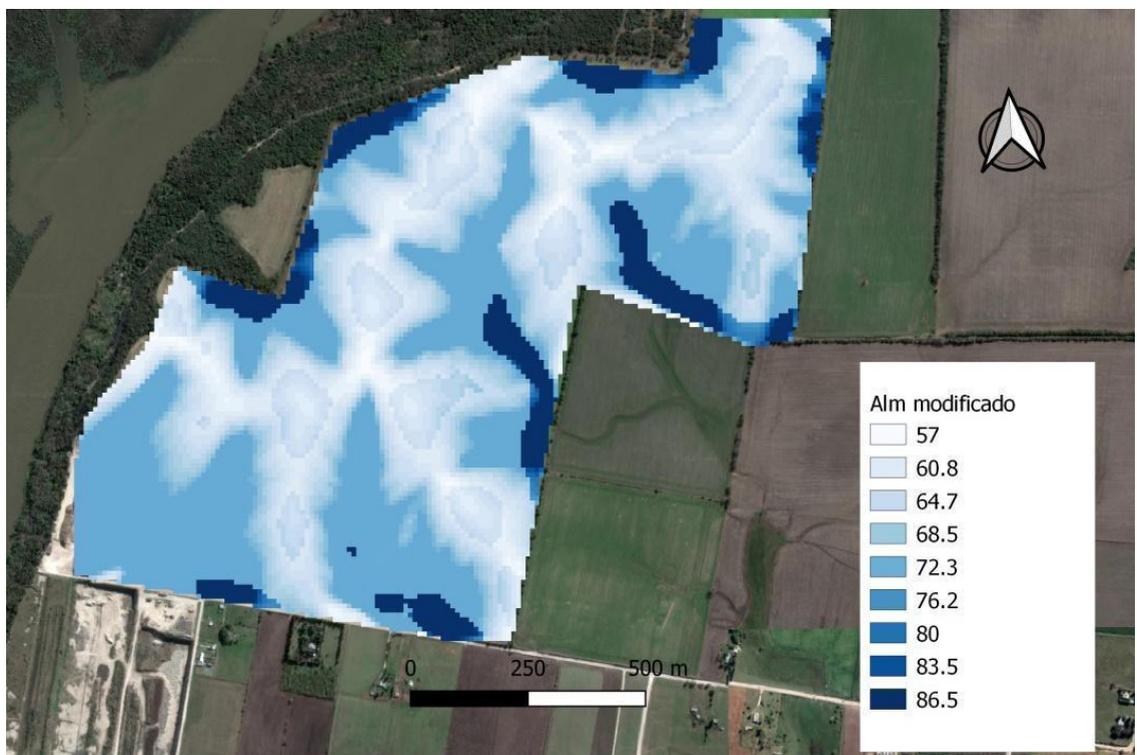


Figura 11. Almacenaje modificado teniendo en cuenta el escurrimiento y el mapa de acumulación de flujo para el período 31/10/17 al 09/11/17

suelo se incrementa en los lugares donde hay más acumulación de flujo y no hay cambios importantes en áreas de loma.

El almacenaje de agua en el horizonte Ap, en correspondencia con el mapa de acumulación de flujo, pone en evidencia que la distribución espacial de la humedad de suelo sería diferente de la que resulta de aplicar el balance convencional.

En condiciones húmedas intermedias -como ésta- el escurrimiento favorece la acumulación de mayor contenido de agua en el bajo y en sectores de la media loma próximos al bajo. Si bien en el bajo tiene mayor capacidad de admitir una cantidad de agua hasta llegar a capacidad de campo, como indica el CI de cada clase, es factible que se alcance CC y lo propio ocurra con secciones de media loma.

Puesto que toda herramienta de simulación debe ser evaluada en su capacidad predictiva y precisión antes de ser usada, y al no contar con datos de humedad de suelo suficiente obtenidos a campo para verificar los resultados del modelo de balance localizado, se deja de manifiesto la necesidad de corroborar las estimaciones del balance a partir de datos observados de humedad.

CONCLUSIONES

Se realizó una adaptación al método de balance hidrológico que utiliza la Oficina de Riesgos Agropecuarios a los efectos de estimar las entradas, salidas y la acumulación de agua del suelo para un período de 4 meses en 2017 y 8 en 2018. El balance hidrológico, que computa la dinámica del agua en períodos de diez días, tiene la particularidad de diferenciar las características topográficas -como loma, media loma y bajo- con sus respectivas constantes hídricas, de un predio agrícola.

La integración de un mapa de acumulación de flujo con el escurrimiento superficial da cuenta de los cambios de la humedad de suelo que presentan especialmente los sectores más bajos del predio, variación que pasaría desapercibida por el balance de agua utilizado habitualmente.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.G.; L.S. Pereira; D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1998.
- Basualdo, A. y S. Occhiuzzi, 2005. Balance hídrico aplicado a la elaboración de mapas de riesgo agroclimático. Actas del Congremet IX en CD. CONGREGMET IX. Buenos Aires, Argentina. 3-7 Octubre 2005.
- Castro Franco, M., Peralta, N., Domenech, M., & Costa, J. 2012. Relación cuantitativa entre atributos topográficos y rendimiento. Inta.Gob.Ar, 1–8. http://inta.gob.ar/documentos/relacion-cuantitativa-entre-atributos-topograficos-rendimiento/at_multi_download/file/INTA-Relación atributos topográficos y rendimiento.pdf (Consultada el 4/03/2019).
- Dyer, J. M., 2009. Assessing topographic patterns in moisture use and stress using a water balance approach. *Landscape Ecology*, 24(3), 391-403.
- ESRI, 2014. Cómo funciona Acumulación de flujo. <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-accumulation-works.htm> (Consultada el 12/03/ 2019).
- Fernández Long, M. E., Spescha, L., Barnatán, I., & Murphy, G., 2012. Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). *Rev. Agronom. Ambiente*, 32(1-2), 31-47.
- Flores, H. E., & Ruiz, J. A., 1998. Estimación de la humedad del suelo para maíz de temporal mediante un balance hídrico. *Terra Latinoamericana*, 16(3).
- Google Earth Pro, 2018. Imagen del área de estudio. Recuperado de: Google EarthPro el 10/08/2018.
- INTA y Gobierno de Entre Ríos, 1991. Plan Mapa De Suelos. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Diamante, Provincia de Entre Ríos. Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 9, (ISSN 0325 9099), 258 pp.
- Kravchenko, A.N.; Bullock, D.G., 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92(1): 75-83.
- Kravchenko, A.N.; Bullock, D.G. 2002. Spatial variability of soybean quality data as a function of field topography. *Crop Science*. 42(3): 804-815.
- Kravchenko, A.N., Robertson, G.P., Thelen, K.D., Harwood, R.R., 2005. Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. *Agron. J.* 97(2): 514-523
- Leiva Gutiérrez, N. 2012. Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte deposicional del municipio de Villavicencio (Disertación Doctoral, Universidad Nacional de Colombia).
- Mahmoud, S. H., Mohammad, F. S., & Alazba, A. A., 2014. Determination of potential runoff coefficient for Al-Baha Region, Saudi Arabia using GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(5), 2041-2057.

- Olaya, V., 2004. Hidrología computacional y modelos digitales del terreno. Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico, 391 pp.
- Parker, A. J., 1982. The topographic relative moisture index: an approach to soil-moisture assessment in mountain terrain. *Physical Geography*, 3(2), 160-168.
- Picotti, E. 2010. Perfiles hídricos de suelos de la provincia de Entre Ríos. Su relación con la textura. Pp 32 Tesis de grado FCA UNER, Oro Verde, Entre Ríos.
- Qiu, Y., Fu, B., Wang, J., & Chen, L., 2001. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of hydrology*, 240 (3-4), 243-263.
- Schaake, J. C., Koren, V. I., Duan, Q. Y., Mitchell, K., & Chen, F., 1996. Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D3), 7461-7475.
- Teuling, A. J., Uijlenhoet, R., Hupet, F., Van Loon, E. E., & Troch, P. A., 2006. Estimating spatial mean root-zone soil moisture from point-scale observations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(4), 1447-1485.
- USDA-SCS, 1968. A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watershed. Scs. Pp 149.
- Wang, Q. J., Pagano, T. C., Zhou, S. L., Hapuarachchi, H. A. P., Zhang, L., & Robertson, D. E., 2011. Monthly versus daily water balance models in simulating monthly runoff. *Journal of hydrology*, 404(3-4), 166-175.
- Weiss A., 2001. Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA (Vol. 200).

Características del índice de temperatura y humedad modificado por viento y radiación en Entre Ríos, Argentina

Rondán, G.A.; Michelin, C.I.; Brizuela, A.B.; Maltese, N.; Kemerer, A. y Aguirre, C.

RESUMEN

Entre Ríos, Argentina, posee un clima templado húmedo con verano caluroso. Dadas estas condiciones climáticas es frecuente que las vacas lecheras experimenten estrés calórico durante el verano, afectando tanto su fisiología como productividad. El índice de temperatura-humedad (ITH), utilizado como indicador del nivel de estrés, no contempla el efecto de la radiación solar ni del viento. En este trabajo se compara el ITH con el índice modificado por radiación y viento (ITH_{vr}) y se lo caracteriza en cuatro localidades representativas de dos cuencas lecheras. La escala de resolución del índice fue horaria, diferenciando condiciones diurnas y nocturnas y se obtuvieron las respectivas estadísticas descriptivas. En el 70% de los casos o más, el ITH_{vr} superó el umbral crítico de 72 en las cuatro localidades indicando que la probabilidad de ocurrencia de condiciones de estrés durante un día es alta. Como se esperaba, durante el día, el ITH_{vr} supera el umbral en mayor proporción que durante la noche. Además, durante el día, en situaciones de disconfort, el ITH produce valores menores que ITH_{vr} mientras que, por debajo del umbral, la situación se invierte. Los resultados muestran la importancia de considerar el efecto de radiación y viento en la construcción del ITH_{vr} , mejorando la sensibilidad respecto de ITH, a partir de datos disponibles a escala horaria. Además, reafirman la utilidad de estos en orden a promover prácticas de manejo tendientes a mitigar el estrés calórico en el rodeo.

Palabras clave: bienestar animal; ganado lechero; índice de estrés.

Rondán, G.A.; Michelin, C.I.; Brizuela, A.B.; Maltese, N.; Kemerer, A. and Aguirre, C., 2019. Characteristic of the temperature and humidity index modified by wind and radiation in Entre Ríos, Argentina. RADA X: 49-57

SUMMARY

The Entre Ríos province has a humid temperate climate with a hot summer. These features cause heat stress on dairy cows, mainly in the summer months, affecting both their physiology and productivity. The Temperature Humidity Index (THI), used to indicate the degree of stress, does not take into account the effect of solar radiation or wind speed. In this paper, the conventional THI was contrasted with an index modified by solar radiation and wind speed (THI_{vr}), in

order to obtain specific information in four representative locations in two dairy regions. The hourly value has been obtained, day and night conditions were differentiated, and descriptive statistics were obtained. In 70% or more of the cases, the ITH_{vr} exceeded the threshold of 72 in the four localities indicating that the probability of occurrence of stress conditions during a day is high. As expected, during the day, the ITH_{vr} exceeds the threshold in greater proportion than during the night. Also, during the day, in situations of discomfort, the ITH tends to underestimate its value with respect to the ITH_{vr} , while, below the threshold, the situation is reversed. The results show the importance of considering the effect of radiation and wind on the construction of the ITH_{vr} , improving the sensitivity with respect to ITH , based on data available at time scale. In addition, they reaffirm their usefulness in order to promote management practices aimed at mitigating heat stress in the rodeo.

Key words: animal welfare; dairy cattle; stress index.

Rondán, G.A.; Brizuela, A.B.; Aguirre, C. y Maltese, N.: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. Michelin, C.I.: Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. Kemerer, A.: Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Correspondencia a: guillermo.rondan@fca.uner.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La provincia de Entre Ríos se caracteriza por contar con una actividad lechera importante, con un aporte histórico del 3% al 4% de la producción nacional de leche, integrando el grupo de provincias productoras junto a Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba y La Pampa (Jaureguiberry y Barrera, 2017). Según datos provinciales disponibles en el año 2017, Entre Ríos tuvo una producción anual de 285 millones de litros aportados por 370 tambos (Moreira, 2018).

La provincia cuenta con dos cuencas lecheras (Figura 1). La cuenca "A" que concentra más del 60% de los tambos de la provincia y que comprende a los departamentos Paraná, La Paz, Diamante, Victoria y Nogoyá; y la cuenca "B" que incluye a los tambos situados en los departamentos Gualeguaychú, Uruguay, Colón y Rosario del Tala (López *et al.*, 2015).

Los sistemas productivos en su mayoría se basan en dietas pastoriles con suplementación principalmente de forrajes conservados y alimentos concentrados (Jaureguiberry y Barrera, 2017). En estos sistemas, los animales se encuentran gran parte del tiempo expuestos a condiciones ambientales adversas como altas temperaturas y humedad del aire, que afectan el equilibrio térmico, la productividad y la eficiencia reproductiva, tanto

en el ganado de carne como en el lechero (Arias y Mader, 2010).

Principalmente durante el periodo estival, el efecto combinado de elevadas temperaturas, humedad relativa y radiación solar, dependiendo de su intensidad, duración y tiempo de exposición, causan estrés calórico en los animales generando condiciones de discomfort, afectando el nivel de producción (Gallardo y Valtorta, 2011; Armstrong, 1994) e incluso, causando la muerte de los animales cuando ocurren olas de calor intensas y persistentes.

El estrés por calor es relevante aún en regiones con clima templado por cuanto la producción de leche resulta afectada si los animales están bajo condiciones de alta temperatura y humedad relativa durante períodos prolongados. Ouellet *et al.*, 2019 y Amamou *et al.*, 2019, reportaron efectos negativos del estrés por calor sobre vacas lecheras Holstein, disminuyendo su producción de leche, grasas y proteínas. Heinicke *et al.*, 2019, estudiando un rodeo de la raza Holstein-Frisia, encontraron que el nivel de actividad de los animales se ve reducido cuando acumulan una carga térmica adicional durante tres días consecutivos.

Con el objetivo de valorar el efecto de las variables ambientales sobre el ganado lechero se han desarrollado diversos índices de estrés. Uno de los más ampliamente utilizados es el Índice de



Figura 1. Cuencas lecheras A y B de Entre Ríos. Se indican además los cuatro sitios de estudio.

Temperatura y Humedad (ITH) desarrollado por Thom, 1959, y modificado por Valtorta y Gallardo, 1996, el cual permite cuantificar el grado de disconfort del rodeo. Trabajos realizados en la provincia de Entre Ríos utilizando el ITH, mostraron que las condiciones de estrés calórico, son frecuentes y de larga duración (López *et al.*, 2015) y dieron lugar a un sistema de pronóstico a 4 días (Kemerer *et al.*, 2017) dirigido a los productores de la cuenca lechera A.

Sin embargo, el ITH no considera otras variables meteorológicas como radiación y velocidad de viento, las cuales tienen un rol importante en los mecanismos de regulación de la carga calórica interna de los animales, afectando su equilibrio térmico. Davis y Mader, 2003, señalan que con la inclusión de estas dos variables ambientales en el ITH se mejoraría en gran medida la aplicabilidad del LWSI (Livestock Weather Safety Index) en diferentes condiciones ambientales y proponen un ajuste para lograr mayor precisión en la estimación de estrés por calor. En este sentido, Mader *et al.*, 2005; 2006, reportaron un nuevo índice, el ITH ajustado por velocidad de viento y radiación solar (ITH_{vr}), que permitió reflejar mejor los eventos de

disconfort para los animales bajo sistema de engorde a corral en EEUU.

Teniendo en cuenta que el estrés calórico afecta la producción, resulta relevante conocer las características del ITH_{vr} en ambientes propios de las cuencas lecheras A y B de Entre Ríos y su posible aplicación en los sistemas productivos locales. El objetivo del presente trabajo fue analizar el comportamiento del ITH_{vr} mensual y horario, en el periodo diciembre-febrero de las campañas 2015/2016 y 2016/2017 y establecer sus diferencias con el ITH para cuatro localidades de Entre Ríos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron cuatro localidades de Entre Ríos las cuales, además de ser representativas de ambas cuencas lecheras, contaban con un conjunto de datos meteorológicos completo del periodo en estudio y con frecuencia horaria proveniente de estaciones meteorológicas automáticas (EMA). Las localidades de Paraná ($31^{\circ}44'50''$ S, $60^{\circ}32'21''$ O) y Costa Grande ($31^{\circ}08'25''$ S; $60^{\circ}27'36''$ O) correspondientes a los departamentos Paraná y Diamante, incluidas en la cuenca lechera A, y las localidades de Gualeguaychú ($33^{\circ}00'44''$ S, $58^{\circ}36'54''$ O) y General Galarza ($32^{\circ}43'20''$ S, $59^{\circ}24'33''$ O) pertenecientes a los departamentos Gualeguaychú y Gualeguay respectivamente, se consideran representativas de la cuenca B, en el caso de Galarza por su proximidad. La ubicación geográfica de las localidades estudiadas puede observarse en la Figura 1.

Las variables meteorológicas utilizadas en el análisis fueron: temperatura del aire T ($^{\circ}$ C), humedad relativa HR (%), velocidad del viento VV (m/s) a los dos metros de altura y radiación solar RS (W/m^2). Los datos fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional, el INTA y la Facultad de Ciencias Agropecuarias. Particularmente para diciembre de 2015, los datos de la EEA INTA Paraná se completaron con registros de la EMA Crespo ($30^{\circ}04'14''$ S, $60^{\circ}14'52''$ O).

A partir de estos datos se calculó para cada hora el ITH propuesto por Valtorta y Gallardo, 1996, (Ecuación 1) y el ITH_{vr} planteado por Mader *et al.*, 2006, (Ecuación 2), en ambos casos para los periodos estivales del 1/12/2015 al 29/02/2016 y del 1/12/2016 al 28/02/2017.

$$ITH = (1,8 T + 32) - [(0,55 - 0,55 \frac{HR}{100})(1,8 T - 26)] \quad (1)$$

Donde: **T** corresponde al valor de temperatura ($^{\circ}$ C) y **HR** es la humedad relativa (%).

$$ITH_{vr}=4,51+ITH_0-(1,992 VV)+(0,0068 RS) \quad (2)$$

Donde: **ITH₀** es el valor de ITH obtenido a partir de la Ecuación 3, utilizada en Mader *et al.*, 2006; **VV** es la velocidad del viento (m/s) y **RS** es la radiación solar (W/m²)

$$ITH_0=(0,8 T)+\left(\frac{HB}{100}\right)(T-14,4)+ 46,4 \quad (3)$$

Se calcularon los estadísticos descriptivos del índice ITH_{vr}: mensuales, diurnos y nocturnos -discriminando entre registros de 'día' (RS ≥ 1W/m²) o 'noche' (RS < 1W/m²)- y los horarios. Además, se calcularon las medidas estadísticas de la diferencia (ITH_{vr} – ITH) sobre la base de subgrupos por mes y hora del día.

Se obtuvieron diagramas de boxplot para realizar una interpretación visual del comportamiento de los valores horarios de ITH_{vr} vs. ITH en cuanto a dispersión y simetría. Además, se determinó la asociación lineal entre los mismos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estadísticos de las variables temperatura, humedad relativa, viento y radiación solar de las 4 localidades consideradas se presentan en la Tabla 1, a-d. Los datos corresponden a los registros horarios de las cuatro localidades de Entre Ríos y de los períodos estivales 2015-2016 y 2016-2017. Puede observarse que los promedios y los valores extremos de temperatura presentan diferencias mínimas para las cuatro localidades. Algo similar ocurre con la radiación solar, salvo en Costa Grande, que indica una media más baja. La humedad relativa media es mayor en Galarza y el viento medio es superior en Gualaguaychú.

El desvío estándar (DE) de la temperatura fue similar para las cuatro localidades evaluadas. Galarza tuvo el mayor DE de humedad relativa y Gualaguaychú el menor DE. Aunque el DE de la velocidad de viento fue similar entre las localidades evaluadas, Costa Grande tuvo el mayor DE y Galarza la menor variación. El DE de la radiación

Tabla 1. Estadísticas de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento (VV>0) y radiación solar (RS>0) de las cuatro localidades analizadas de Entre Ríos.

a) Paraná

Variable	Media	Desvío estándar	Máximo	Mínimo
Temperatura (°C)	24,8	4,5	37,7	11,2
Humedad Relativa (%)	73,2	19,5	100,0	16,7
Velocidad del viento (m/s)	2,2	1,3	10,8	0,1
Radiación solar (W/m ²)	519,8	416,4	1463,1	0,2

b) Costa Grande

Variable	Media	Desvío estándar	Máximo	Mínimo
Temperatura (°C)	24,6	4,9	37,9	8,7
Humedad Relativa (%)	77,7	17,3	99,0	25,2
Velocidad del viento (m/s)	2,4	1,9	14,5	0,1
Radiación solar (W/m ²)	399,8	316,5	1007,5	0,2

c) G. Galarza

Variable	Media	Desvío estándar	Máximo	Mínimo
Temperatura (°C)	24,4	5,1	38,2	10,2
Humedad Relativa (%)	84,1	22,5	100,0	21,9
Velocidad del viento (m/s)	1,8	1,2	7,7	0,1
Radiación solar (W/m ²)	494,1	361,2	1186,1	2,8

d) Gualaguaychú

Variable	Media	Desvío estándar	Máximo	Mínimo
Temperatura (°C)	24,7	4,8	38,7	9,5
Humedad Relativa (%)	70,9	14,4	100,0	18,0
Velocidad del viento (m/s)	3,1	1,7	12,8	0,5
Radiación solar (W/m ²)	497,8	370,9	1250,0	2,8

solar entre localidades varió entre 316 y 416 W/m²), correspondientes a Costa Grande y Paraná, respectivamente.

En la Tabla 2, a-d, se muestran los estadísticos descriptivos para ITH e ITH_{vr}. Los estadísticos correspondientes al ITH e ITH_{vr} mensuales y diferenciados en 'día' y 'noche' para las localidades de Paraná y Gualeguaychú, una de cada cuenca lechera, reflejan valores medios superiores del ITH_{vr} a los de ITH. Esta condición es válida tanto para los datos sin diferenciar como para los correspondientes a la categoría de 'día' o de 'noche' con excepción de ITH_{vr} Noche que, en

el caso de Gualeguaychú, tiene valores levemente inferiores.

El comportamiento mensual muestra que en Paraná tanto ITH como ITH_{vr} promedio superan el umbral de estrés, ITH_{vr} ≥ 72 (tomando el umbral de discomfort propuesto para ITH por Johnson *et al.*, 1961) en los tres meses, algo similar ocurre en Gualeguaychú, aunque en diciembre es levemente inferior. En cambio, para el caso de 'noche' los valores promedios de ambos índices no superan el valor umbral de 72.

Tabla 2. Estadísticas de los índices ITH e ITH_{vr} de 2 localidades de Entre Ríos. Donde DE: corresponde a desvío estándar.

a) ITH Paraná

	ITH			ITH Día			ITH Noche		
	Dic	Ene	Feb	Dic	Ene	Feb	Dic	Ene	Feb
N° de horas	1463	1488	1368	870	902	753	593	586	615
Media	72,2	74,0	73,7	74,3	76,0	75,9	69,2	70,8	70,9
DE	5,5	5,3	5,9	5,2	4,9	5,6	4,6	4,1	5,0
Mínimo	53	56	56	54	56	56	53	57	57
Máximo	84	86	86	84	86	86	80	79	83
Rango	31	30	30	30	30	30	27	22	26

b) ITH Gualeguaychú

	ITH			ITH Día			ITH Noche		
	Dic	Ene	Feb	Dic	Ene	Feb	Dic	Ene	Feb
N° de horas	1484	1488	1368	857	869	751	627	619	617
Media	71,3	73,8	73,5	73,3	75,6	75,3	68,8	71,3	71,3
DE	6,2	5,7	5,7	5,9	5,7	5,7	5,5	4,8	4,8
Mínimo	50	53	54	50	53	54	50	55	56
Máximo	85	88	86	85	88	86	84	83	83
Rango	35	35	32	35	35	32	34	28	27

c) ITH_{vr} Paraná

	ITH _{vr}			ITH _{vr} Día			ITH _{vr} Noche		
	Dic	Ene	Feb	Dic	Ene	Feb	Dic	Ene	Feb
N° de horas	1463	1488	1368	870	902	753	593	586	615
Media	75,6	76,1	75,9	78,6	79,0	79,3	71,3	71,5	71,8
DE	7,6	7,1	8,1	7,3	7,0	8,1	5,7	4,3	5,8
Mínimo	51	57	48	52	57	56	51	58	48
Máximo	95	94	94	95	94	94	84	82	84
Rango	44	37	46	43	37	38	33	24	36

d) ITH_{vr} Gualeguaychú

	ITH _{vr}			ITH _{vr} Día			ITH _{vr} Noche		
	Dic	Ene	Feb	Dic	Ene	Feb	Dic	Ene	Feb
N° de horas	1484	1488	1368	857	869	751	627	619	617
Media	71,6	74,2	74,3	73,9	76,5	76,9	68,5	71,0	71,1
DE	7,2	5,7	7,4	7,0	6,9	7,5	6,1	5,0	5,8
Mínimo	50	50	51	50	50	51	50	53	51
Máximo	92	93	93	92	93	93	86	84	84
Rango	42	43	42	42	43	42	36	31	33

Al comparar el ITH_{vr} medio se observa que el valor es más alto en Paraná. El efecto de mayor radiación incrementa el índice en Paraná y el viento mejora las condiciones de confort en Gualeguaychú. Estos efectos de las condiciones ambientales, señaladas en la Tabla 2, a-d, son expresados por el ITH_{vr} .

Para un análisis detallado se obtuvieron los diagramas múltiples de caja y bigote (box-plot) del ITH_{vr} horario de las cuatro estaciones (Figura 2). Este procedimiento representa gráficamente, para las 24 horas del día, los estadísticos: -mínimo, máximo, cuartil inferior y superior, mediana, media y valores atípicos-. Prácticamente en el 70% de los casos o más, el ITH_{vr} supera el umbral de 72 en las cuatro localidades. Esto ocurre principalmente durante el día, entre las 8-9 h y las 21-22 h, lo que significa que es alta la probabilidad de ocurrencia

de condiciones de estrés durante un día estival. Especialmente entre las 13 h y las 15 h período en el cual ocurren con más frecuencia las condiciones de estrés moderado o severo.

La incorporación de viento y radiación, en el ITH_{vr} de las gráficas anteriores, produce mayor dispersión y por lo tanto hay mayor cantidad de valores atípicos. El viento favorece los menores valores de ITH_{vr} como se evidencia en Gualeguaychú.

Otro aspecto de interés para caracterizar el ITH_{vr} es compararlo con el ITH convencional, examinar la diferencia y el grado de asociación entre ambos. Para cada localidad se calculó la diferencia $ITH_{vr} - ITH$ de los valores horarios y las estadísticas descriptivas. Los resultados para el mes de enero en las 4 localidades se muestran en la Tabla 3. Se destaca que en Gualeguaychú el promedio de la

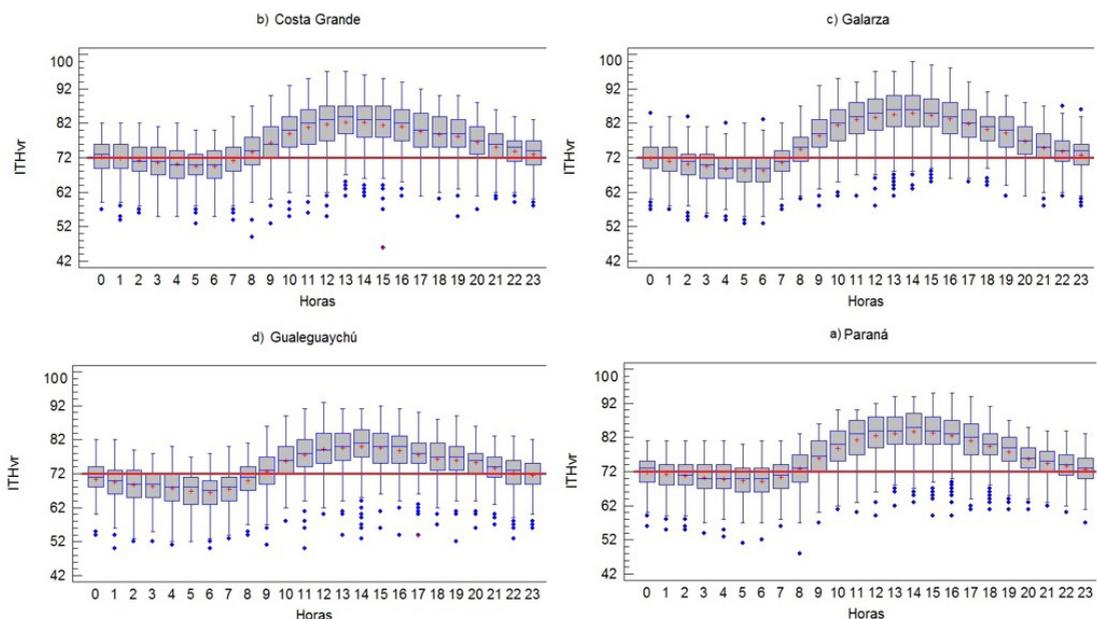


Figura 2. Valores de ITH_{vr} en distintas horas del día para los meses diciembre, enero y febrero (campañas 2015/2016 - 2016/2017).

Tabla 3. Estadísticas de la diferencia ($ITH_{vr} - ITH$) de enero en los cuatro puntos de estudio.

Estadísticos (enero)	Paraná	Costa Grande	G. Galarza	Gualeguaychú
N° de horas	1488	1488	1415	1488
Media	2,1	2,3	2,8	0,4
Mediana	2	3	3	1
Desviación Estándar	3,1	3,3	3,3	3,6
Mínimo	-12	-15	-8	-17
Máximo	11	10	10	12

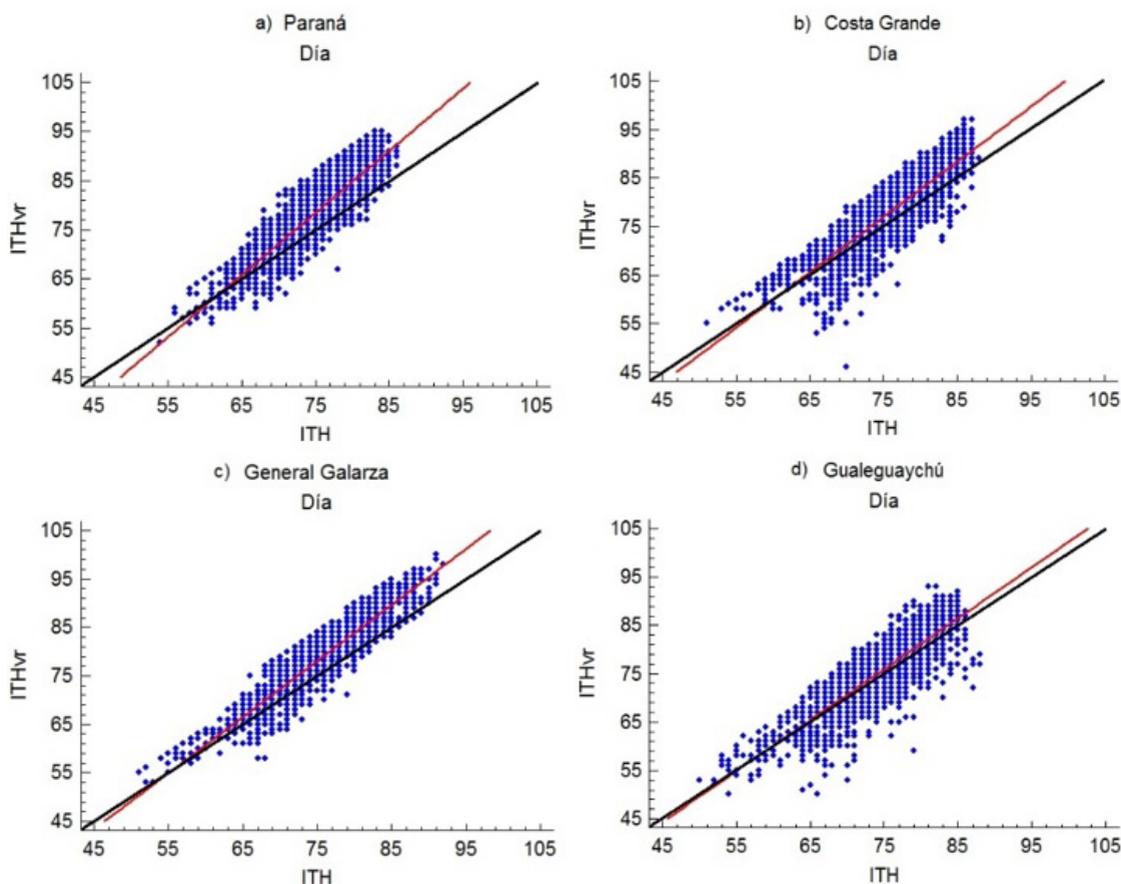


Figura 3. Diagramas de dispersión de ITH_{vr} e ITH de 'día' y ajuste lineal (campañas 2015/2016 - 2016/2017). La línea roja representa el ajuste lineal de los puntos y la línea negra la relación 1:1.

diferencia es el más bajo y también la mediana es más baja. Esto muestra que la modificación del ITH por viento y radiación en esta localidad no cambia el valor medio significativamente. Pero la dispersión es mayor dando lugar a un mínimo de -17 unidades y un máximo de 12; en valor absoluto superiores a los de las restantes localidades.

Mediante un ajuste lineal se analizó la relación entre ambos índices. Como se espera la asociación entre los índices, en cada localidad, es fuerte con más del 60% de varianza explicada. En razón que ambos indicadores incluyen las variables temperatura y humedad relativa la asociación entre ellos es estrecha. Por otro lado, la radiación solar está relacionada con la temperatura y el viento es más independiente de las restantes. Por eso cuando el viento es suave o moderado y las demás variables mantienen su valor, el índice disminuye representando una reducción en el desconfort animal. El efecto principal de la velocidad del viento

es la remoción del aire próximo al animal, evitando la saturación de la capa límite y favoreciendo de esta manera los procesos evaporativos, que constituyen la vía principal de disipación de calor a altas temperaturas (Gallardo y Valtorta, 2011).

En los gráficos de ITH_{vr} vs. ITH se puede observar que, durante el día, en situaciones de desconfort el ITH tiende a subestimar su valor respecto al ITH_{vr} mientras que por debajo del umbral la situación se invierte (Figura 3, a-d). En Paraná y Galarza ese apartamiento es superior incluso para valores de ITH mayores a 65.

Por la noche en Paraná y Gualeguaychú el comportamiento es similar para todo el rango analizado, observando una relación muy próxima a 1:1. En Costa Grande y en Galarza en cambio, durante todo el rango el ITH_{vr} predomina sobre el ITH (Figura 4, a-d).

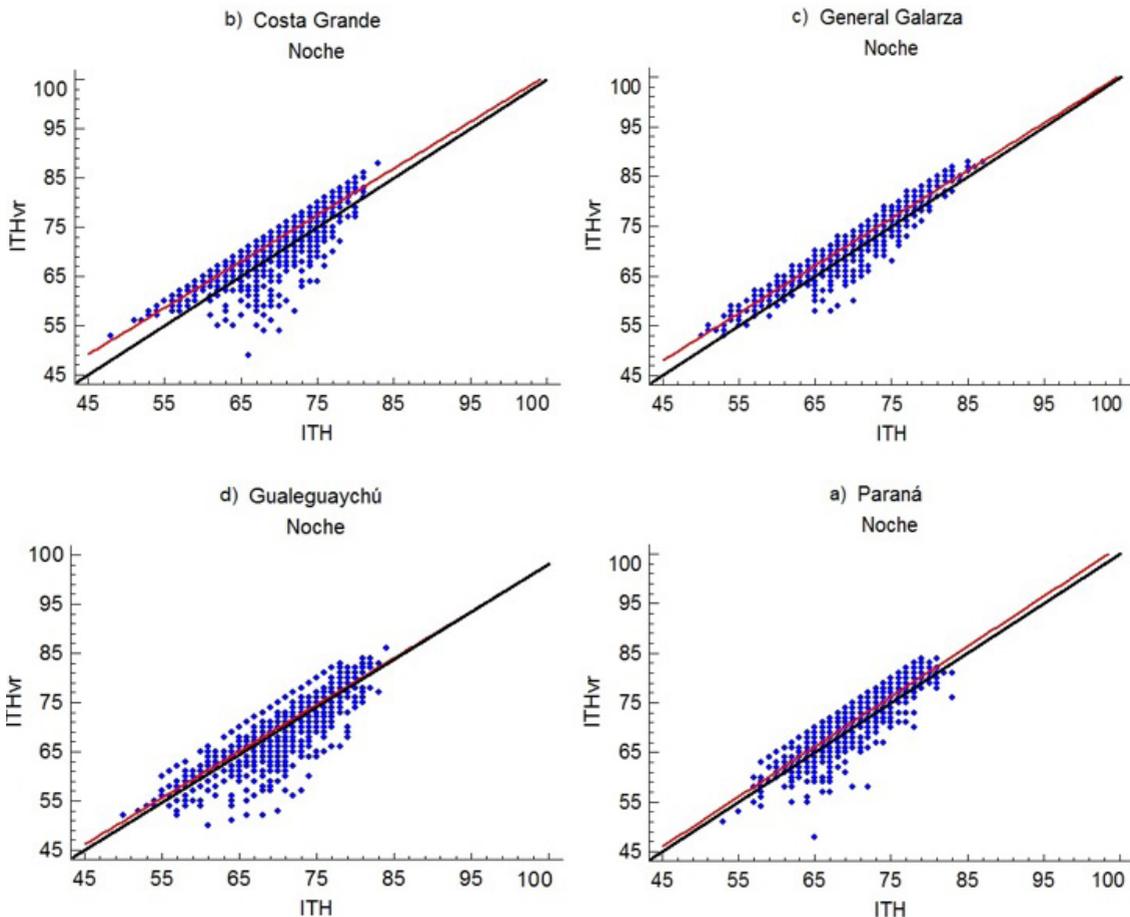


Figura 4. Diagramas de dispersión de ITH_{vr} e ITH de 'noche' y ajuste lineal (campañas 2015/2016 - 2016/2017). La línea roja representa el ajuste lineal de los puntos y la línea negra la relación 1:1.

CONCLUSIONES

El ITH_{vr} fue caracterizado para las cuatro localidades de Entre Ríos, destacando que el uso de las EMA permitió generar información más detallada de las variables de interés, a partir de datos en escala horaria o incluso menor.

El análisis del ITH_{vr} -ajustado por viento y radiación- permitió confirmar que en estos meses se presentan las condiciones ambientales de estrés muy desfavorables. Prácticamente en el 70% de los casos o más, el ITH_{vr} supera el umbral de 72 en las cuatro localidades lo que indica que la probabilidad de ocurrencia de condiciones de estrés durante un día estival es alta.

Se comprueba que, durante el día, el valor de ITH_{vr} supera el umbral en mayor proporción que

durante la noche. Además, durante el día, en situaciones de desconfort, el ITH tiende a producir valores más bajos que ITH_{vr} mientras que, por debajo del umbral, la situación se invierte.

El ITH_{vr} estimado a partir de los datos proporcionados por las EMA se debe considerar como una herramienta más sensible para la toma de decisiones ante situaciones de estrés calórico, ya que cubre las falencias del ITH derivadas del hecho de no considerar velocidad del viento y radiación.

Estos resultados reafirman la utilidad de los índices de desconfort animal en orden a promover prácticas de manejo de rodeos que tiendan a mitigar el efecto del estrés en la producción lechera.

REFERENCIAS

- Amamou, H., Beckers, Y., Mahouachi, M., & Hammami, H. 2019. Thermotolerance indicators related to production and physiological responses to heat stress of holstein cows. *Journal of thermal biology*, 82, 90-98.
- Arias, R. y Mader T. 2010. Determination of potential risk of heat stress of cattle in four locations of Central and Southern Chile. *Arch Med Vet* 42, 33-39.
- Armstrong, D.V. 1994. Heat stress interaction with shade and cooling. *J. Dairy Sci.* 77:2044-2049.
- Davis, S. and Mader, T. 2003. Adjustments for Wind Speed and Solar Radiation to the Temperature-Humidity Index. *Nebraska Beef Cattle Reports*. 224. <https://digitalcommons.unl.edu/animalscinbcr/224>. (Consultado el 02/08/2018)
- Gallardo, M. y Valtorta S. 2011. Producción y bienestar animal: estrés por calor en ganado lechero: impactos y mitigación. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. 128 p.
- Gaughan, J.; Mader, T.; Holt, S.; and Lisle, A. 2008. A New Heat Load Index for Feedlot Cattle. *Faculty Papers and Publications in Animal Science*. 613.
- Heinicke, J., Ibscher, S., Belik, V., & Amon, T. 2019. Cow individual activity response to the accumulation of heat load duration. *Journal of thermal biology*, 82, 23-32.
- Jaureguiberry, L. y Barrera, M. 2017. Consejo Federal de Inversiones. Programa de Desarrollo Ambiental, de Infraestructura y Productivo "Laboratorio Regional de Leche". Informe Final. <http://biblioteca.cfi.org.ar/wp-content/uploads/sites/2/2018/02/lecheinforme-final-cfi.pdf> (Consultado el 09/08/2019).
- Johnson, H.D., Kibler H.H., Ragsdale A.C., Berry I.L. and Shanklin 1961 M.D. Role of heat tolerance and production level in response of lactating Holsteins to various temperature-humidity conditions. *J. Dairy Sci.* 44:1191.
- Kemerer, A.; Rondán; G.; Brizuela, A.; López, G.; Michelin, C.I.; Madikian, F. 2017. Verificación de pronóstico de ITH horario en cuatro localidades de Entre Ríos, Argentina. VII Simposio Internacional de Climatología. Petrópolis, R.J., Brasil.
- López, G.; Brizuela, A.; Rondán, G.; Lissaso, C.; Kemerer, K.; de los Santos, M. 2015. Determinación del índice de temperatura y humedad (ITH) como indicador de estrés calórico, para vacas lecheras del departamento Nogoyá, Entre Ríos. IX Reunión de Comunicaciones Científicas y VII Reunión de Extensión de la FCA-UNER. Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.
- Mader, T; Davis, M y Gaughan, J. 2005. Adjustments for Wind Speed and Solar Radiation to the Temperature-Humidity Index. 16th Conference on Biometeorology and Aerobiology.
- Mader, T; Davis M; Brown-Bland, T. 2006. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *J. Animal Science* 84, 712-719.
- Moreira, M. 2018. Información sobre producción lechera de Entre Ríos, cierre anual 2017. Área Lechería, Dirección de Ganadería y Pesca Subsecretaría de Producción Primaria, Secretaría de Producción. <http://www.entrerios.gov.ar/minpro> (consultado 09/08/2019)
- Ouellet, V., Cabrera, V. E., Fadul-Pacheco, L., & Charbonneau, É. 2019. The relationship between the number of consecutive days with heat stress and milk production of Holstein dairy cows raised in a humid continental climate. *Journal of Dairy Science*.
- Saravia, C y Cruz, G. 2003. Influencia del ambiente atmosférico en la adaptación y producción animal. Uruguay, Fac. Agr. Nota Técnica N° 50. 36p.
- Thom EC. 1959. The discomfort index. *Weatherwise* 12, 57-59.
- Valtorta, S.; Gallardo, M. 1996. El estrés por calor en producción lechera. En INTA. *Misceláneas*. 81:173-185.

Conductores ambientales de la productividad de buffelgrass en el Chaco Arido de La Rioja (Argentina)

Luna Toledo, E. S. ; Figuerola, P. I. y Sancho, A. R.

RESUMEN

El Chaco Árido se caracteriza por la producción ganadera extensiva, con prácticas de manejo inadecuadas que aumentaron la degradación. Debido a esto, la superficie de pasturas exóticas, principalmente buffelgrass, aumentó considerablemente. El objetivo de este trabajo fue evaluar los conductores ambientales de la PPNA de buffelgrass (temperaturas, precipitación y evapotranspiración real -ETr-), durante dos periodos de crecimiento: 2015-2016 y 2016-2017. Ambos periodos presentaron características térmicas similares, sin embargo, existió un fuerte contraste en las precipitaciones: el periodo 2015-2016 tuvo valores extraordinarios (~670 mm) y es denominado "año húmedo". Este periodo estuvo asociado a un evento de "El Niño" intenso. El periodo 2016-2017 tuvo precipitaciones acumuladas (PPac) menores a la normal (~380 mm) y es denominado "año seco". La ETr acumulada (ETRac) fue de 342 y 251 mm, mientras que la PPNA fue de 4046 y 3036 kg ha⁻¹ para el año húmedo y seco respectivamente. La comparación de índices de eficiencia entre año húmedo y seco fue: 1) PPNA/PPac: 7,97 vs 6,01 kg ha⁻¹ de forraje por mm de lluvia 2) PPNA/ETRac: 11,83 vs 12,09 kg ha⁻¹ de forraje por mm de evapotranspiración y 3) ETRac/PPac: 51% vs 66% de precipitación utilizada en evapotranspiración para año húmedo y seco, respectivamente.

Palabras clave: evapotranspiración real, Eddy Covariance, El Niño

Luna Toledo, E. S.; Figuerola, P. I. and Sancho, A. R., 2019. Environmental drivers of buffelgrass productivity in Chaco Arido of La Rioja (Argentina). RADA X: 59-70

SUMMARY

The Arid Chaco is characterized by extensive production of livestock, with inadequate management practices that increased degradation. Due to this, the surface of exotic pastures, mainly buffelgrass, increased considerably. The objective of this work was to evaluate the environmental drivers of the buffelgrass ANPP (temperatures, precipitation and real evapotranspiration -ETr-), during two station of growth: 2015-2016 and 2016-2017. Both periods presented similar thermal characteristics, however, there was a strong contrast in rainfall: the 2015-2016 period had extraordinary values (~ 670 mm) and it was called "wet year". This period was associated with an intense "El Niño" event. The 2016-2017 period had accumulated rainfall (PPac) less than normal

(~ 380 mm) and it was called "dry year". The accumulated ETr (ETRac) was 342 and 251 mm, while the ANPP was 4046 and 3036 kg ha⁻¹ for the wet and dry year respectively. The efficiency index comparison between wet and dry year was: 1) ANPP / PPac: 7.97 vs. 6.01 kg ha⁻¹ of forage per mm of rain 2) ANPP / ETRac: 11.83 vs. 12.09 kg ha⁻¹ of forage per mm of evapotranspiration and 3) ETRac / PPac: 51% vs 66% of precipitation used in evapotranspiration for wet and dry year, respectively.

Keywords: real evapotranspiration, Eddy Covariance, El Niño.

Luna Toledo, E. S. y Figuerola, P. I.: Instituto de Ambiente de Montaña y Regiones Áridas, IAMRA - Universidad Nacional de Chilecito, 9 de Julio 22, Chilecito, La Rioja. Sancho, A. R.: Estación Experimental Agropecuaria Ing. Juan Carlos Vera. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Correspondencia a: etoledo@undec.edu.ar

INTRODUCCIÓN

El Chaco Seco en la actualidad conserva cerca del 70% de su cobertura nativa (García *et al.*, 2017), sin embargo, las tasas de desmonte han tenido una velocidad dramática en las dos últimas décadas, siendo una de las más altas en el mundo (Hansen *et al.*, 2013; Vallejos *et al.*, 2015).

En el extremo más árido de esta región, conocido como Chaco Árido, la principal actividad económica es la ganadería extensiva bovina y caprina (Blanco *et al.*, 2005; Quiroga *et al.*, 2009). Al menos 1.000.000 de cabezas de ganado bovino y 200.000 cabras pastan en la región (Blanco *et al.*, 2008), con bajos índices de productividad ganadera (50% de terneros logrados), y de carne (5,5 kg ha⁻¹año⁻¹), atribuidos al deterioro de los pastizales y a las prácticas de manejo inadecuadas (Diez *et al.*, 1991).

En este contexto, la implantación de pasturas exóticas, principalmente buffelgrass (*Cenchrus ciliaris* L.), han sido el mayor tipo de reemplazo de la vegetación leñosa nativa, con el objetivo de aumentar la producción ganadera. El buffelgrass es un pasto C4, perenne megatérmico, nativo del sur de África, India e Indonesia que fue introducido en muchas regiones áridas y semiáridas del mundo con el fin de recuperar áreas degradadas, y proporcionar forraje en cantidad y calidad al ganado (Bashaw, 1985; Cox *et al.*, 1988; Ward *et al.*, 2006). Esta pastura ha tenido una gran difusión entre los productores ganaderos de la región, debido a su tolerancia a la sequía, al pastoreo pesado y su resistencia al fuego (Hall, 2001; Jackson, 2004; Namur *et al.*, 2014). Se adapta a un amplio espectro de climas y suelos, y posee

un marcado crecimiento estival, comenzando a rebrotar con las primeras lluvias de la primavera y entrando en senescencia a finales del otoño cuando aparecen las primeras heladas (Ward *et al.*, 2006; Namur *et al.*, 2014). La productividad forrajera de esta pastura es altamente dependiente de las precipitaciones y produce entre 8 y 10 kg.mm⁻¹ha⁻¹ (Ferrando *et al.*, 2005).

La tasa de expansión de esta pastura ha sido muy elevada en la región de los Llanos de La Rioja, que representa aproximadamente el 50% del Chaco Árido. La superficie implantada con buffelgrass hasta el año 2001 era de 13.337 hectáreas, mientras que al cabo de 10 años la superficie se incrementó a 74.305 hectáreas, siendo en nuestros días superior a las 120.000 ha (Mastorakis, 2014; Garay y Agüero, 2018). Este incremento no fue acompañado de un conocimiento acabado de los efectos de estos reemplazos en los atributos funcionales del ecosistema, en particular del dióxido de carbono y el agua.

La evapotranspiración y la productividad son dos de los atributos funcionales más importantes del ecosistema, fundamentales en la comprensión de las interacciones en el sistema suelo-planta-atmósfera (Zhang *et al.*, 2017), en los ciclos del agua, energía y carbono. La transpiración está estrechamente relacionada con los canopeos y con los intercambios de dióxido de carbono con la atmósfera, a través de la fotosíntesis y la respiración autotrófica (Zhang *et al.*, 2016). Los ciclos del agua y del carbono se encuentran íntimamente acoplados en los ecosistemas terrestres (Ito & Inatomi, 2012). Una forma frecuente de vincularlos es mediante la eficiencia en el uso del agua, que es interpretada como la relación entre los gramos

de materia seca producida y los milímetros de agua usados por la vegetación (Ej. Cociente entre la productividad primaria neta y la precipitación o evapotranspiración real).

Existe en la actualidad un consenso sobre el uso de la técnica de Eddy covariance, como protocolo de medición de los intercambios de materia y energía entre el ecosistema y la atmósfera. Este tipo de mediciones han permitido entender el funcionamiento de los ecosistemas alrededor del mundo (Sala y Austin, 2000), mejorando la comprensión sobre los ciclos de agua, carbono y energía en los ecosistemas durante los últimos 30 años (Baldocchi *et al.*, 2014). Algunas de las ventajas de este método son: i) mediciones directas de flujos turbulentos de masa y energía en la superficie de interés, ii) no perturba el ecosistema muestreado, iii) las mediciones representan un área de muestreo con una distancia (footprint) adecuada para la escala de ecosistema, iv) el muestreo con una alta frecuencia temporal (10-20 Hertz) proporciona información acerca de los flujos en escala horaria o sub-horaria (Sala y Austin, 2000; Baldocchi *et al.*, 2001; Campioli *et al.*, 2015; Foken, 2017).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), obtenido desde sensores remotos satelitales, es considerado un buen proxy de la productividad primaria (Pettorelli *et al.*, 2005, Paruelo 2008, Blanco *et al.*, 2008), ya que integra la relación de múltiples variables ambientales. Este índice se calcula a partir de las reflectancias de las bandas rojo e infrarrojo cercano.

El objetivo de este trabajo fue analizar los patrones estacionales de la temperatura, la precipitación y la evapotranspiración real, como conductores de la productividad de buffelgrass, y

en base a esta información, calcular los índices de eficiencia de uso de agua para un periodo seco y uno húmedo, en la porción del Chaco Árido de La Rioja.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El sitio de estudio está ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria "Juan Carlos Vera", de INTA La Rioja, y pertenece a la región del Chaco Árido, que abarca el oeste de Córdoba, este de La Rioja, sur de Catamarca, centro-norte de San Luis, este de San Juan y una pequeña área al suroeste de Santiago del Estero.

Su clima es subtropical, semiárido, con veranos calurosos e inviernos suaves. La Fig. 1 muestra la marcha anual de la temperatura y precipitación para la estación Aero-Chamical, dependiente del Servicio Meteorológico. La temperatura media anual es de 19,8°C. Enero y diciembre tienen la temperatura media más alta ~26°C, mientras que julio es el más frío 11,3°C, la precipitación acumulada en el año es de 479,4 mm (Fig. 1a), con una marcada estacionalidad, concentrando aproximadamente el 90% de la misma entre los meses de octubre y marzo (Fig. 1b).

Los suelos de la región son *aridisoles* y *entisoles*, predominantemente de textura gruesa, y con bajo contenido de materia orgánica (Gómez *et al.*, 1993; Quiroga *et al.*, 2010).

La vegetación actual del Chaco Árido se caracteriza por un mosaico altamente fragmentado (Zak *et al.*, 2004; Verón *et al.*, 2018), donde los arbustales subtropicales xerofíticos dominados

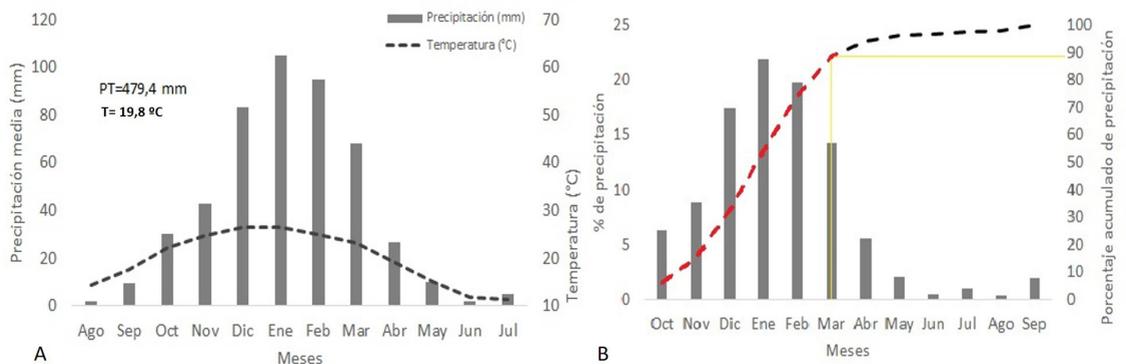


Figura 1: A) variación climática mensual (2001-2010) de la temperatura (°C) y la precipitación (mm) para AERO-Chamical. B) variación porcentual mensual (barra gris) y acumulada (línea punteada) de la precipitación media mensual de AERO Chamical (SMN 476, OMM 87320).

por los géneros *Larrea*, *Mimozyanthus*, *Senna* y *Capparis* constituyen la matriz continua de vegetación dominante, con parches aislados de árboles principalmente *Aspidosperma quebrachoblanco* y *Prosopis Spp* (Morello, 1985).

El estrato herbáceo está compuesto principalmente pastos perennes C4, del género *Trichloris*, *Chloris*, *Pappophorum*, *Aristida*, *Neobouteloua* y *Setaria* (Anderson *et al.*, 1980; Morello, 1985). Este estrato de vegetación, es el más afectado por el pastoreo del ganado, mostrando pérdidas de productividad debido al sobrepastoreo (Kunst *et al.*, 2006; Biurrun *et al.*, 2015).

Variables ambientales

Todas las variables ambientales se midieron en una parcela experimental de 100 hectáreas continuas de buffelgrass en INTA-EEA-La Rioja, donde 13 hectáreas se excluyeron del pastoreo. Las mediciones se realizaron durante el periodo noviembre de 2015 a mayo de 2017. Se midieron variables como la precipitación (Pluviologger, Cavadevices), la temperatura del aire media, máxima y mínima (Scientific Campbell). La evapotranspiración real (ET_r) fue medida usando el sistema de Eddy covariance (Scientific Campbell). La teoría del Eddy se basa en el transporte turbulento en la capa de superficie de la atmósfera (Montgomery, 1948; Swinbank, 1951; Obukhov, 1951), y se utiliza para calcular flujos escalares y de energía a partir de la covarianza entre mediciones de alta frecuencia (10 Hz en este trabajo) de la velocidad vertical del viento y la concentración de gas (vapor de agua) a una distancia determinada (footprints) por encima de la superficie (Sala y Austin, 2000).

La evapotranspiración se calculó siguiendo la siguiente ecuación Baldocchi *et al.*, 2001:

$$ET_r = \lambda \langle w' \rho_v' \rangle \quad (1)$$

donde w' ($m s^{-1}$) es la variación instantánea de la velocidad vertical del viento, ρ_v' ($kg m^{-3}$) es la variación instantánea de la densidad de vapor de agua, $\langle \rangle$ indica promedio cada 30 minutos, y λ ($joule kg^{-1}$) es el calor latente de vaporización.

La altura a la que se colocó el instrumental fue de 1,90 m, para garantizar que se midan flujos homogéneos (Foken, 2017) provenientes de la superficie de interés.

El procesamiento de datos de flujos se efectuó usando el software EVEDDY (Ritcher, 2015) que realiza las siguientes funciones: i) verificación de la estacionalidad de los datos, ii) corrección espectral, iii) corrección por inclinación del anemómetro y iv) corrección por temperatura y humedad metodología de Webb-Pearman-Leuning (1980). Así mismo realiza una eliminación de aquellos casos en los cuales el valor de la velocidad de fricción u , fue igual o menor a $0,15 m s^{-1}$ los cuales se asocian a situaciones de extrema estabilidad atmosférica.

El footprint o “huella de los flujos” que permite conocer el área de procedencia de los flujos (Hollinger *et al.*, 2004) fue determinado basado en los modelos de Hsieh *et al.* (2000) y Kljun *et al.* (2004).

La ecuación del balance de energía (2) se utiliza como un indicador de la calidad de los datos obtenidos usando Eddy covariance. El cierre de la misma indica buena calidad de las observaciones. La ecuación de balance de energía es definida como:

$$LE + H = Rn - G \quad (2)$$

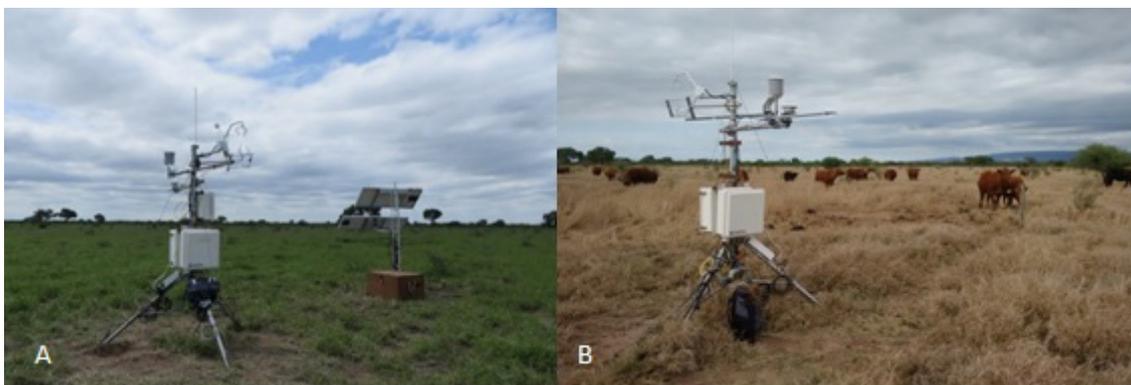


Figura 2: Torre de intercambio de flujos “Eddy Covariance” instalada sobre una parcela de buffelgrass en Chamental, La Rioja. A) principio de la estación de crecimiento. B) fin de la estación de crecimiento.

donde LE y H son el flujo de calor latente y calor sensible respectivamente (ambos medidos con el Eddy covariance), y Rn es la radiación neta y G es el flujo de calor del suelo. En general, la ecuación (2) presenta problema de cierre, asociados a varias razones entre ellas la falta de consideración del calor almacenado en la cobertura vegetal o el suelo, y condiciones frecuentes de estabilidad, advección etc. (Wilson *et al.*, 2002). La calidad de los datos presentados en este trabajo, han sido evaluados previamente en Figuerola *et al.* (2018a, b) obteniendo una pendiente de 0,63, un coeficiente de determinación de 0,93, mientras que la relación de balance de energía (RBE) fue de 0,78. Estos valores se ubican en el rango de los encontrados en la literatura para torres de Eddy covariance alrededor del mundo (Wilson *et al.*, 2002).

La estacionalidad del índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) se utilizó para caracterizar el periodo de estudio (Petorelli *et al.*, 2005), entre ellos: inicio y fin de fase de crecimiento, la duración de la estación de crecimiento, y máximos y mínimos de la serie de NDVI. Estos atributos fueron obtenidos usando el software TimeSat (Jönsson and Eklundh, 2004).

Utilizamos el NDVI de píxeles puros del centro de la parcela, correspondiente al producto MOD13Q1 (MODIS, 1999) del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA. Este producto tiene una resolución espacial de 250 m. y una integración temporal de 16 días (23 imágenes por año). Los datos se descargaron de modo gratuito del Servicio Geológico de Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y fueron procesados utilizando los softwares R (2019), Package MODISTSP (Busetto & Ranghetti, 2016): <https://github.com/ropensci/MODISTsp> y ERDAS imagine (<https://www.hexagongeospatial.com>).

Productividad de buffelgrass

La Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) se estimó mediante el método de cosecha, que consiste en cortes sucesivos de fitomasa a nivel del suelo durante la estación de crecimiento (Sala y Austin, 2000) en una parcela excluida del pastoreo. Los cortes fueron realizados con una frecuencia mensual durante el periodo noviembre/2015 a mayo/2017. Se usaron parcelas de corte de dimensiones conocidas 1,0 m x 0,5 m, y se muestreo en una transecta de 300 m, con 30 cortes cada 10 metros. El material cosechado fue secado en estufa de convección forzada a 80°C durante 48 horas, y pesado con una precisión de 0,1 gr (De Wysiecki y Sánchez, 1992).

Análisis estadístico de los datos

Los datos se analizaron mediante modelos de regresión lineal, y modelos lineales, generales y mixtos (MLGM), con nivel de significancia de 0,05. Para comparar medias se utilizó test de LSD de Fisher. Los análisis se realizaron utilizando el software estadístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2011)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura y precipitación

La Fig. 3 muestra la variación estacional de las condiciones ambientales durante el experimento (temperatura media, máxima y mínima del aire, precipitación, y precipitación acumulada). Durante las dos estaciones de crecimiento (noviembre a mayo) se registraron 6 días en donde las temperaturas máximas fueron mayores a 40°C, sin valores menores a cero grados. La máxima absoluta durante los dos periodos de crecimiento fue de 43,5°C y ocurrió el día 03/01/2017. La temperatura mínima absoluta fue de 0,07°C el 27/04/2016. La temperatura media diaria para los dos periodos fluctuó entre valores de 4,3°C y 37,5°C (Fig. 3a). La Tabla 1 muestra los valores medios de temperatura, siendo estos muy parecidos para ambos periodos. Las condiciones térmicas favorecieron el crecimiento y el desarrollo de la pastura en las

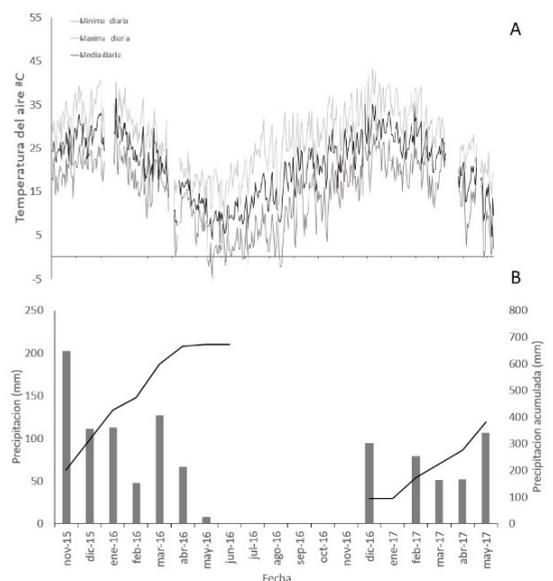


Figura 3: Variación de las condiciones ambientales: A) temperatura (media, máxima y mínima); B) precipitación (mensual y acumulada) sobre la parcela de buffelgrass durante el periodo noviembre/2015 a mayo/2017.

Tabla 1: Caracterización térmica de las dos estaciones de crecimiento (noviembre a mayo) consideradas: temperatura media (Tm); temperatura máxima media (Tmx_m); temperatura mínima media (Tmn_m), y temperatura máxima absoluta (Tmx_{abs})

	Tm (°C)	Tmx _m (°C)	Tmn _m (°C)	Tmx _{abs} (°C)
2015-2016	25,1	30,8	19,4	40,5
2016-2017	25,7	31,9	18,8	43,4

dos estaciones de crecimiento. Buffelgrass es una pastura megatérmica que muestra valores óptimos de crecimiento y desarrollo con temperaturas altas (Cox *et al.*, 1988; Ward *et al.*, 2006).

Existieron dos ciclos contrastantes de precipitaciones (Fig. 3b) durante todo el periodo estudiado. Un primer periodo 2015-2016 con precipitación acumulada en la etapa de crecimiento (noviembre-mayo) del buffelgrass de 672 mm, siendo muy superior al valor normal (430,9 mm: desde estadística 2001-2010) y que denominamos “año húmedo”, y un segundo periodo 2016-2017 con valores de precipitación que estuvieron por debajo (380 mm) del valor normal, y que denominamos “año seco”. Este comportamiento muestra una fuerte asociación con el Índice del Niño Oceánico (INO).

La Fig. 4 muestra la secuencia de valores del INO. Estos valores son calculados trimestralmente por el Climate Prediction Center de Estados Unidos

(https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Valores positivos del índice y superiores al umbral de 0,5 está asociado con el evento “El Niño”. Durante la primera estación de crecimiento (2015-2016) los valores de INO, indicado con barras de color negro en la Fig. 4, superan ampliamente el valor de 0,5, y explicarían la ocurrencia de valores de precipitación muy por encima de los valores normales en Chamental para este periodo. Debido a la intensidad del evento “El Niño” para el año 2015-2016 es que se lo ha denominado “Súper Niño” en la literatura reciente (Chen *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2018). Valores negativos de INO menores al valor de -0,5 estarían asociados a un periodo frío de la Oscilación del Sur. La secuencia del índice durante el segundo año muestra valores negativos, por debajo del valor umbral, pero de menor intensidad. Esto podría explicar la ocurrencia de precipitaciones por debajo de la media para el segundo ciclo de crecimiento.

Evapotranspiración de Buffelgrass

Los valores de LE (ecuación 2) fueron convertidos a lámina de agua por unidad de tiempo (mmd⁻¹), obteniendo la evapotranspiración real del buffelgrass (ET_r). La ET_r mostró, en valores mensuales, una variación estacional muy marcada en la Fig. 5a. Debido a las

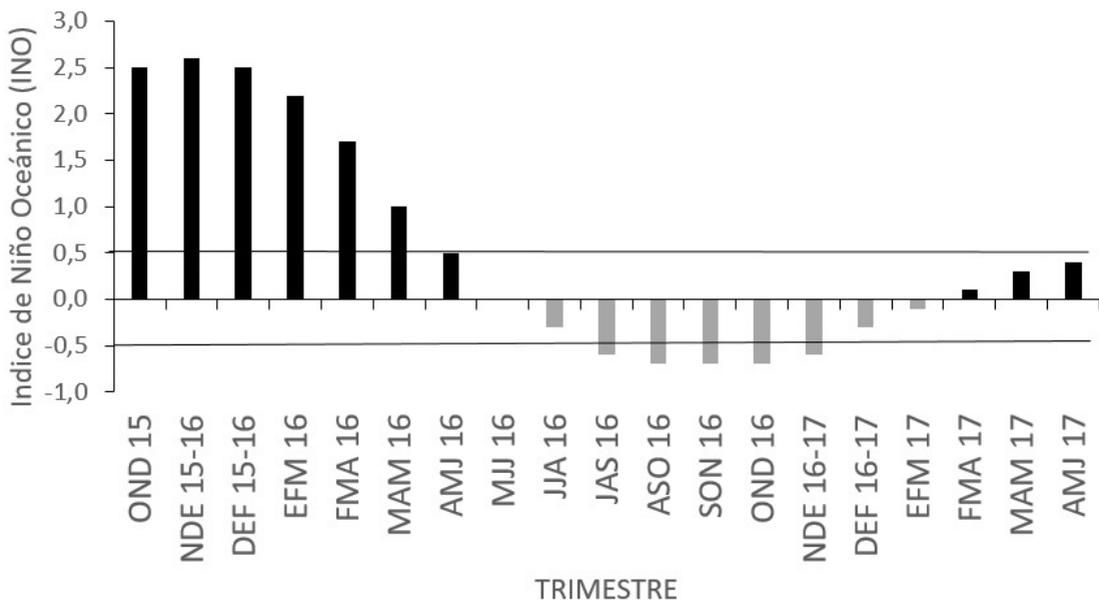


Figura 4: Índice de Niño Oceánico para el periodo de estudio (octubre/2015 a mayo/2017). Las líneas horizontales indican valores umbrales. Fuente: Prediction Climate Center (USA).

precipitaciones concentradas en los meses de verano, la ETr se concentra en los meses cuando ocurren las mayores entradas de agua al sistema y las temperaturas altas. Sin embargo, en invierno cuando la precipitación es casi nula, la ETr cae progresivamente hasta alcanzar su mínimo entre junio y agosto con un promedio de 5,5 mm en el mes. El valor acumulado de ETr en el periodo noviembre/2015 a mayo/2016 fue de 342 mm, mientras que en la temporada de crecimiento del año seco (noviembre/2016 a mayo/2017) la ETr acumulada fue de 251 mm (Tabla 2). Los meses de mayor contribución de ETr para el año húmedo fueron diciembre, enero y febrero, superando el 72% del total de la estación de crecimiento. Mientras que, para el año seco, la contribución de ETr para los mismos tres meses fue menor (55%), desplazándose un porcentaje importante hacia fines de la estación de crecimiento (las contribuciones de marzo, abril y mayo son superiores al 36%). Esto se debe al comienzo tardío de las precipitaciones en el periodo 2016-2017.

Tabla 2: Resumen de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA), precipitación acumulada (PP), y la evapotranspiración real acumulada ($E_{Tr_{ac}}$), en el periodo de crecimiento durante el año húmedo (2015-2016) y seco (2016-2017).

	PPNA (kg ha ⁻¹)	PP _{ac} (mm)	ETr _{ac} (mm)
Año húmedo	4046	672	342
Año seco	3036	380	251

Estacionalidad del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

En la Fig. 5b se muestra el patrón estacional del NDVI, durante los dos periodos de estudio. Una síntesis del comportamiento para el año húmedo y seco, se muestra en la Tabla 3. Para el año húmedo, los valores máximos de NDVI, como así también la longitud de la estación de crecimiento y la integral del NDVI fueron mayores que durante el año seco. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en el análisis de la integral de NDVI entre año húmedo y seco (MLGM, $p > 0.05$).

Tabla 3: Caracterización de la estación de crecimiento a partir datos de índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI), donde se indica la fecha de inicio y finalización del crecimiento, longitud en días del periodo de crecimiento valores mínimos y máximos de las series de NDVI para el año húmedo y seco.

Estación de crecimiento	Inicio	Fin	Longitud en días	NDVI	
				Mínimo/Máximo	Integral-NDVI (*)
Año húmedo	17/11/2015	25/05/2016	193	0,251 / 0,695	2.38
Año seco	17/01/2017	10/06/2017	145	0,284 / 0,618	1.75

*Obtenidas desde Luna Toledo et al.; 2018 (Sin diferencias significativas $p > 0.05$).

Productividad Primaria Neta Aérea

La relación entre PPNA y la integral del NDVI fue analizada para este sitio y para ambos periodos por Luna Toledo *et al.*, (2018), encontrando una excelente relación entre ambas variables.

La variación estacional de la PPNA es mostrada en la Fig. 5c. La PPNA en el año seco fue un 25 % menor que en el año húmedo (Tabla 2), mientras que la diferencia de precipitación entre ambos periodos fue de 44 %. Namur *et al.* (2014) menciona que para la región de los Llanos de La Rioja la producción estaría en unos 3500 kg ha⁻¹ para una precipitación media en la estación de crecimiento de 430 mm.

En concordancia con la ocurrencia de las precipitaciones, la PPNA en el año húmedo aumenta rápidamente en el verano (diciembre-enero-febrero de 2016), mientras que durante el año seco lo hace durante los meses de otoño (marzo, abril y mayo de 2017).

Hodgkinson *et al.* (1989), determinó el rango óptimo de temperatura para la fotosíntesis en buffelgrass entre 25°C y 37°C. A partir de los datos temperatura máxima y precipitación diaria, evaluamos si existe coincidencia entre la ocurrencia de las precipitaciones y las temperaturas óptimas para nuestro sitio. Así durante el año húmedo, el 70% de las precipitaciones ocurrieron entre noviembre y febrero. Para estos meses, el 72% de los días tuvieron temperaturas máximas óptimas. Mientras que, durante el año seco, el 70% de las precipitaciones fueron alcanzadas en otoño. Este retraso en la ocurrencia de las precipitaciones hace que las temperaturas bajen considerablemente. Así, los meses de abril y mayo de 2017, tuvieron solamente un 40% de días con rangos de temperaturas óptimas. La ocurrencia simultánea de precipitaciones y temperaturas óptimas, maximiza la PPNA de buffelgrass.

Eficiencia de uso de agua

La eficiencia de uso de agua es la relación entre la producción de materia seca y la precipitación o la evapotranspiración. Este índice de eficiencia

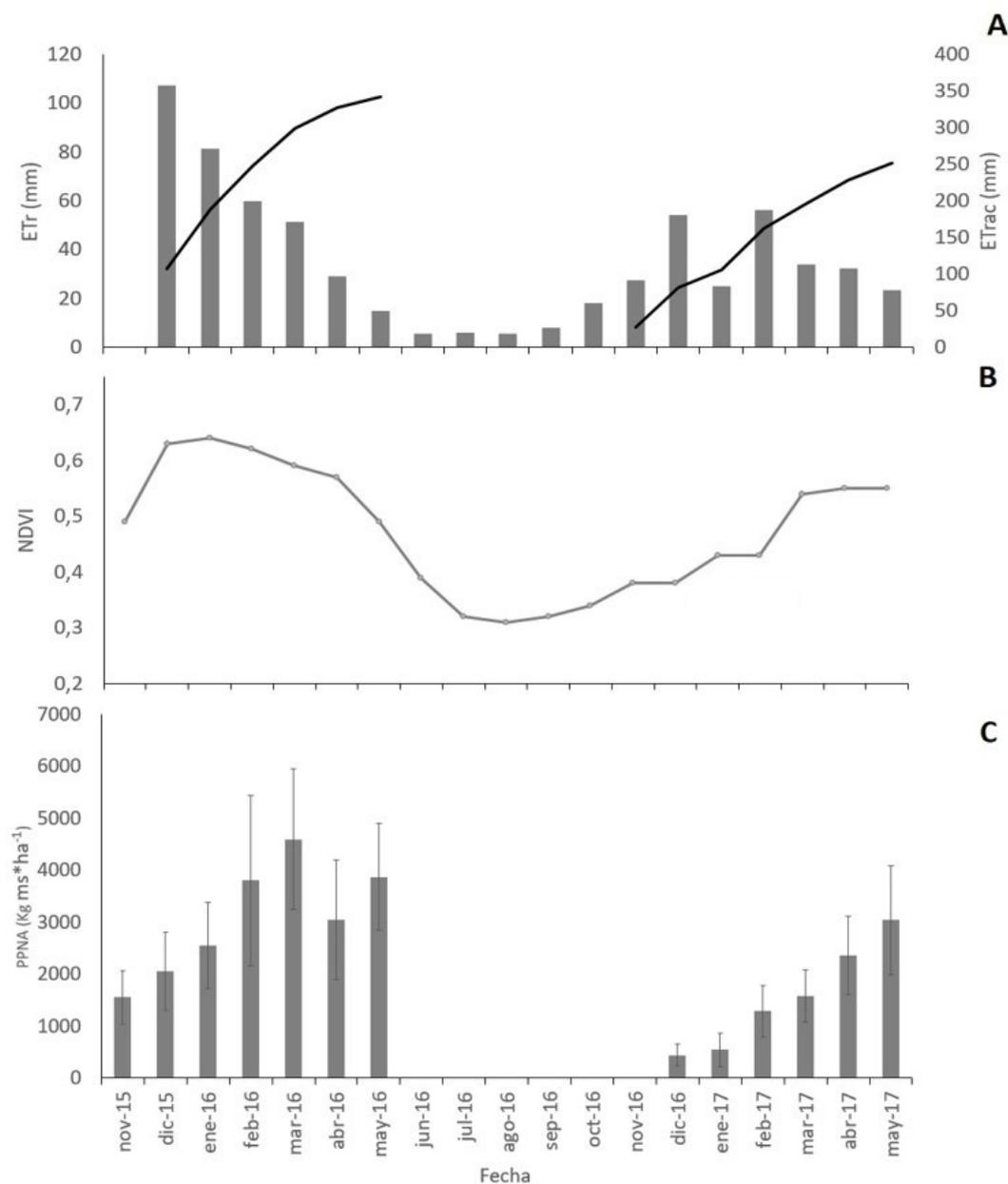


Figura 5: Evolución mensual de: A) evapotranspiración real (ETr) y valor acumulado ETrac; B) NDVI, y C) Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) de buffelgrass (kg de masa seca ha⁻¹) incluyendo la desviación estándar.

varía entre especies debido al metabolismo (C3 vs C4), composición de la biomasa y a características de uso de agua, y entre climas que condicionan la demanda atmosférica (Della Maggiora *et al.*, 2002).

En base a los valores obtenidos de precipitación acumulada (PP_{ac}), evapotranspiración acumulada (ETr_{ac}) y productividad primaria neta aérea (PPNA) al final de cada periodo, se calcularon los índices 1) $PPNA/PP_{ac}$ (eficiencia en el uso de

la precipitación): nos indica la cantidad de pasto producido por milímetro de lluvia caída. 2) $PPNA/ETr_{ac}$ (agua productiva): indica la cantidad de pasto producido por milímetro de agua evapotranspirada, y 3) ETr_{ac}/PP_{ac} (precipitación evaporada): indica la proporción de milímetros evaporados en relación a los milímetros de lluvia. Se calcularon índices de eficiencia para el año húmedo: 2015-2016, y seco: 2016-2017 (Tabla 4).

Tabla 4: índices de eficiencia de uso de precipitación (PPNA/PP_{ac}) en kg ha⁻¹ mm⁻¹; eficiencia de uso de agua (PPNA/ET_r_{ac}) en kg ha⁻¹ mm⁻¹, y precipitación efectiva (ET_r_{ac}/PP_{ac}).

Periodo	PPNA	PPNA	ET _r _{ac}
	PP _{ac}	ET _r _{ac}	PP _{ac}
Año húmedo	6,01	11,83	0,51
Año seco	7,97	12,09	0,66

Los resultados (Tabla 4) indican que en el año seco el buffelgrass es mas eficiente en el uso de la precipitación ya que PPNA/PP_{ac} dio 6,01 vs 7,97 kg de forraje por milimetro de lluvia por hectarea, en año humedo versus año seco. Cambios en la entrada de agua al sistema condiciona fuertemente la eficiencia de conversión de PP a PPNA.

El analisis de agua productiva (PPNA/ET_r_{ac}) muestra valores similares de conversión en año humedo y seco 11,83 vs 12,09 kg de forraje por hectarea por milímetros de agua evapotranspirada respectivamente, lo que podria indicar que en años con precipitación elevada existe una recarga en el suelo que no se da en el año seco. Los valores de precipitación evaporada (ET_r_{ac}/PP_{ac}) refuerzan esta idea, ya que en el año humedo el 51% de la precipitación fue utilizada en evapotranspiración, mientras que en el año seco fue el 66%.

Huxman *et al.* (2014) han mostrado en diferentes biomas que la eficiencia de uso de la precipitación disminuye a medida que la precipitación anual aumenta. Este resultado concuerda con los resultados de este trabajo. Huxman *et al.*, (2014) también afirman, que en los años más secos existe una convergencia hacia una eficiencia máxima de uso de la precipitación siendo típico en ecosistemas áridos. En consecuencia, los años en que el agua es limitante, en desiertos, pastizales y bosques cada uno de ellos exhiben la misma tasa de producción de biomasa por unidad de lluvia a pesar de las diferencias de fisonomía y eficiencia a nivel del sito.

La Fig. 6 muestra la relacion lineal entre la PPNA con la entrada de agua al sistema (PP), y la salida por ET_r (Fig. 6 a-b) durante la estacion de crecimiento, esta relacion tiene similitudes

con estudios hechos por Della Maggiora *et al.*, (2002), para cultivos pampeanos de secano. La precipitación en este tipo de sistemas es la única fuente de ingreso de agua, y por lo tanto condiciona fuertemente la PPNA. El efecto de las precipitaciones y la ET_r fue diferente en el año húmedo que en el seco. Para explicar este patrón, nosotros usamos el coeficiente de correlación de Pearson y la pendiente de la recta como se muestra en la Tabla 5.

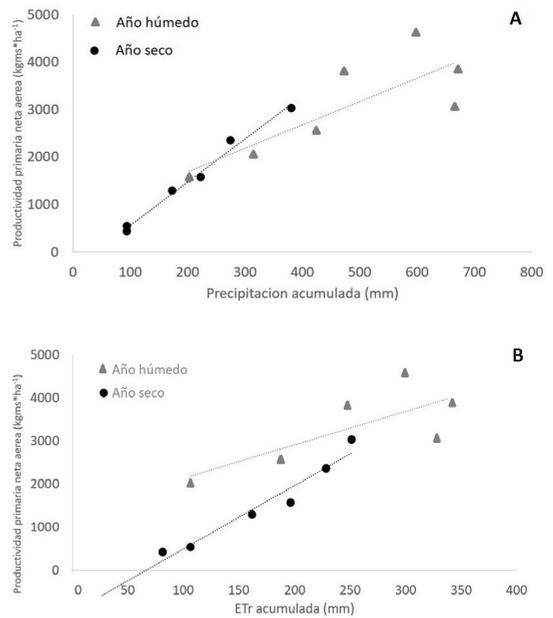


Figura 6: Relación entre la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) mensual y la precipitación acumulada mensual A) y a la evapotranspiración real acumulada mensual B) para el año húmedo y seco. El mes de noviembre no tiene ETac.

Los valores del coeficiente de determinación entre PPNA con PP y con ETr son bajos para el año húmedo, y se observa que estos valores son más cercanos a uno en el caso del año seco. En relación a la pendiente, la proporción de agua usada fue mayor en el año húmedo (4,9 kg ha⁻¹ mm⁻¹) que en el año seco (9,1 kg ha⁻¹ mm⁻¹). Respecto a ETr (Tabla 5, Fig. 6b) a igual proporción

Tabla 5: Relación lineal entre productividad primaria neta aérea (PPNA) y precipitación (PP), entre PPNA y evapotranspiración real (ETr), y entre evapotranspiración real (ETr) y precipitación (PP). Se muestra el coeficiente de determinación (R²), la pendiente de la recta (a) en kg ha⁻¹mm⁻¹, y la ordenada al origen (b).

	PPNA-PP			PPNA-ETr			ETr-PP		
	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b
Año húmedo	0,68	4,9	718,23	0,55	7,75	1366,2	0,97	1,569	-129,74
Año seco	0,98	9,1	-340,64	0,94	14,73	-976,87	0,92	1,588	-64,806

de PPNA ($\sim 2000 \text{ kg ha}^{-1}$), la ETr en el año húmedo fue aproximadamente el doble ($7,75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) que en el año seco ($14,73 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$).

CONCLUSIONES

Buffelgrass es una pastura exótica ampliamente utilizada por productores ganaderos de la región del Chaco Árido de Argentina. La PPNA de buffelgrass tiene una fuerte estacionalidad determinada por las ocurrencias de precipitaciones y por las altas temperaturas características de la época estival para la región. Cambios en las entradas de agua al sistema condicionan fuertemente la eficiencia de conversión de la precipitación en productividad. La precipitación (PP) acumulada durante el período de crecimiento de la pastura es la variable que más afecta a la productividad primaria neta aérea (PPNA). Durante el período 2015-2016 se produjo un evento El Niño resultando de alta productividad (4046 kg ha^{-1}).

Los resultados muestran valores más bajos de eficiencia en el uso de la precipitación en el período de crecimiento en el año húmedo ($6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), en comparación con el mismo período en el año seco (2016-2017) ($7,97 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$). Sin embargo, los valores de agua productiva son muy similares entre año húmedo y seco. Esto hace suponer que durante años húmedos, una porción importante del agua precipitada no se convierte en PPNA sino que pasa a formar parte del almacenamiento en el suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, D.L., Del Aguila, J.A., Marchi, A., Vera, J.C., Oriente, E.L. & Bernardon, A.E. 1980. Manejo del pastizal natural y producción ganadera Parte I y II. Editorial INTA, Buenos Aires, AR.
- Baldocchi, D.; E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, J. Fuentes, 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11), 2415-2434.
- Baldocchi, D. 2014. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—the state and future of the eddy covariance method. *Global change biology*, 20(12), 3600-3609.
- Bashaw, E. C., 1985. Buffelgrass origins. In *Buffelgrass: Adaptation, management and forage quality symposium*. College Station, TX: Texas Agricultural Experiment Station MP-1575 pp. 6-8.
- Biurrun, F.; M. Cabido, L. Blanco, 2015. Consideraciones sobre la vegetación de la provincia de La Rioja y su estado de conservación. En: CASAS, R.; ALBARRACÍN, G. Eds. *El Deterioro del Suelo y del Ambiente de la Argentina*. Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura –FECIC, Centro para la Promoción de la Conservación del Suelo y del Agua – PROSA. Tomo I, 485-503 pp
- Blanco, L. J.; C. A. Ferrando, F. N. Biurrun, E. L. Oriente, P. Namur, D. J. Recalde, G. D. Berone, 2005. Vegetation responses to roller chopping and buffelgrass seeding in Argentina. *Rangeland ecology & management*, 58(3), 219-224.
- Blanco, L.J.; M. O. Aguilera, J. M. Paruelo, F. N. Biurrun, 2008. Grazing effect on NDVI across an aridity gradient in Argentina. *Journal of Arid Environments* 72, 764–776.
- Busetto, L., & Ranghetti, L. 2016. MODISsp: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. *Computers & geosciences*, 97, 40-48.
- Campoli, M.; S. Vicca, S. Luysaert, J. Bilcke, E. Ceschia, F. S. Chapin, D. Olefeldt, 2015. Biomass production efficiency controlled by management in temperate and boreal ecosystems. *Nature Geoscience*, 8(11), 843.
- Chen, L.; T. Li, B. Wang, L. Wang, 2017. Formation mechanism for 2015/16 super El Niño. *Scientific reports*, 7(1), 2975.
- Climate National Center 2019. Oceanic Niño Index, USA https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php (Consultada el 08-10-2019)
- Cox, J. R.; M. H. Martin, F. A. Ibarra, J. H. Fourie, N. F. G. Rethman, D. G. Wilcox, 1988. The influence of climate and soils on the distribution of four African grasses. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 41(2), 127-139.
- De Wysiecki, M. L.; N. E. Sánchez, 1992. Dieta y remoción de forraje de *Dichroplus pratensis* Orthoptera, Acrididae en un pastizal natural de la provincia de La Pampa, Argentina. *Ecología Austral*, 20(1), 019-027.
- Della Maggiora, A. I.; J. M. Gardiol, A. I. Irigoyen, 2002. Requerimientos hídricos. En libro: Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja, F. H. Andrade, V. O. Sadras, Ed. EEA INTA Balcarce-FCA UNMP. Pag.157-174
- Diez, H. A.; H. F. Calella, J. C. Pérez, G. Pignata, G. Bronstein, 1991. Acuerdo federal para el desarrollo rural del Chaco Árido. Documento Proyecto. Consejo Federal de Inversiones.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, Y. C. (2011). InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.>

- infostat. com. ar, 8, 195-199.
- ERDAS Imagine 2011. Programa para procesamiento de imágenes satelitales. <https://www.hexagongeoespacial.com>). (Consultado el 10/10/2019)
- Ferrando, C. A.; P. Namur, L. J. Blanco, G. D. Berone, T. A. Vera, 2005. Módulo experimental de cría, buffel grass-pastizal natural, en Los Llanos de La Rioja: índices productivos. Congreso Argentino de Producción Animal.
- Figuerola, P.; E. Luna Toledo, A. Sancho, 2018a. Método de Eddy covariance para medir flujos turbulentos. XVII Reunión Argentina de Agrometeorología. Asociación Argentina de Agrometeorología, Villa de Merlo, San Luis, Argentina.
- Figuerola, P.; E. Luna Toledo, A. Sancho, 2018b. Determinación de flujos turbulentos sobre cubiertas de olivos y buffelgrass por el método de covarianza de vórtices. VIII Congreso Nacional - IV Congreso del Mercosur sobre Manejo de Pastizales Naturales.
- Foken, T., 2017. Micrometeorology. Springer, 2da Edition. Berlín, Heidelberg. 361 pp.
- Garay, D.; J. Agüero, 2018 Determinación de áreas implantadas con buffel grass *Cenchrus ciliaris* L. en los Llanos de La Rioja. XVII Reunión Argentina de Agrometeorología.
- García, A. G.; C. M. Di Bella, J. Houspanossian, P. N. Magliano, E. G. Jobbágy, G. Posse, M. D. Noso, 2017. Patterns and controls of carbon dioxide and water vapor fluxes in a dry forest of central Argentina. Agricultural and Forest Meteorology, 247, 520-532.
- Gómez, J. C.; H. Calella, R. Corzo, A. Reynoso, 1993. Mapa de las subregiones de vegetación y suelo del Chaco de La Rioja. Desarrollo rural integral del área de Los Llanos. C.F.I. Gobierno de La Rioja. Universidad Provincial de La Rioja. La importancia en la producción agropecuaria y en el empleo Rioja. 186 pp.
- Hall T. J., 2001 History and development of buffel grass pasture lands in Queensland. In: Buffel Grass Symposium. Proceedings of Workshop Held at Theodore on 21–23 February 2000. Eds. J. Kyte, H. Lees, I. Loxton & B. Cook pp. 2–12. Department of Primary Industries, Brisbane.
- Hansen, M C; P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, 2013. Supplementary Materials for High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science, p. 850.
- Hodgkinson, K. C., Ludlow, M. M., Mott, J. J., & Baruch, Z. (1989). Comparative responses of the savanna grasses *Cenchrus ciliaris* and *Themeda triandra* to defoliation. Oecologia, 79(1), 45-52.
- Hollinger, D. Y.; J. Aber, B. Dail, E. A. Davidson, S. M. Goltz, H. Hughes, N. A. Scott, 2004. Spatial and temporal variability in forest-atmosphere CO₂ exchange. Global Change Biology, 10(10), 1689-1706.
- Hsieh, C. I.; G. Katul, T. W. Chi, 2000. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. Advances in water Resources, 23(7), 765-772.
- Huxman, T. E.; M. D. Smith, P. A. Fay, A. K. Knapp, M. R. Shaw, M. E. Loik, S. D. Smith, D. T. Tissue, J. C. Zak, J. F. Weltzin, W. T. Pockman, O. E. Sala, B. M. Haddad, J. Harte, G. W. Koch, S. Schwinning, E. E. Small, D. G. Williams, 2014. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. NATURE, 429, 651-654, www.nature.com/nature.
- Ito, A.; M. Inatomi, 2012. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. Journal of Hydrometeorology, 13(2), 681-694.
- Jackson, J.; 2004. Impacts and management of *Cenchrus ciliaris* buffel grass as an invasive species in northern Queensland. Doctoral dissertation, James Cook University.
- Kljun, N.; P. Calanca, M. W. Rotach, H. P. Schmid, 2004. A simple parameterisation for flux footprint predictions. Boundary-Layer Meteorology, 112(3), 503-523.
- Kunst, C.; E. Monti, H. Pérez, J. Godoy, 2006. Assessment of the rangelands of southwestern Santiago del Estero, Argentina, for grazing management and research. Journal of Environmental Management, 80(3), 248-265.
- Luna Toledo, E.S, P. Figuerola, A. R. Sancho, 2018. Productividad primaria de buffelgrass en un año seco y un año húmedo. XVII Reunión Argentina de Agrometeorología. Asociación Argentina de Agrometeorología, Villa de Merlo, San Luis, Argentina.
- Mastorakis, D., 2014. Distribución de las áreas implantadas con Buffel grass en los Llanos de La Rioja, en relación a factores ambientales. Tesis de grado. Universidad Nacional de La Rioja – Sede Chamental.
- MODIS. (1999). MODIS Vegetation Index (MOD 13): Algorithm Theoretical Basis Document Page 26 of 29 (version 3), <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atb>
- Montgomery, R. B., 1948. Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. Journal of Meteorology, 5(6), 265-274.
- Morello, J. A., 1985. Grandes ecosistemas de Sudamérica. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo.
- Namur, P.; J. M. Tessi, R. E. Avila, H. A. Rettore, C. A. Ferrando, 2014. Buffel Grass: generalidades, implantación y manejo para recuperación de áreas degradadas. 1era Ed. Chamental, La Rioja. Ediciones INTA. 22 pp.

- Obukhov, A. M., 1951. Investigation of the microstructure of the wind in the near-surface layer of the atmosphere. *Izvestia AN SSSR, seria Geofizika*, 3, 49ff.
- Paruelo, J. M., 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Ecosistemas*, 17(3).
- Paruelo, J.; D. Alcaraz-Segura, J. N. Volante, 2011. El seguimiento del nivel de provisión de los servicios ecosistémicos. *Valoración de Servicios Ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 141-162.
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in ecology & evolution*, 20(9), 503-510.
- Quiroga, E.; L. Blanco, E. Oriente, 2009. Evaluación de estrategias de rehabilitación de pastizales áridos. *Ecología Austral*, 192, 107-117.
- Quiroga, R. E.; R. A. Golluscio, L. J. Blanco, R. J. Fernández, 2010. Aridity and grazing as convergent selective forces: an experiment with an Arid Chaco bunchgrass. *Ecological Applications*, 207, 1876-1889.
- R Core Team (2019). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>. (Consultado el 10/10/2019)
- Ritcher, K., 2015. Procesamiento de datos medidos con sistema Eddy Covarianza, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias 126 pp. http://sepa.inta.gob.ar/gei/carbono/MANUAL_EVEDDY_V15.pdf
- Sala, O. E.; A. T. Austin, 2000. Methods of estimating aboveground net primary productivity. In *Methods in ecosystem science* pp. 31-43. Springer, New York, NY.
- Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) 2019. (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) consultado el 10/10/2019.
- Swinbank, W. C., 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology*, 83, 135-145.
- Vallejos, M.; J. N. Volante, M. J. Mosciaro, L. M. Vale, M. L. Bustamante, J. M. Paruelo, 2015. Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco ecoregion: a plot level geo-database from 1976 to 2012. *Journal of Arid Environments*, 123, 3-11.
- Verón, S. R.; L. J. Blanco, M. A. Texeira, J. G. N. Irisarri, J. M. Paruelo, 2018. Desertification and ecosystem services supply: The case of the Arid Chaco of South America. *Journal of Arid Environments*, 159, 66-74.
- Ward, J. P.; S. E. Smith, M. P. McClaran, 2006. Water requirements for emergence of buffelgrass *Pennisetum ciliare*. *Weed Science*, 544, 720-725.
- Webb, E. K., Pearman, G. I., & Leuning, R. (1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(447), 85-100.
- Wilson, K.; A. Goldstein, E. Falge, M. Aubinet, D. Baldocchi, P. Berbigier, A. Grelle, 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1131-4, 223-243.
- Zak, M. R.; M. Cabido, J. G. Hodgson, 2004. Do subtropical seasonal forests in the Gran Chaco, Argentina, have a future? *Biological conservation*, 1204, 589-598.
- Zhang, Y.; F. H. Chiew, J. Peña-Arancibia, F. Sun, H. Li, R. Leuning, 2017. Global variation of transpiration and soil evaporation and the role of their major climate drivers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 12213, 6868-6881.
- Zhang, Y.; J. L. Peña-Arancibia, T. R. McVicar, F. H. Chiew, J. Vaze, C. Liu, D. G. Miralles, 2016. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Scientific reports*, 6, 19124.
- Zhu, J.; M. Zhang, Y. Zhang, X. Zeng, X. Xiao, 2018. Response of tropical terrestrial gross primary production to the super El Niño event in 2015. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(10), 3193-3203.