

INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN LA SITUACIÓN HÍDRICA DEL SUELO, EN LA REGIÓN ORIENTAL DE SECANO DE LA ARGENTINA

Vanesa C. Pántano^{1,2}, Liliana B. Spescha³, Olga C. Penalba¹, Guillermo M. Murphy³

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN, UBA, Buenos Aires, Argentina.

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina.

³Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas, FAUBA, Buenos Aires, Argentina.

(Manuscrito recibido el 3 de julio de 2013, en su versión final el 12 de noviembre de 2013)

RESUMEN

La interacción entre el suelo y la atmósfera contribuye en gran medida a la caracterización del sistema climático. En particular, la precipitación y la temperatura constituyen variables principales en la determinación de la situación hídrica del suelo. En este trabajo se analizó la respuesta hídrica del suelo frente a la variabilidad de la Precipitación acumulada mensual y la Evapotranspiración Potencial mensual en la región oriental de secano de la Argentina. Si bien el aumento de las lluvias observado en los últimos años favorecería a los cultivos de verano (por una mayor entrada de agua al sistema), el desbalance entre la Precipitación y la Evapotranspiración Potencial da evidencia de que esta situación no permite satisfacer la totalidad de sus requerimientos. A su vez, la mayor variabilidad, que se observa durante el semestre cálido y hasta el mes de abril, pone de manifiesto la vulnerabilidad en la planificación agrícola para esos meses.

Las condiciones de exceso hídrico predominan al este en el semestre frío (abril-septiembre) y las condiciones de déficit hídrico al oeste en el semestre cálido (octubre-marzo). La zona de transición se caracteriza por una alta estacionalidad, con un comportamiento similar a la zona oriental en los meses cálidos y a la occidental en los meses fríos, en cuanto a la variabilidad de los excesos hídricos.

La diversidad de factores que afectan la disponibilidad hídrica, y la variabilidad de cada uno de ellos, determinan la complejidad del sistema suelo-atmósfera, en el cual la precipitación es el aporte más importante de agua al suelo.

Palabras clave: situación hídrica (SH)- variabilidad climática-región de secano

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND PRECIPITATION VARIABILITY OVER THE HYCRIC CONDITION OF THE SOIL, IN EASTERN RAINFED REGION OF ARGENTINA

ABSTRACT

The interaction between the soil and the atmosphere greatly contributes to the climate system characterization. In particular, rainfall and temperature are major variables in determining the hydric condition (SH) of the soil. In this work we analyzed the hydric response of soil to the variability of the Monthly

Accumulated Precipitation and Potential Evapotranspiration in eastern rainfed region of Argentina.

While the increase in rainfall observed in recent years favor summer crops (for greater input of water in the system), the imbalance between Precipitation and Potential Evapotranspiration gives evidence that this situation can not satisfy all their requirements. In addition, the greater variability observed during the warm semester until April, highlights the vulnerability in agricultural planning for those months.

Excess hydric conditions predominate eastward during the cold semester (April-September) and deficit hydric conditions predominate westward during the warm semester (October-March). The transition zone is characterized by high seasonality, with similar behavior as eastern during warm months and western during cold months, in terms of excess variability. The variety of factors affecting water availability and their variability, determine the complexity of the soil-atmosphere system, in which precipitation is the most important contribution to the water in soil.

Keywords: hydric condition (SH) – climate variability- rainfed region

1. INTRODUCCIÓN

Los diversos componentes del sistema climático se caracterizan, entre otros factores, por la interacción que se desarrolla entre ellos. En particular, la precipitación y la temperatura constituyen factores fundamentales en la determinación de la humedad del suelo. La respuesta del suelo frente a estas variables atmosféricas condiciona el rendimiento de los cultivos. Consecuentemente, el conocimiento de esta dependencia es particularmente necesario en una producción agrícola sin riego que comprende la región pampeana y alrededores.

La precipitación condiciona a la humedad del suelo en forma directa y ésta completa el mecanismo de “feedback” a través de la evapotranspiración (Dirmeyer y otros, 2009). Una forma de analizar este mecanismo es evaluando las necesidades hídricas de los cultivos a partir del balance hídrico, que integra tanto las condiciones climáticas como las características del suelo.

Como se mencionó, una de las variables que más influyen en esta interacción es la precipitación: su distribución, variabilidad, cambios y eventos

extremos. A partir de la década del 70 diversos estudios científicos observaron aumentos en los totales de precipitación anual y estacional en distintas regiones de la Argentina. Entre las investigaciones más recientes se puede citar a Minetti y otros (2003); Liebmann y otros (2004); Penalba y Vargas (2004), Boulanger y otros (2005); Magrin y otros (2005) y Penalba y Robledo (2010). En suelos propicios para los cultivos, este aumento de precipitación favoreció el desplazamiento de la frontera agrícola, facilitando la difusión de los principales cultivos hacia el área marginal occidental más seca. Por su parte, Murphy (2010) explica que este cambio dio lugar al desarrollo de tecnología e instrumentos que aseguren la sustentabilidad del sistema. Asimismo, Spescha y otros (2009) destacan la rápida y efectiva adaptación tecnológica autónoma que se produjo y su impacto positivo sobre las economías regionales de la zona semiárida del país. Esta adaptación implica un cambio en el uso del suelo que influye directamente sobre la humedad disponible en el mismo y, por lo tanto, sobre el balance hídrico del suelo.

Otro elemento climático fundamental para la determinación de la humedad en el suelo es la temperatura, cuyo efecto se

evidencia principalmente a través de la evapotranspiración. Rusticucci y Barrucand (2004) analizan las tendencias de temperatura máxima y mínima en el periodo 1959-1998 y encuentran, principalmente en verano, una disminución en la amplitud térmica en la región oriental del país en las últimas décadas.

Para llevar a cabo el estudio de la humedad del suelo, se debe considerar un sistema integrado conformado por la atmósfera, el suelo y su cobertura vegetal (pradera o, en los procesos productivos agrarios, los cultivos). El subsistema suelo presenta su complejidad en los diversos factores que lo caracterizan. En primer lugar, la distribución del agua en él no es homogénea debido a las diferencias de velocidad de infiltración; el crecimiento desparejo de las plantas y la distribución de las raíces; las variaciones en la estructura del suelo, contenido de materia orgánica y textura de los distintos horizontes; entre otros (Ratto, 2000). Algunas características del suelo, como su capacidad de retención, se pueden sintetizar a través de constantes hidrológicas. Forte Lay y Spescha (2001) obtienen la capacidad de campo efectiva a partir de mediciones disponibles del Centro de Investigaciones Biometeorológicas, estimaciones de modelo realizadas por Falasca y otros (1998) y de INTA. Por otro lado, la profundidad, el desarrollo y la capacidad de absorción de las raíces dependen, entre otros factores, de las condiciones hídricas del suelo y la necesidad de agua de la planta. Cuando el suelo se seca por debajo del contenido óptimo de humedad, es sustancial la velocidad con que las raíces pueden crecer y alcanzar nuevas reservas de agua (Planchuelo-Ravelo, 1988). En cuanto a la transpiración de la planta, diversas variables meteorológicas influyen sobre la misma: radiación solar; temperatura del aire, humedad relativa, viento, temperatura del suelo, etc. (Planchuelo-Ravelo, 1988).

Se han desarrollado y perfeccionado numerosas metodologías para la estimación de la evapotranspiración potencial (EP), debido a la dificultad en la medición de la

evapotranspiración. Entre las más conocidas y aceptadas se encuentran la metodología de Penman (1948) y Thornthwaite (1948). La primera de ellas es fuertemente recomendada en escala diaria para alguna región puntual, donde la cantidad y tipo de variables involucradas en su cálculo sean medidas (Monteith, 1965). Por su parte, la simplicidad de la metodología de Thornthwaite (1948) permite aplicarla en un área de mayor extensión a escala mensual y puede ser mejorada utilizando la temperatura efectiva (Camargo y otros, 1999), en lugar de la temperatura media mensual. Al compararla con la metodología de Penman, Murphy y otros (2002) destacan que esta modificación representa mejor el efecto de elevados y bajos déficit de saturación, propios de los climas áridos y muy húmedos.

Por otro lado, Thornthwaite y Mather (1957) han propuesto una metodología para estudiar los diversos componentes del balance hídrico del suelo en escala diaria y mensual, basándose en la interacción entre EP estimada y la precipitación. Con los años, algunos autores comenzaron a trabajar con el Balance Hidrológico Seriado o Mensual Consecutivo que permite conocer las características de la distribución y variabilidad del balance hídrico, mes a mes, a lo largo de los años. En Argentina, Vargas y Levinsky (1976) y Pascale y Damario (1977) han sido precursores en la exposición y aplicación de esta metodología sobre distintas regiones del país. Más recientemente, Pascale y Damario (2004) presentan una climatología en la región de producción agrícola de secano. Sin embargo, escasos trabajos analizan la respuesta de los componentes del balance hídrico frente a la variabilidad temporal y espacial de las variables de entrada: precipitación y evapotranspiración.

Asimismo, el rendimiento de los cultivos depende fuertemente de las condiciones climáticas en aquellas regiones donde se lleva a cabo una agricultura de secano. Es por ello que surge la necesidad de comprender la influencia del clima y su variabilidad sobre el suelo, a fin de utilizar la información para un uso racional

del recurso hídrico en el sistema productivo agropecuario.

A partir de lo expuesto, el objetivo de este trabajo es analizar la variabilidad de la evapotranspiración potencial y la precipitación, y la respuesta de la situación hídrica a dicha variabilidad en la región oriental de producción agrícola de secano de Argentina.

2. DATOS Y MÉTODOS

La zona de estudio de este trabajo constituye la región oriental húmeda y semihúmeda de producción agrícola de secano de la Argentina. La misma comprende la totalidad de las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Corrientes, Entre Ríos y Misiones y, parcialmente, a las provincias de Córdoba, Santiago del Estero, Chaco y Formosa (Burgos, 1970). Para dar un marco regional al análisis se incorporaron estaciones de las provincias de La Pampa y San Luis. Para llevar a cabo este estudio se utilizaron datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación de 32 estaciones ubicadas en la región de estudio para el período 1970-2006. Esta información fue provista por el Servicio Meteorológico Nacional y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y consistida en el marco del proyecto CLARIS LPB (“A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies in La Plata Basin”), en el trabajo de construcción de una base de datos (Penalba y otros, 2013). En primer lugar, los datos diarios fueron procesados para ser incorporados como variables de entrada del modelo, como se especifica a continuación. A partir de los valores diarios de temperaturas máximas (T_{max}) y mínimas (T_{min}) se estimaron los valores de temperatura efectiva (T_{ef}) diaria según la siguiente ecuación (Camargo y otros, 1999):

$$T_{ef}(t) = 0,36(3 \cdot T_{max}(t) - T_{min}(t)) \quad (1)$$

Para llevar a cabo un análisis regional de las disponibilidades hídricas a escala mensual, se calcularon los valores de Temperatura

efectiva media mensual y precipitación mensual acumulada (P) y se estimaron los valores de evapotranspiración potencial mensual (EP) por el método de Thornthwaite (1948) con las modificaciones de Camargo y otros (1999).

Debido a que el contenido máximo de agua que puede retener el suelo, sintetizado a través de la capacidad de campo, depende de cada tipo de suelo, se incorporaron los valores de capacidad de campo efectiva (CC) del trabajo de Forte Lay y Spescha (2001). Con el objetivo de permitir comparaciones entre distintas estaciones se asumen condiciones constantes del suelo en cada estación, con una cobertura de pradera en toda la región.

A partir de la precipitación mensual acumulada, la evapotranspiración potencial mensual y la capacidad de campo efectiva, se calculó el Balance Hidrológico Mensual Seriado (o Consecutivo). En términos generales, este balance evalúa el flujo de agua entrante por precipitación y de agua saliente por evapotranspiración y excesos. La metodología utilizada fue la propuesta por Thornthwaite y Mather (1957) y Pascale y Damario (1977); obteniendo como componentes de salida del modelo: evapotranspiración real (ETR), almacenaje ($ALMA$), exceso (EXC) y déficit (DEF).

Para cada mes, las variables de entrada condicionan los valores de $ALMA$ y ETR . Debido a que tanto el exceso como el déficit dependen de estas variables, la interacción entre la P y la EP está condicionando indirectamente los valores de dichas componentes.

Aquellos meses en los que la EP supera a la P , el cultivo puede sufrir un estrés hídrico que se computa como déficit a partir de la diferencia entre la EP y la ETR . Mientras que en los meses en los que la P supera a la EP , el excedente da lugar a condiciones de exceso si la incorporación de agua en el suelo es tal que el $ALMA$ alcanza la capacidad de campo. En el mismo caso, si el $ALMA$ no alcanza la capacidad de campo, se

denomina condición de equilibrio y representa la condición hídrica óptima para el crecimiento normal del cultivo (Pascale y Damario, 1977). Sintetizando:

- 1- EXCESO (EXC) cuando $P(t) - EP(t) > 0$ & $P(t) - EP(t) + ALMA(t-1) > CC$
- 2- EQUILIBRIO (EQ) cuando $P(t) - EP(t) > 0$ & $P(t) - EP(t) + ALMA(t-1) < CC$
- 3- DÉFICIT (DEF) cuando $P(t) - EP(t) < 0$ & $ETR - EP < 0$

donde t y $t-1$ son el mes de análisis y el mes previo respectivamente. A partir de estas componentes se estimó la situación hídrica ($SH = \text{exceso} - \text{déficit}$) para cada mes constituyendo una de las variables principales de análisis en este trabajo (ver Anexo). La SH integra en una sola variable la condición de exceso ($SH > 0$), déficit ($SH < 0$) o equilibrio hídrico ($SH = 0$). De acuerdo a las ecuaciones correspondientes a cada condición (detalladas en el Anexo), la SH guarda determinadas relaciones con la interacción entre la P y la EP , condicionada por el $ALMA$ y la capacidad de campo (CC) del suelo correspondiente:

Para la condición de exceso, la metodología propone una relación lineal entre la SH y $P-EP$:

$$SH(t) = P(t) - EP(t) + ALMA(t-1) - CC \quad (2)$$

En condición de equilibrio: $SH(t) = 0$, el $ALMA$ no alcanza la capacidad de campo, sin embargo la provisión hídrica es tal que el cultivo no sufre estrés hídrico.

Mientras que para las condiciones que dan lugar a déficit hídricos, la relación está dada por la siguiente ecuación:

$$SH(t) = P(t) - EP(t) + |ALMA(t) - ALMA(t-1)| \quad (3)$$

donde $ALMA$ se estima según la siguiente ecuación (Forte Lay y Burgos, 1983):

$$ALMA(t) = ALMA(t-1) e^{\frac{P(t) - EP(t)}{CC}} \quad (4)$$

A partir de las ecuaciones (2), (3) y (4), la relación entre la SH y la diferencia $P-EP$ es lineal

y exponencial; de manera que la SH depende de $P-EP$ de meses anteriores, a través de su dependencia con el almacenaje del mes previo.

Finalmente, con el fin de elegir un método de interpolación espacial, se aplicaron y compararon distintas metodologías: Distancia Inversa, Kriging, Mínima curvatura, entre otras (Kagan, 1997). A partir de este análisis, los gráficos de distribución espacial se realizaron utilizando el método de interpolación de kriging, de forma tal que los valores de mayor magnitud son conectados en lugar de permanecer aislados (Kagan, 1997).

3. RESULTADOS

Inicialmente se analizó el comportamiento de las variables de entrada del modelo de Balance Hídrico Seriado. Para ello, en la Figura 1 se presenta la distribución espacial mensual del valor medio de la diferencia entre P y EP , a partir de aquí $P-EP$. En términos generales, el valor medio de $P-EP$ presenta una disposición longitudinal de las isolíneas para el semestre frío (abril-septiembre) y un gradiente noreste-sudoeste para el semestre cálido (octubre-marzo); exhibiendo los mayores valores al este y noreste de la región. Este comportamiento sigue la distribución espacial de los valores medios mensuales de la P (no se muestra) descriptos por Penalba y Vargas (2008). En el noreste de la región de estudio las precipitaciones alcanzan los mayores valores en octubre/noviembre y marzo/abril. El sector oeste y noroeste presenta un gradiente este-oeste con mayores valores de precipitación en los meses cálidos. En el centro se presentan las mayores precipitaciones en marzo y máximos secundarios de octubre a febrero. Por último, el ciclo anual de precipitaciones es similar hacia el sur pero de menor magnitud.

Por su parte, la distribución de la EP (no se muestra) es coherente con la distribución de temperatura efectiva mensual que, según la ecuación (1), depende de la amplitud térmica. Según Pántano (2011), de diciembre a marzo

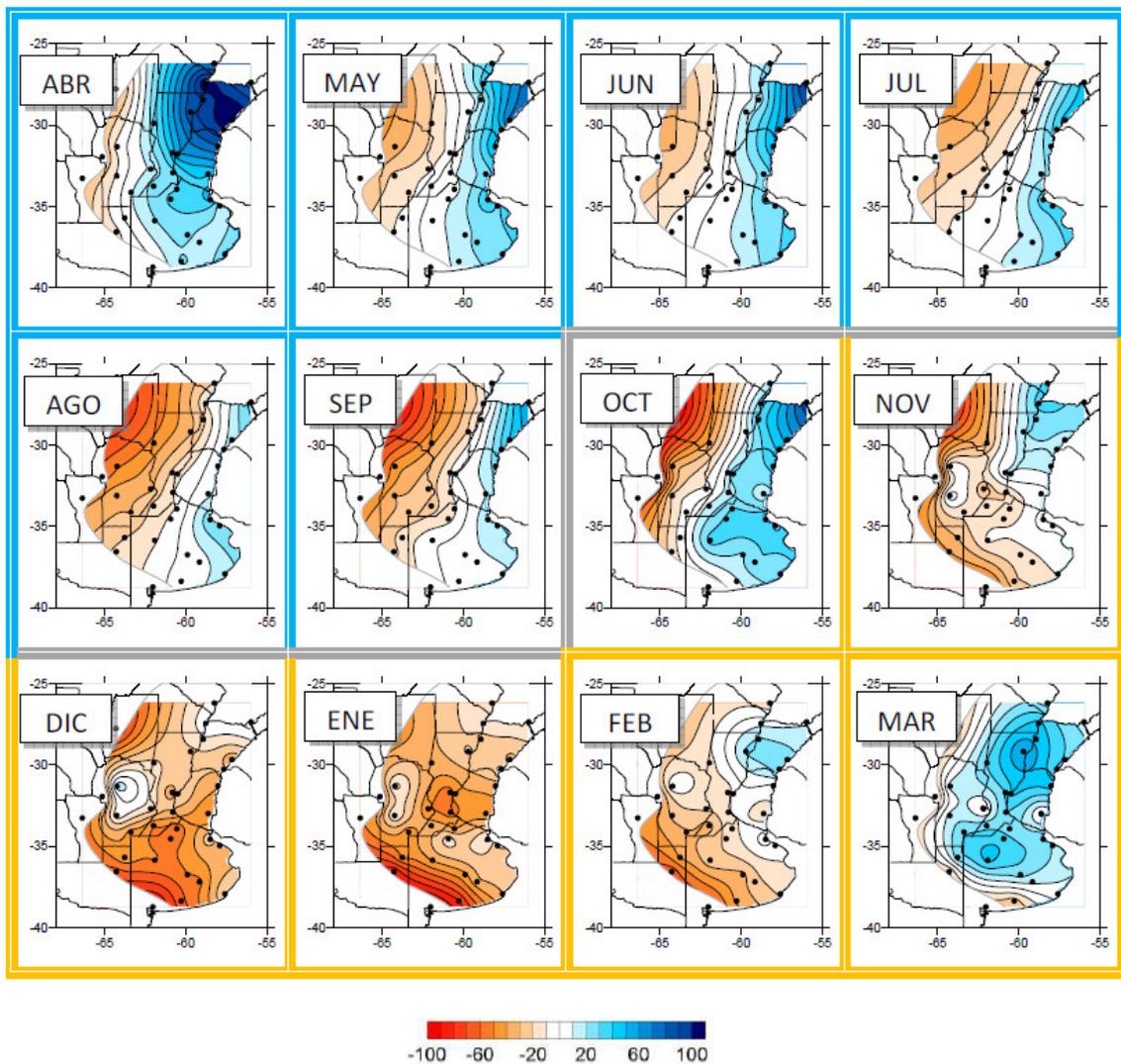


Figura 1: Distribución espacial de la P-EP media (mm) en contornos para el período 1970-2006. La ubicación geográfica de las estaciones están indicadas con puntos.

se observa un gradiente este-oeste de EP con una disposición de las isóneas en forma longitudinal, mientras que de abril a junio se presenta un gradiente norte sur que se va inclinando en los meses de agosto a noviembre. Para el semestre cálido se alcanzan los mayores valores de EP, asociados a una amplitud térmica mayor. Este aumento explica los bajos valores de P-EP durante diciembre y enero.

En la distribución espacial de P-EP observada en la Figura 1, la variabilidad de la precipitación tiene una mayor influencia. Los máximos de precipitación en los meses de otoño se

manifiestan en los máximos de P-EP, dando lugar a condiciones de mayor disponibilidad hídrica para el suelo. A partir del mes de mayo, P-EP se va reduciendo hasta que en el mes de septiembre, los aumentos de precipitación comienzan a modificar su magnitud en el este, incrementándose hasta el mes de octubre, con un fuerte gradiente este-oeste. Sin embargo, el área con valores negativos de P-EP avanza gradualmente hacia el este a partir de noviembre hasta cubrir casi toda la región de estudio en el mes de enero.

Con la finalidad de analizar el nivel de

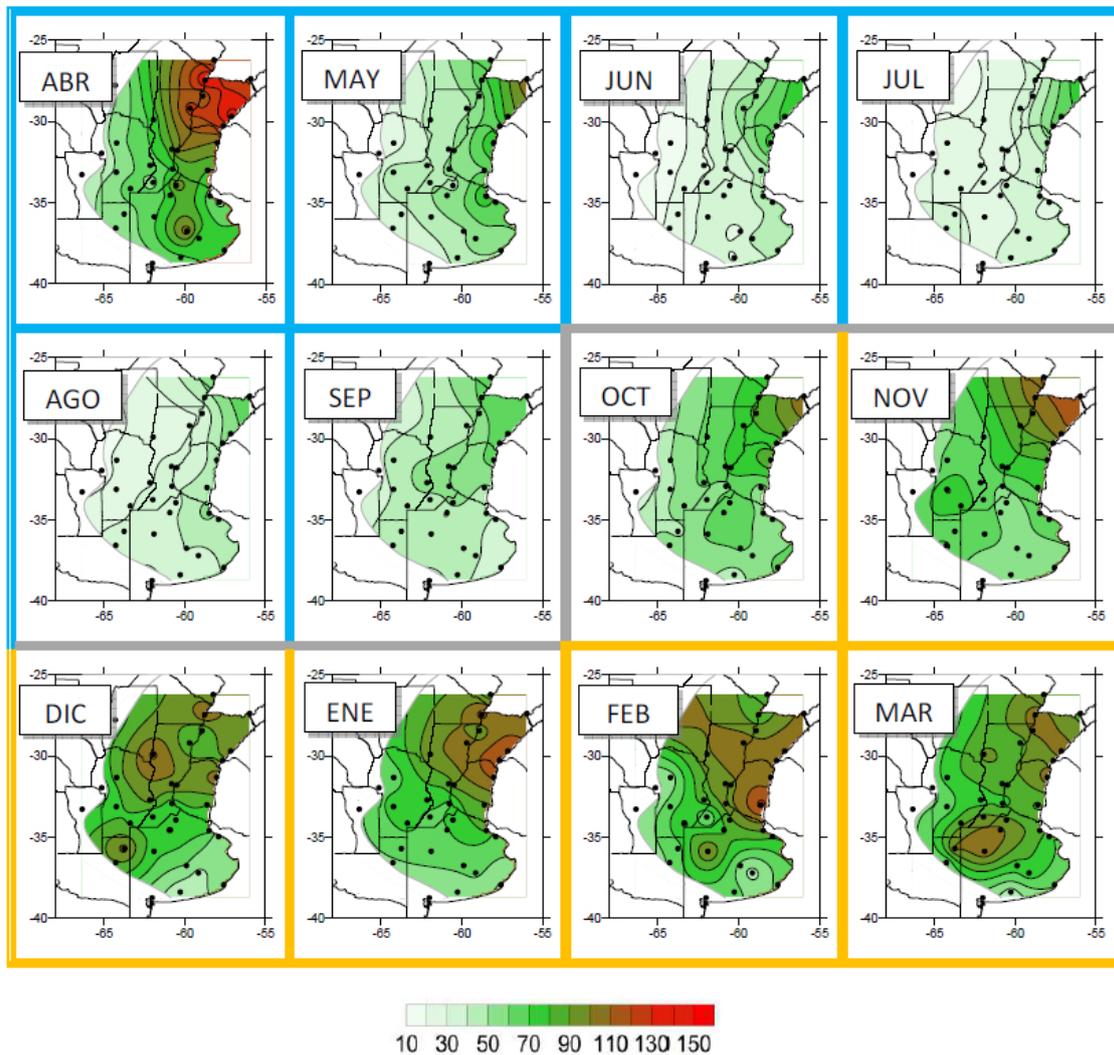


Figura 2: Distribución espacial del desvío estándar de P-EP (mm) para el período 1970-2006.

representatividad de las condiciones medias de P-EP, se calculó el desvío estándar de P-EP en términos mensuales (Figura 2). La variabilidad de la P-EP se ve afectada principalmente por la variabilidad de la P, que influye sobre los resultados del balance hídrico. Sin embargo, la variabilidad del balance hídrico es menor a la variabilidad de la P por considerar el agua en el suelo que actúa como regulador. Por eso, para algunas aplicaciones agronómicas se utiliza el balance hídrico en lugar de P. En un análisis espacial comparativo entre las Figuras 1 y 2, se observa que los sectores con altos valores de P-EP media se caracterizan también por altos valores de desvío estándar; alcanzando los

máximos valores en el noreste de la región. En general, durante el semestre cálido y hasta el mes de abril se presenta la mayor variabilidad; y se observa que los valores de desvío estándar alcanzan una magnitud igual o mayor que los valores medios. Por ejemplo, en Paso de los Libres durante el mes de abril, P-EP medio es cercano a los 100 mm mientras que el desvío estándar supera los 110 mm. En los sectores donde P-EP es cercano a cero en términos medios, el desvío estándar supera ampliamente estos valores, y es el estadístico que caracteriza el comportamiento de P-EP en esas regiones. Hacia el oeste, si bien el desvío es menor que en la Mesopotamia, su importancia radica en

que los valores fluctúan alrededor de un valor medio cercano a cero, lo que representa un factor a considerar en la planificación agrícola.

A su vez, en términos generales, se observa una variación espacial del ciclo anual del desvío estándar (Figura 2). En la Mesopotamia se observan los máximos valores en el mes de abril, luego disminuye progresivamente hasta el mes de agosto. A partir de septiembre, el desvío estándar de P-EP comienza a incrementarse siguiendo el gradiente noreste-sudoeste hasta el mes de noviembre. En el noroeste de la Provincia de Buenos Aires, aparece un centro de máximo relativo en marzo, coincidente con el mes en que P-EP se maximiza. La alta variabilidad de esos meses está dada principalmente por la precipitación, cuya consecuencia afecta directamente las tareas agrícolas. Cuando la misma es excesiva puede dificultar la cosecha de los cultivos de verano como así también afectar la calidad del grano cosechado; mientras que cuando es escasa no alcanza para una buena recomposición del almacenaje de agua del suelo tras los meses de verano, en los cuales la evapotranspiración es alta. A su vez, se observa un centro de máximo relativo en el noroeste (Ceres) y sudoeste (General Pico) de la región en diciembre, en la Mesopotamia en enero y hacia el sur (Gualeduaychú) en febrero. Estos centros no acompañan el comportamiento espacial de P-EP media. Las zonas que abarcan los centros ubicados al oeste se caracterizan por valores negativos de P-EP media, y coinciden con la zona de transición que separa los climas semiáridos de subhúmedos secos y subhúmedos húmedos. Por lo tanto, la alta variabilidad pone de manifiesto el grado de vulnerabilidad para las actividades agrícolas que allí se desarrollan. Dicha actividad se ha incrementado gracias a los mejores precios de los granos y el incremento de las precipitaciones a partir de los años 70-80. A su vez, el avance de la tecnología acompañó este proceso hacia una agricultura sustentable y menor riesgo, pero la variabilidad sigue siendo fuente de vulnerabilidad. En este sentido, Murphy y Hurtado (2006) muestran la zona dentro de la cual se desplaza el índice

hídrico de Thornthwaite de -20 y 0, valores que separan los climas semiáridos de los subhúmedos secos y subhúmedos húmedos. En su análisis advierten sobre el riesgo que se asume para la agricultura al incorporar las tierras ubicadas en la zona de transición y la necesidad de adoptar tecnologías que permitan mitigarlo.

Las características integradas del valor medio y el desvío estándar de P-EP se ven reflejadas en el porcentaje de casos en que la precipitación supera (Figura 3) o no a la evapotranspiración potencial a lo largo del período, determinando los meses de excesiva o insuficiente humedad, respectivamente. Se pueden identificar algunas estaciones al este en donde predominan los casos de humedad excesiva (en junio, julio, septiembre y octubre) asociado a P-EP positivo y a que el desvío estándar es bajo en el semestre frío. Mientras que en la mayor parte de las estaciones de la Pcia. Córdoba y alrededores predominan los casos de humedad insuficiente.

En el centro, se presenta una región de transición con similar porcentaje de P-EP positivo y negativo. Como se observó en la figura 1, esta región se caracteriza por P-EP medio cercano a cero que no se asocia a una SH de equilibrio sino que se debe a la variabilidad de los casos. Durante el semestre cálido, el desvío estándar es mayor y por lo tanto es más extensa el área con porcentajes similares de ambos casos. Aún así, entre diciembre y febrero se pueden identificar algunas estaciones en el centro que, al igual que el sector sur, presentan un predominio de casos de humedad insuficiente.

Las variables de entrada del balance hídrico mensual seriado, analizadas a través de la descripción de P-EP, condicionan los valores de almacenaje y evapotranspiración real. Debido a que tanto el exceso como el déficit dependen de éstas, la interacción entre P y EP está condicionando indirectamente los valores de la SH, tal como se describió en la metodología. La SH presenta condiciones de déficit en las regiones en que P-EP es negativo y condiciones de excesos o equilibrios donde P-EP es positivo.

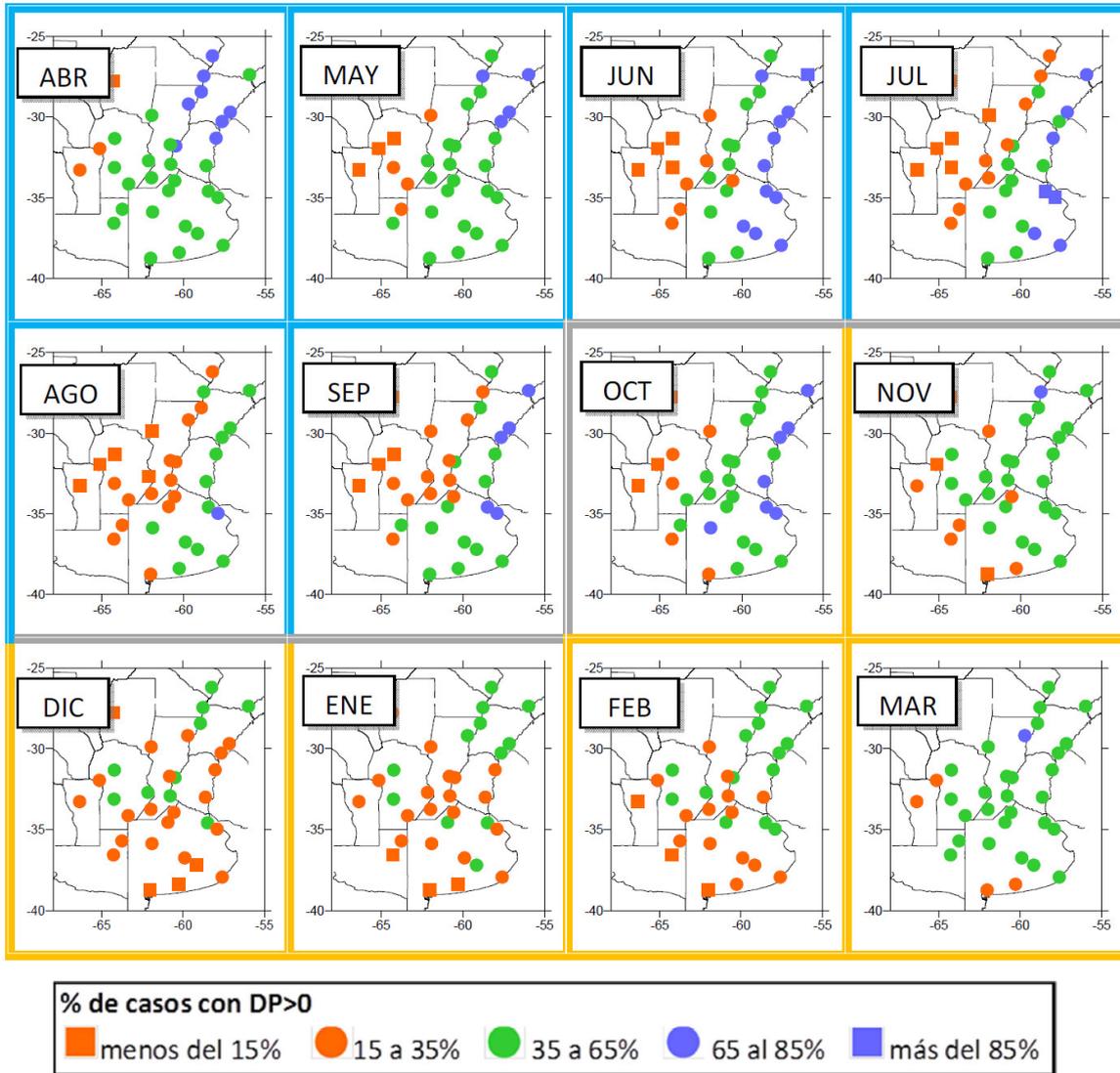


Figura 3: Distribución espacial del porcentaje de casos positivos de P-EP para el período 1970-2006.

Por lo tanto, la distribución espacial de la SH será análoga a la de P-EP (Figura 1). En los casos de P-EP positivo, las características del suelo, dadas por la capacidad de campo, determinan si el suelo permanece en condiciones de equilibrio o se generan excesos.

Con el fin de profundizar sobre la respuesta de la SH a las variables de entrada, se analiza la relación entre SH y P-EP a partir de los diagramas de dispersión en las Figuras 4 y 5, para los semestres cálido (octubre a marzo) y frío (abril a septiembre), respectivamente. A

modo de ejemplo, se muestran los resultados de 8 estaciones distribuidas en la región de estudio con el fin de analizar las distintas particularidades: Ceres, Corrientes, General Pico, Gualeguaychú, La Plata, Pehuajó, Río Cuarto y Tres Arroyos. En los diagramas se diferencian las distintas condiciones hídricas: EXC, DEF y EQ (ver Datos y Metodología). Las situaciones de exceso se clasifican en dos categorías, la primera cuando el suelo se encuentra saturado o en vías de saturación, que corresponde a los meses en los cuales el almacenaje del mes anterior alcanzó la CC.

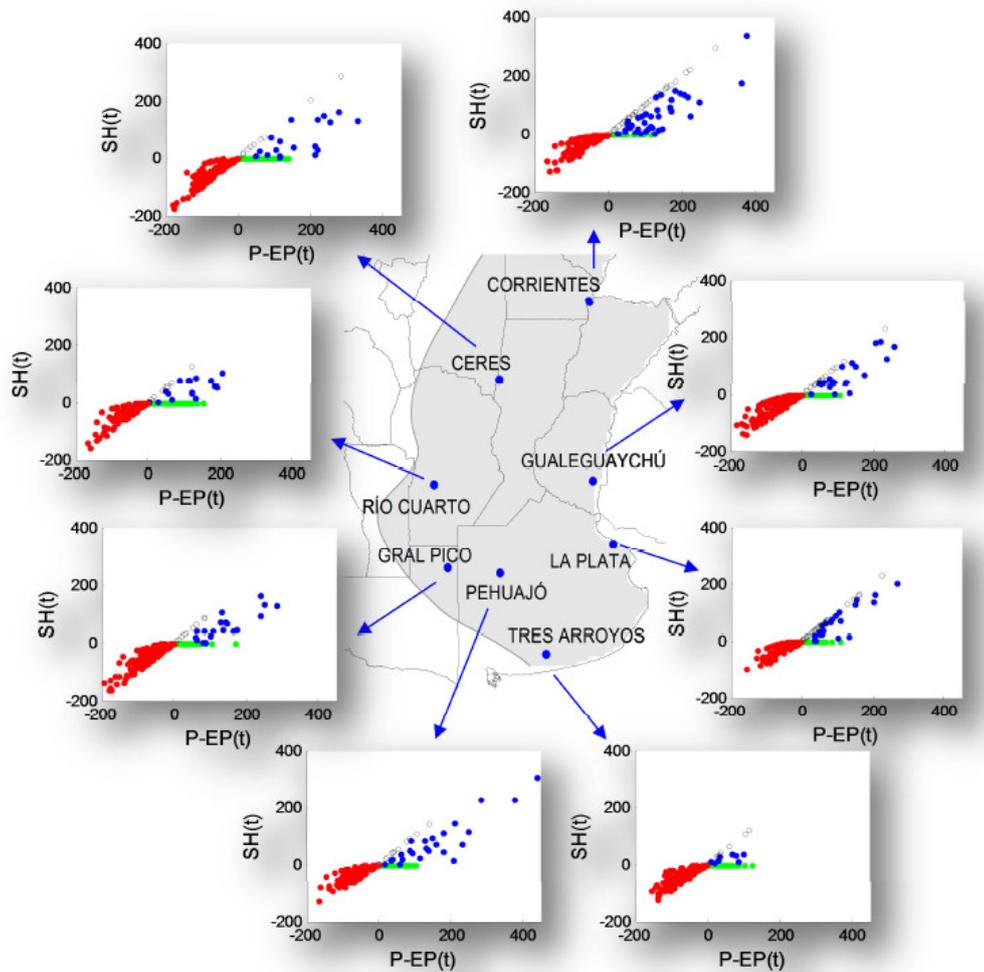


Figura 4: Diagrama de dispersión de situación hídrica $-SH$ (mm)- en función de la diferencia entre la precipitación acumulada y la evapotranspiración potencial mensuales (P-EP en mm) para el semestre cálido del período 1970-2006. Los puntos están clasificados en los distintos casos que integra la SH: EXC en azul, EXC(CC) en negro, DEF en rojo y EQ en verde.

Estos casos están indicados en las Figuras 4 y 5 como EXC(CC). En la segunda categoría la CC no fue alcanzada y las mismas se representan como EXC.

En el sector este (Corrientes, Gualaguaychú y La Plata) se observa la mayor variabilidad de SH y ocurrencia de excesos, debido a los altos valores de P-EP. Estas estaciones se caracterizan por una mayor persistencia en la ocurrencia de excesos dada por el mayor porcentaje en la categoría EXC(CC), profundizándose hacia el noreste. En el sector occidental, la condición

de déficit es la que predomina. En particular, bajo condiciones de P-EP positivas, prevalecen las condiciones de equilibrio durante el semestre frío en Gral Pico, Río Cuarto y Tres Arroyos. En el caso de Pehuajó y Ceres, la mayor dispersión de EXC durante el semestre cálido es semejante a la variabilidad de las estaciones orientales y la baja variabilidad durante el semestre frío se asimila a las estaciones occidentales (Figuras 4 y 5).

Por lo tanto, algunas regiones se caracterizan por una condición específica de SH en

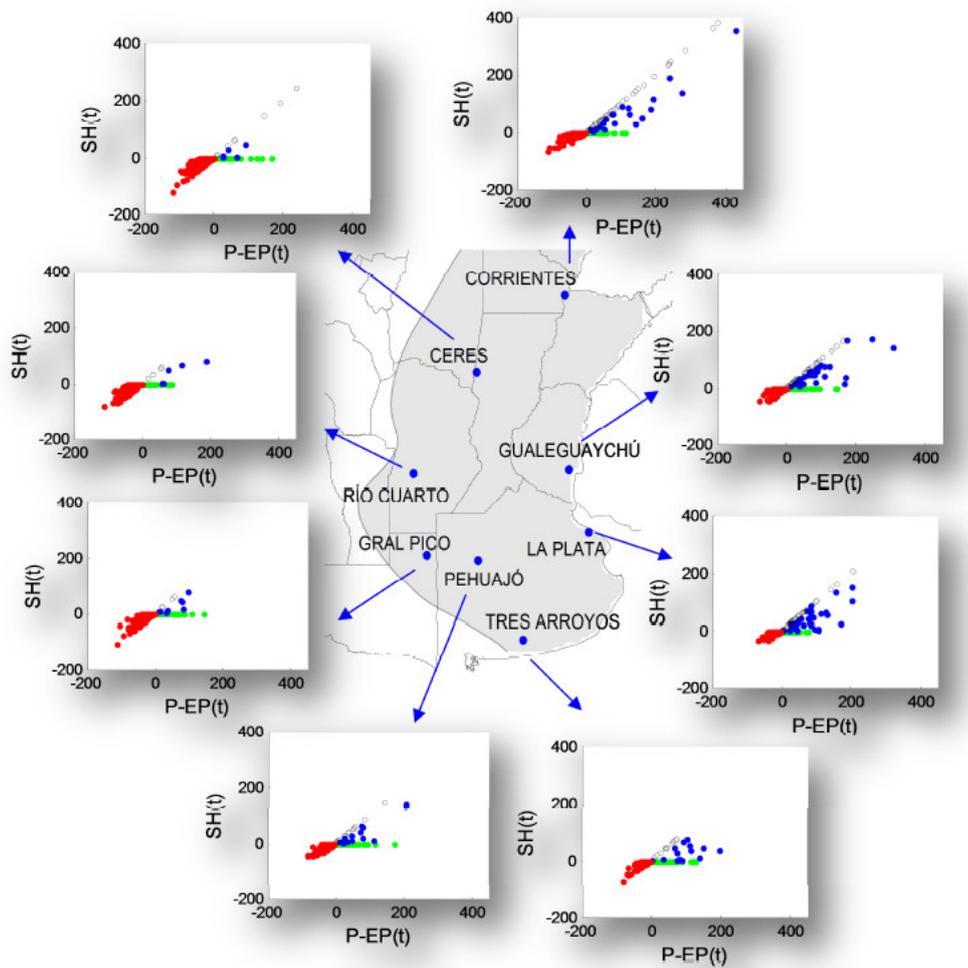


Figura 5: Diagrama de dispersión de la situación hídrica $-SH$ (mm)- en función de la diferencia entre la precipitación acumulada y la evapotranspiración potencial (P-EP en mm) para el semestre frío del período 1970-2006. Los puntos están clasificados en los distintos casos que integra la SH: EXC en azul, EXC(CC) en negro, DEF en rojo y EQ en verde.

determinadas épocas del año mientras que, en general, la región de estudio se caracteriza por una SH muy variable. Dicha variabilidad es una de las principales fuentes de vulnerabilidad de la actividad agropecuaria, principalmente en el sector marginal occidental.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La diversidad de factores que afectan la disponibilidad hídrica y la variabilidad de cada uno de ellos determinan la complejidad del sistema suelo-atmósfera. Entre ellos, la precipitación constituye el aporte más

importante de agua al suelo. El aumento de la precipitación observado en los últimos años favoreció la expansión de la superficie sembrada, principalmente en el área marginal occidental más seca de Argentina. Afortunadamente, la adopción de técnicas agrícolas destinadas a mejorar el uso eficiente del agua que acompañó esta expansión, incrementó la sustentabilidad del sistema y la productividad de los cultivos. En este contexto, el estudio de la interacción entre el suelo y la atmósfera ayudará a comprender, en parte, este sistema. Una de las formas de llevar a cabo este estudio es a través del análisis del balance hídrico del suelo. En

el presente trabajo se analizó la variabilidad de la evapotranspiración potencial (EP) y la precipitación (P), y la respuesta de la situación hídrica mensual (SH) del suelo cubierto de pradera, estimada a partir de los componentes del balance hídrico, en la región oriental de producción agrícola de secano de Argentina.

Los cultivos presentan una fuerte dependencia de las condiciones hídricas del suelo, debido a que en la región de estudio se lleva a cabo una agricultura sin riego. A los efectos de discutir la aplicación de los resultados en la región, se tiene en cuenta cuáles son las necesidades específicas de los cultivos de verano (maíz, girasol y soja) e invierno (principalmente del trigo) en sus distintas etapas fenológicas. Para la descripción que se realiza a continuación se consideraron, para los cultivos de verano, las fechas medias de siembra (primavera); floración-comienzo de fructificación (verano) y cosecha (otoño). A su vez, fin de otoño-comienzo de invierno coincide con la fecha media de siembra del trigo y otros cereales invernales.

Desde este punto de vista, la importancia para los cultivos del desbalance entre oferta (P) y demanda (EP) depende de la época del año en la que ocurre. En términos medios, se observaron diferencias negativas entre la Precipitación acumulada mensual y la Evapotranspiración Potencial mensual (P-EP) en casi toda la región durante los meses de verano, culminando el desecamiento edáfico en el mes de febrero (Pascale y Damario, 2004). Con esta consideración, si bien el aumento de las lluvias observado en los últimos años favorecería a los cultivos de verano (por una mayor entrada de agua al sistema), los valores de P-EP dan evidencia de que no se satisface la totalidad de los requerimientos. De este modo, las condiciones climáticas tienden a ser limitantes para el correcto abastecimiento de agua de los diferentes cultivos. En efecto, en los cultivos de cosecha de granos es clave contar con una buena provisión de recursos para la generación de rendimiento en el momento en que dichos granos se están generando en la planta.

En particular, el balance hídrico incorpora inmediatamente el agua de lluvia al almacenaje total del suelo que puede estar muy seco y, por lo tanto, la misma se considera fuertemente retenida como para que se evapotranspire. Sin embargo, en su drenaje hacia las capas más profundas, atravesando áreas ocupadas por las raíces de las plantas, esta agua está disponible para el cultivo, a veces por varios días, anulando o atenuando el estrés hídrico del cultivo en el período crítico. Si esto no se cumple durante dicho período crítico, el número de granos por unidad de superficie se verá comprometido, en muchos casos de manera irreversible.

Con respecto al ciclo anual de P-EP, en marzo comienza la recarga de agua en el suelo debido fundamentalmente a la disminución de la EP y al aumento de las precipitaciones. Esta etapa coincide con la cosecha de los cultivos estivales, crítica respecto a los excesos hídricos, y la preparación de la cama de siembra para los cultivos de ciclo invernal. De esta manera, los meses de otoño son claves para la recarga de agua del suelo para los meses que continúan. Durante marzo y abril se observaron los valores más altos de P-EP en casi toda la región, salvo el sector sudeste. Allí, los mayores valores se observaron en el invierno y la primavera, lo que explica el protagonismo de la producción de trigo en el sudeste de Buenos Aires (www.bolsadecereales.com). Entre mayo a junio (siembra temprana del trigo) y julio a septiembre (período vegetativo), P-EP se va reduciendo. En septiembre, los aumentos de precipitación acompañan el período de floración y comienzo de fructificación (unos 20 días aproximadamente) de los cultivos de invierno. Ésta constituye la etapa crítica respecto a la disponibilidad hídrica y a las heladas. En el oeste comienza el decrecimiento de humedad del suelo con P-EP negativa que avanza gradualmente hacia el este hasta cubrir casi toda la región de estudio en el verano. A su vez, el suelo se prepara para la siembra de los cultivos de ciclo estival.

En cuanto a la distribución espacial de P-EP,

la región que presenta las mejores condiciones hídricas estivales es la que hoy está ocupada preferentemente por los cultivos de maíz y soja, exigentes en agua durante el verano. Mientras que hacia el sudoeste son frecuentes las sequías estivales, y es donde el girasol tiene mejor comportamiento. En cambio, el noroeste, caracterizado por sequías a fines de invierno y principios de primavera, es poco favorable para cultivos invernales como el trigo, que no tienen casi limitantes hídricas en el resto de la región.

De acuerdo al comportamiento del desvío estándar de P-EP, la mayor variabilidad se observa durante el semestre cálido y hasta el mes de abril, principalmente en el sector noreste. En el sector sur, el gradiente de variabilidad (oeste-este) es opuesto al gradiente de valores medios durante los meses de verano. Como consecuencia, se identificaron estaciones en donde predominan los casos de humedad excesiva al este en el semestre frío y casos de humedad insuficiente al oeste en el semestre cálido. En las demás estaciones se presenta similar porcentaje de P-EP positivo y negativo.

El análisis de los diagramas de dispersión pone de manifiesto la complejidad de la relación entre la SH y P-EP del mes correspondiente. En las estaciones analizadas al este, se alcanza con mayor facilidad las condiciones de excesos ya que los valores de P-EP, sumados al almacenaje de agua en el suelo, superan más frecuentemente la capacidad del campo del suelo. Por otro lado, las estaciones occidentales permanecen en condiciones de equilibrio en un mayor porcentaje, principalmente durante el semestre frío. La zona de transición se caracteriza por una alta estacionalidad, en la cual la dispersión de los excesos es similar a la zona oriental en los meses cálidos y a la occidental en los meses fríos.

La mayor fuente de variabilidad del balance hídrico es la precipitación, por lo cual se deben considerar especialmente los cambios observados que modifican considerablemente el contenido de agua en el suelo. Conociendo el grado de dispersión, a partir de un escenario proyectado,

se puede inferir el comportamiento de la SH de forma tal que la producción agropecuaria pueda mejorar las estrategias de adaptación.

A partir del estudio realizado en este trabajo, es posible explicar la respuesta hídrica del suelo frente a la variabilidad del clima, analizada a través de la temperatura y la precipitación. En términos agrícolas, la variabilidad climática es el principal componente de riesgo asociado al rendimiento de los cultivos. Este estudio puede ser complementado con el análisis de otras variables de manejo (fecha de siembra, densidad, período de barbecho, etc.) constituyendo una herramienta para definir la estrategia de cultivo, enmarcado en una matriz de riesgo. A su vez, el análisis podría ser utilizado en modelos de gestión y planificación de la agricultura en una de las regiones más importantes de la Argentina, en donde los cultivos dependen fuertemente de las condiciones climáticas.

Agradecimientos: A los proyectos UBA 01/W789 y 200200100100477; CONICETPIP0227 y CLARIS LPB (European Community's Seventh Framework Programme under Grant Agreement No. 212492) por financiar este trabajo. Al Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA), la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas (FAUBA) y el Consejo Nacional de investigaciones Científicas y Tecnológicas. Al Servicio Meteorológico Nacional y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria por la provisión de datos. Los autores agradecen los comentarios de un revisor anónimo que contribuyeron a mejorar este trabajo.

ANEXOS

A partir de los valores mensuales de la $P(t)$ y la $EP(t)$ estimada, mencionadas en el trabajo, los componentes del Balance Hidrológico Mensual Seriado se estimaron de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

1) Evapotranspiración Real (ETR)

$$ETR(t) = \begin{cases} P(t) + |ALMA(t) - ALMA(t-1)| & \text{si } P(t) - EP(t) < 0 \\ EP(t) & \text{si } P(t) - EP(t) \geq 0 \end{cases}$$

2) Almacenaje (ALMA)

$$ALMA(t) = \begin{cases} ALMA(t-1)e^{\frac{P(t)-EP(t)}{CC}} & \text{si } P(t) - EP(t) < 0 \\ CC & \text{si } P(t) - EP(t) > 0 \text{ y} \\ & P(t) - EP(t) + ALMA(t-1) > CC \\ P(t) - EP(t) + ALMA(t-1) & \text{si } P(t) - EP(t) \geq 0 \text{ y} \\ & P(t) - EP(t) + ALMA(t-1) \leq CC \end{cases}$$

3) Exceso (EXC)

$$EXC(t) = \begin{cases} ALMA(t-1) + P(t) - EP(t) - CC & \text{si } P(t) - EP(t) + ALMA(t-1) > CC \\ 0 & \text{si } P(t) - EP(t) > 0 \text{ y } P(t) - EP(t) + ALMA(t-1) < CC \\ 0 & \text{si } P(t) - EP(t) \leq 0 \end{cases}$$

4) Déficit (DEF)

$$DEF(t) = EP(t) - ETR(t)$$

Reemplazando la ETR en la ecuación de DEF, se puede obtener la estimación del déficit mensual en función de las variables de entrada y el almacenaje:

$$DEF(t) = \begin{cases} EP(t) - P(t) - |ALMA(t) - ALMA(t-1)| & \text{si } P(t) - EP(t) < 0 \\ 0 & \text{si } P(t) - EP(t) \geq 0 \end{cases}$$

Integrando el exceso y el déficit en una sola variable, denominada situación hídrica (SH=exceso - déficit), se obtiene:

$$SH(t) = \begin{cases} ALMA(t-1) + P(t) - EP(t) - CC & \text{si } P(t) - EP(t) + ALMA(t-1) > CC \\ 0 & \text{si } P(t) - EP(t) \geq 0 \text{ y } P(t) - EP(t) + ALMA(t-1) \leq CC \\ P(t) - EP(t) + |ALMA(t) - ALMA(t-1)| & \text{si } P(t) - EP(t) < 0 \end{cases}$$

REFERENCIAS

- Boulanger, J.P., Leloup, J., Penalba, O., Rusticucci, M., Lafon, F. y Vargas W., 2005. Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: Long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Climate Dynamics*, 24, 393-413.
- Burgos, J. y Corsi, W., 1970. Comprobación de métodos de simulación de balances de agua computados con datos meteorológicos. *Bol. Tec. 57. La Estanzuela. Uruguay.*
- Camargo, A.P., Marin, F.R., Sentelhas, P. C. y Giarola Piccini, A., 1999. Ajuste de equação de Thornthwaite para estimar la evapotranspiración em climas arido y superhumedo, com base na amplitude térmica diaria. *Rev. Bras. Agrometeorología*, 7, 2: 251-257.
- Dirmeyer, P.A, Schlosser, C.A. y Brubaker, K.L., 2009. Precipitation, Recycling, and Land Memory: An Integrated Analysis. *Journal of Hydrometeorology*, volume 10.
- Falasca, S., Ulberich, A. y Mordenti, S., 1998. Constantes hidrológicas de la Provincia de Buenos Aires por dominio edáfico. XVII Congreso Nacional del Agua. 2: 49-56
- Forte Lay, J.A. y Burgos, J.J., 1983. Verificación de métodos de estimación de la variación del almacenaje de agua en suelos pampeanos. Pags 162-180, "La sequía y el hombre" CONICET-National Science Foundation. Taller Argentino-Estadounidense sobre sequías, Mar del Plata.
- Forte Lay, J.A. y Spescha, L., 2001. Método para la estimación de la climatología del agua edáfica en las provincias pampeanas de la Argentina. *Rev. Arg.Agrometeorología* 1(1): 67-74.
- Kagan, R. L., Gandin, L. S. y Smith, T.M., 1997: Averaging of Meteorological Fields. Kluwer Academic Publishers, 279 pp.
- Liebman, B., Vera, C., Carvalho, L.M., Camilloni, I.A., Hoerling, M.P., Allured, D., Barros, V.R., Baez, J. y Idegain, M., 2004: An observed trend central South American Precipitation. *J Climate*, 17, 4357-4367.
- Magrin, G.O., Travasso, M.I. y Rodríguez, G.R., 2005. Changes in Climate and Crop Production during the 20th Century in Argentina Climatic Change. Volume 72, Numbers 1-2, 229-249.
- Minetti, J.L., Vargas, W.M., Poblete, A.G., Acuna, L.R. y Casagrande, G., 2003. Non-linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. *Atmósfera*, 16, 119-135
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment in the stat and movement of water living organism. Symposium of the society for experimental biology, 1964, San Diego. *Symp. Soc. Exp. Biol.*, v19, p205-34,1965.
- Murphy, G.M., 2010. El clima y el crecimiento de la producción agrícola. *El clima. indd. 13:41*
- Murphy, G.M. y Hurtado, R.H., 2006. Variabilidad del límite de la región agrícola de secano en la Argentina. pags 70-71. XI Reunión Argentina de Agrometeorología "La Agrometeorología y el Desarrollo local". La Plata, Bs As, Argentina, 5-8 de septiembre de 2006.
- Murphy, G.M., Hurtado, R.H. y Rodríguez, R.O., 2002. Evaluación de una modificación del cálculo de la evapotranspiración potencial por la metodología de Thornthwaite para su aplicación en la región pampeana. 9º Reunión Argentina de Agro. Vaquería, Córdoba. Vol 1, 175-176.
- Pántano, 2011. Análisis de las Condiciones Hídricas de la región oriental argentina de producción agrícola en secano. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera. Universidad de Buenos Aires.
- Pascale, J.Y. y Damario, E.A.,1977. El Balance Hidrológico Seriado y su utilización en estudios agroclimáticos. *Rev. Fac. Agron. La Plata (3a época)*, 53 (1-2): 15-34
- Pascale, J.Y. y Damario, E.A.,2004. Bioclimatología agrícola y agroclimatología. FAUBA. Pags 327-360
- Penalba O., Rivera J. y Pántano V., 2013. The CLARIS LPB database: constructing a long-term daily hydrometeorological dataset for La Plata Basin, Southern South America.

- Enviado a Geoscience Data Journal.
- Penalba, O.C. y Robledo, F., 2010. Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change* 98:531–550
- Penalba, O.C. y Vargas, W.M., 2004. Interdecadal and Interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina .Changes in the extreme precipitation seasonal cycle. *Int. J. Climatology*, 24, 12, 1565-1580.
- Penalba, O.C. y Vargas, W.M., 2008. Review. Variability of low monthly rainfall in La Plata Basin. *Meteorological Applications* 15: 313–323.
- Penman, H. 1948. Natural evapotranspiration water, base soil and grass. *Proc. Royal Soc. Am. London*. 193: 120-143.
- Planchuelo-Ravelo, 1988. Relaciones hídricas entre las plantas y el medio ambiente. *Evapotranspiración y Balance Hídrico. Manual teórico. AADA y UNRC. Seminario desarrollado el 10 y 11 de diciembre de 1987, Córdoba.*
- Ratto, 2000. *Agua del Suelo. Principios de Edafología con énfasis en suelos argentinos. Editorial Facultad Agronomía. 2da edición.*
- Rusticucci, M. y Barrucand, M., 2004. Observed Trends and Changes in Temperature Extremes over Argentina. *Journal of climate. Notes and Correspondence. American Meteorological Society.* pags 4099-4107
- Spescha, L., Murphy, G., Hurtado, R. y Fernandez Long, M., 2009. Evidencias del Cambio Climático sobre las Variables Agrohidrológicas en la Region Oriental de Secano (Argentina). XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, septiembre 2009. Belo Horizonte, MG
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geog. Review*. 38: 55-94
- Thornthwaite, C.W. y Mather, J.R., 1957. *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Drexel Institute of technology. Publications in Climatology. Vol. X. N° 3.* 185-311.
- Vargas, W. M. y Levinsky, A. E., 1976. *Métodos de análisis de las condiciones hídricas mediante técnicas de balance. Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas. INCYTH. Argentina. Buenos Aires. 556.1. VARm.*

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.