
Déficit y exceso hídrico bajo un clima variable, sudoeste bonaerense, Argentina

Déficit e excesso de água sob um clima variável, sudoeste de Buenos Aires, Argentina

Water deficit and excess under a variable climate, southwestern Buenos Aires, Argentina

Ana Casado¹ y Federico Ferrelli²

¹ Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) / CONICET

² Instituto Argentino de Oceanografía (IADO) / CONICET

Bahía Blanca, Argentina

ana.casado@uns.edu.ar; fferrelli@criba.edu.ar

Casado: <https://orcid.org/0000-0003-4480-3756>

Ferrelli: <https://orcid.org/0000-0002-5623-8929>

Resumen

Este estudio evalúa el balance entre déficits y excesos hídricos en función de la variabilidad espaciotemporal del clima en el sudoeste bonaerense (1981-2020). Se combina el balance hídrico climático con análisis geoespacial y estadístico para determinar unidades hídrico-climáticas desde una perspectiva sistémica y dinámica. El balance entre déficits y excesos y la variación anual de la humedad efectiva configuran diez unidades que resultan del complejo de gradientes de variación de la precipitación (P) y la evapotranspiración (ETP). P exhibe marcada variabilidad espaciotemporal con tendencia negativa y disminución de medias anuales en el sector centro-norte. La ETP evidencia tendencias positivas e incremento de medias anuales excepto por el sector semiárido austral. Ello resulta en una disminución de los excesos y en un incremento de los déficits desde la década de 2000 y advierte sobre la vulnerabilidad de los sistemas hídricos regionales frente a la variabilidad y el cambio del clima.

PALABRAS CLAVE: disponibilidad de agua; déficit y exceso hídrico; variabilidad climática.

Resumo

Este estudo avalia o equilíbrio entre déficits e excessos de água com base na variabilidade climática espaço-temporal no sudoeste de Buenos Aires (1981-2020). O balanço hídrico climático é combinado com a análise geoespacial e estatística para determinar as unidades hidroclimáticas a partir de uma perspectiva sistêmica e dinâmica. O balanço entre déficits e excessos e a variação anual da umidade efetiva configuram dez unidades que resultam do complexo de gradientes de variação da precipitação (P) e da evapotranspiração (ETP). A P apresenta acentuada variabilidade espaço-temporal com tendência negativa e médias anuais decrescentes no setor centro-norte. A ETP mostra tendências positivas e médias anuais crescentes, exceto no setor semi-árido do sul. Isso resulta em uma diminuição dos excessos e um aumento dos déficits desde os anos 2000 e alerta sobre a vulnerabilidade dos sistemas hídricos regionais à variabilidade e às mudanças climáticas.

PALAVRAS-CHAVE: disponibilidade hídrica; déficit e excesso hídrico; variabilidade climática.

Abstract

This study evaluates the balance between water deficit and surplus based on the spatiotemporal variability of climate in South-western Buenos Aires (1981-2020). The analysis combines the Thornthwaite water balance with geospatial and statistical techniques to determine hydroclimatic units from a systemic and dynamic perspective. The balance between water deficit and surplus and the annual variation of effective humidity configure ten units resulting from complex precipitation (P) and evapotranspiration (ETP) gradients. P exhibits marked spatiotemporal variability, with decreasing trends and decreasing annual means in the central-northern sector. ETP shows increasing trends and increasing annual means, except for the southern semi-arid sector. This results in decreasing water surplus and increasing deficits since the 2000s and informs about the vulnerability of regional water systems to climate variability and change.

KEYWORDS: water availability; water deficit and surplus; climate variability.

1. Introducción

La escasez de agua constituye una problemática creciente a escala global. Actualmente, el 34% de las naciones del mundo exhibe niveles de estrés hídrico superiores al umbral seguro y, entre estas, el 44% se halla bajo niveles altos a críticos (FAO y UNWater, 2021). Ello obedece a múltiples cambios demográficos, socio productivos y energéticos (Mishra *et al.*, 2021) lo cual, sumado a la reducción de la cantidad, la calidad y la predictibilidad del agua disponible en el contexto del cambio climático, se traduce en mayores niveles de estrés hídrico a escala global (UNESCO, 2020). Esta situación se hace más crítica al analizar el último informe del IPCC (2021), donde las nuevas estimaciones prevén la posibilidad de cruzar el nivel de calentamiento global de 1,5°C en las próximas décadas, con extremos térmicos que alcanzarían con mayor frecuencia umbrales de tolerancia críticos para la disponibilidad de agua.

Predecir cómo responderán los sistemas hídricos ante el cambio climático requiere de un conocimiento acabado de su estado actual y de su dinámica en un contexto histórico-climático (Gulev *et al.*, 2021). Aunque la literatura acredita numerosos avances en este campo (Rahaman *et al.*, 2022), muchas regiones carecen aún de los medios y/o las capacidades para evaluar las implicancias de la variabilidad y el cambio del clima en el agua disponible (FAO y UNWater, 2021). Ello se debe, en parte, a deficiencias en la recopilación, el tratamiento, la predicción y el intercambio de datos hidroclimáticos básicos y a la consecuente falta de información sobre los diversos parámetros físicos subyacentes. En este contexto, los modelos basados en el balance hídrico mensual han demostrado ser una herramienta valiosa para la evaluación y la predicción de recursos hídricos en regiones pobremente instrumentadas, puesto que funcionan con pocos parámetros y con series de datos que son fácilmente asequibles (Xu y Singh, 1998). Entre estos, el balance hídrico climático de Thornthwaite-Mather (Thornthwaite y Mather, 1955; 1957) ha sido y continua siendo uno de las herramientas más utilizadas, debido a la simpleza

y robustez del método y a la calidad aceptable de sus estimaciones (Mammoliti *et al.*, 2021).

Este estudio implementa el balance hídrico climático para evaluar la variabilidad espacial y temporal de déficits y excesos hídricos en la región argentina del sudoeste bonaerense (1981-2020). El objetivo de la investigación fue doble e implicó, por un lado, avanzar hacia la comprensión del potencial hídrico de una región pobremente instrumentada y sujeta a marcada variabilidad hidroclimática (Aliaga *et al.*, 2017; Casado y Campo, 2019; Ferrelli *et al.*, 2019; Maenza *et al.*, 2017), donde la escasez de agua se hace cada vez más evidente debido no solo al incremento sostenido de la demanda, sino también al incremento de las temperaturas extremo positivas evidenciado desde 1960 (Ferrelli *et al.*, 2021).

Por otro lado, el estudio busca proveer una primera aproximación para la regionalización del agua disponible a escala regional, desde una perspectiva que contempla la relación sistémica entre el clima y el agua disponible en el suelo, así como su dinámica en espacio y tiempo. Estos resultados proveen una plataforma de respaldo para derivar futuras estimaciones hidrológicas y, en consecuencia, constituyen uno de los pilares necesarios para la delimitación de unidades hídricas estratégicas para la evaluación y la planificación integrada del agua en la región.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El sudoeste bonaerense (SOB) integra los 22 partidos que conforman la Sexta Sección Electoral de la Provincia de Buenos Aires (FIGURA 1). El SOB configura una región predominantemente rural con base económica en la agricultura y la ganadería extensiva, desempeñando un rol importante en la producción nacional (Sili, 2000). Excepto por los partidos de Bahía Blanca y Coronel de Marina Leonardo Rosales, que constituyen el centro urbano-productivo regional, la densidad de población es mediana a baja, manteniéndose por debajo de 5 hab/km² sobre 80% del territorio.

2.2 Materiales

La deficiencia de registros hidroclimáticos a escala regional, en términos de calidad temporal y densidad espacial, constituye una limitante para el análisis de variabilidad espaciotemporal propuesto. Así, se utilizaron las series de precipitación global del Centro Mundial de Climatología de las Precipitaciones (GPCC, por sus siglas en inglés), (Schneider *et al.*, 2022) y las series globales unificadas de temperatura producidas del Centro de Predicción Climática (CPC) del *Physical Science Laboratory* (NOAA). Ambos conjuntos de datos se encuentran entre los más consistentes a escala global (Sun *et al.*, 2018), exhiben buen ajuste en relación con los registros disponibles a escala regional (Casado y Picone, 2018) y poseen buena resolución espacial con coordenadas de grilla equivalentes (0,5° lat/lon).

Si bien la resolución temporal difiere según las series, fue posible obtener datos continuos y concurrentes de precipitación y temperatura media mensual a lo largo de 40 años (periodo 1981-2020) para 56 puntos de observación distribuidos uniformemente en el área de estudio.

2.3 Balance hídrico climático

Se calculó el balance hídrico climático (BHC), (Thornthwaite y Mather, 1955; 1957), a paso mensual y de forma continua a lo largo del periodo de información concurrente disponible (1981-2020) y para cada uno de los 56 puntos de la grilla. La evapotranspiración potencial (ETP) se estimó en función de la temperatura media, el índice de calor y los factores de corrección por latitud desarrollados por Thornthwaite (1948). Para cada mes se determinó el contenido de humedad en el suelo (St_0) en función del contenido de humedad del mes precedente y el balance entre aportes y demanda de agua ($P-ETP$). Si $P < ETP$, se inicia una fase de uso del agua contenida en el suelo siempre que $ETP < P + St_0$. Caso contrario se inicia una fase de déficit hídrico (d), cuya magnitud designa la necesidad de agua que no pudo ser satisfecha por el agua disponible para un determinado mes (o periodo de meses

consecutivos). Los meses o periodos de balance negativo, ya sea correspondan a fases de uso o déficit, se revierten cuando $P > ETP$. En estos casos, el excedente de agua disponible inicia una *fase de recarga* de agua en el suelo que se mantendrá hasta tanto $P < ETP$ o bien, hasta tanto se alcance la capacidad de retención de agua en el suelo (S), lo que se traduce en exceso hídrico (s).

El parámetro S no solo determina la máxima capacidad de retención de agua en el suelo a partir de la cual se computa un exceso hídrico, sino también el máximo potencial de agua utilizable en periodos de déficit. Así, cuanto mayor sea la capacidad de retención de agua de los suelos de una región, menor será su susceptibilidad frente a la variabilidad del clima (o viceversa). En la práctica, S se establece con base en el conocimiento experto de las características geográficas, geológicas y climáticas del área de estudio (Mammoliti *et al.*, 2021). Dentro de la gama de metodologías formales para estimar el valor de S , este estudio utiliza la transformada del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos de los EEUU, asumiendo que $S = 254/100 \text{ CN}$ (NRCS, 2004). Los valores de CN fueron ponderados por método de Thiessen para cada punto de la grilla de análisis a partir del mapa global de 250 m de resolución (GCN250) desarrollado por Jaafar *et al.* (2019).

La disponibilidad de agua regional se determinó en base al balance entre déficits (d) y excesos (s) y en relación con la demanda hídrica (ETP), como sigue:

$$Im = Ih - 0,6Ia, \quad Ih = 100 \frac{s}{ETP}, \quad Ia = 100 \frac{d}{ETP} \quad (1)$$

donde Im es el Índice Hídrico, Ih es el Índice de humedad e Ia es el índice de Aridez (Thornthwaite, 1948). La dirección y la magnitud que alcanza el Im determinan la relación entre el agua disponible y la necesidad de agua. Si el agua disponible supera las necesidades de agua, entonces $Im > 0$, indicando tipos hídrico-climáticos húmedos que pueden adquirir características perhúmedas para $Im > 100$. Si el

agua disponible no es suficiente para satisfacer las necesidades, entonces $I_m < 0$, indicando tipos hídrico-climáticos secos, cuyo grado de aridez se incrementa junto con la disminución de I_m . La magnitud relativa de los déficits en climas húmedos (I_a) y de los excesos en climas secos (I_h) fue definida con base en los umbrales propuestos por Thornthwaite (1948).

Para cada punto de análisis, se extrajeron series de P , ETP , d y s para tres escalas temporales, incluyendo (i) series anuales, (ii) series normales decádicas y (iii) series normales de 40 años. Asimismo, se calculó el Índice Hídrico resultante para cada escala temporal.

2.4 Análisis de variabilidad hídrico-climática

La variabilidad se evaluó en sus dos dimensiones, espacial y temporal. La variabilidad espacial se abordó por técnicas de interpolación en un sistema de información geográfica (SIG). Se comparó el ajuste de IDW, Kriging, Vecino Natural y *Spline* para determinar el método de interpolación que mejor reproduce la naturaleza de las variables a modelar utilizando una muestra de 28 puntos (ID pares). Los resultados se validaron sobre la muestra remanente (ID impares), para determinar la precisión en la estimación de valores desconocidos. El interpolador Kriging arrojó ajuste perfecto en calibración ($R^2 = 1,00$) y los menores errores en validación, con $R^2 > 0,97$ para todas las variables hidroclimáticas. La variabilidad temporal se determinó por análisis estadístico simple (normal, desvío típico y coeficiente de variación) y por análisis de series temporales, considerando la tendencia (test de Mann-Kendall) y el cambio (test de homogeneidad de Pettitt) de las series. Las unidades hídrico-climáticas fueron definidas por superposición de los patrones espaciales del I_m y por el agrupamiento espacial de puntos con estacionalidad equivalente de déficits y excesos.

3. Resultados

3.1 Patrones de distribución de los componentes del balance hídrico climático

La precipitación media anual (1981-2020) exhibe su máximo en el norte (906 mm en el partido de

Daireaux) y en el este (889 mm en el partido de Benito Juárez) y decrece hacia el SW con un gradiente medio de 1,2 mm/km hasta alcanzar 381 mm en el partido de Patagones (FIGURA 2). La variabilidad interanual es marcada, con desvíos que superan los 100 mm en toda la región y que se incrementan hacia el N, alcanzando 200 mm en los partidos de Pellegrini y Tres Lomas. En términos relativos, sin embargo, los partidos de Villarino y Patagones exhiben los mayores coeficientes de variación, en tanto los desvíos representan entre el 20 y el 30% de la precipitación media anual, respectivamente. Los desvíos de las medias decádicas en relación con la normal del periodo evidencian variaciones que se traducen en la ocurrencia de un periodo más húmedo que normal (1981-2000) y un periodo más seco que normal (2001-2020). La variación decádica de la precipitación es regionalmente homogénea excepto en los extremos N, NE y S, los que exhiben un comportamiento diferencial caracterizado por variaciones de mayor frecuencia.

Los patrones de distribución espacial de la ETP anual son comparativamente más complejos (FIGURA 2). La ETP decrece en sentido N-S de 837 a 759 mm en respuesta al gradiente de disminución térmica junto con el incremento de la latitud (16,6 y 14,5 °C, respectivamente). Esta tendencia se interrumpe en el sector central por efecto del sistema serrano de Ventania, cuya altura media oscila entre 600 y 1.000 msnm y registra, en consecuencia, los mínimos regionales de temperatura y ETP (14,0°C y 740 mm, respectivamente). Paralelamente, se observa un gradiente de incremento de la ETP en sentido E-W que se superpone a los patrones definidos por las condiciones de sitio (latitud y altitud). En términos de variabilidad, el sector NW exhibe los mayores desvíos (hasta 19 mm), aunque en términos relativos el coeficiente de variación es de tan solo 2%. El comportamiento decádico de la ETP evidencia un periodo de marcado calentamiento desde la década de 2000, lo que sugiere un cambio de las series térmicas regionales.

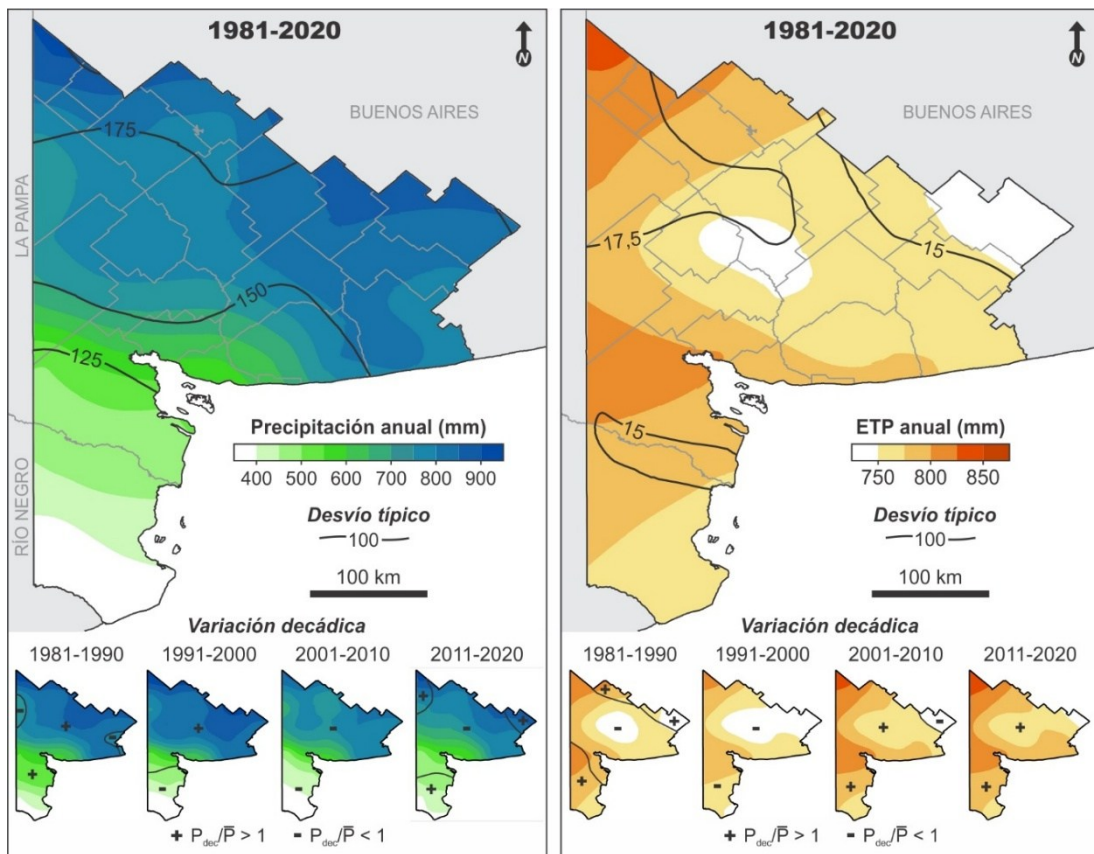


FIGURA 2. Distribución espacial y variabilidad temporal de la precipitación y la ETP anual en el sudoeste bonaerense. Fuente: elaboración propia

El balance de humedad en el suelo que resulta de la relación entre P y ETP separa el SOB en dos ambientes opuestos y bien definidos (FIGURA 3). La mitad NE exhibe excesos hídricos durante al menos un mes a lo largo del año medio ($P - ETP + S_{to} > S$) y el agua disponible supera la totalidad de requerimientos anuales para el 20% de dicho sector. El exceso medio anual promedia 69 mm con máximo de 156 mm en Benito Juárez. La variabilidad interanual es muy marcada y concurrente con la variación de P, alcanzando desvíos típicos superiores a 125 mm en los

extremos N y NE y coeficientes de variación superiores a 90%. Se evidencia una banda de máxima variabilidad coincidente con el límite sur del sector de excesos, donde los desvíos alcanzan hasta 650% de la normal del periodo.

Los patrones de variación decádica obedecen a la influencia combinada de P y ETP, evidenciando una reducción del sector de excesos de hasta 60 km hacia el NE durante el periodo más seco y más cálido que normal (2001-2020).

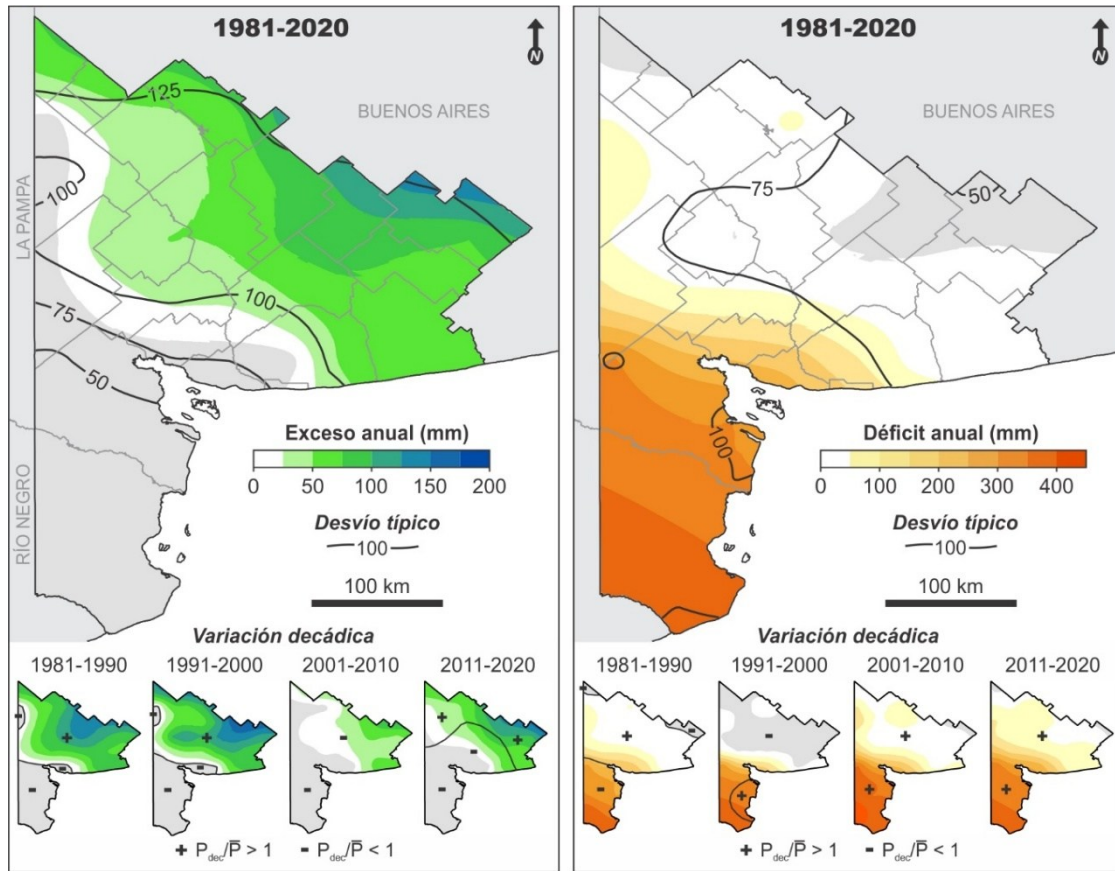


FIGURA 3. Distribución espacial y variabilidad temporal del exceso y el déficit hídrico anual en el sudoeste bonaerense. Fuente: elaboración propia

Si bien la casi totalidad de la región presenta déficit hídrico durante al menos un mes del año medio ($ETP > P + St_0$), la mitad SW del SOB exhibe condiciones moderadas a severas (FIGURA 3). La variación interanual de los déficits es comparativamente menor que la de los excesos, manteniéndose por debajo del 35% de la normal del periodo. La variación decádica obedece igualmente a la influencia combinada de P y ETP. En periodos húmedos y frescos (1991-2000), el alcance territorial del déficit hídrico se circunscribe al extremo SW de la región, mientras que en periodos secos y cálidos (2011-2020), se incrementa no solo en términos territoriales sino

también en términos de magnitud, alcanzando hasta 25 mm en el extremo NE.

3.2 Unidades hídrico-climáticas del sudoeste bonaerense

El Índice Hídrico (Im) que resulta del BHC discrimina tres tipos hídrico-climáticos a escala regional, dos de los cuales exhiben diferencias intrínsecas en relación con la magnitud relativa de déficits y excesos (FIGURA 4). La mitad NE del SOB presenta condiciones húmedas subhúmedas (C2) que se diferencian por la ausencia de déficit en el extremo NE (C2_r) y por la emergencia de un pequeño déficit hacia el SW (C2₁). El tipo seco

subhúmedo (C1) configura una banda diagonal que constituye una zona de transición entre las condiciones húmedas del NE, materializadas por la persistencia de pequeños excesos (C1₁) y las condiciones semiáridas del SW, materializadas por la ausencia de excesos (C1_r). El incremento de la aridez hacia el SW se materializa en el tipo semiárido sin exceso (D_r), donde se registra asimismo déficit hídrico severo.

El agrupamiento de puntos de observación con relación a la estacionalidad de déficits y excesos imprime configuraciones regionales más

complejas (FIGURA 4). La estacionalidad de los excesos separa el tipo húmedo subhúmedo sin déficit (C2_r) en tres unidades. C2_r I reúne los sectores con exceso continuo de mayo a noviembre, aunque el monto medio anual varía entre el sector I-oeste (70 mm) y el sector I-este (136 mm) en razón de los mayores montos de ETP registrados en el primero. En la unidad C2_r II, el exceso se concentra entre agosto y noviembre y alcanza montos medios anuales comparativamente inferiores a los de la clase I este (84 mm).

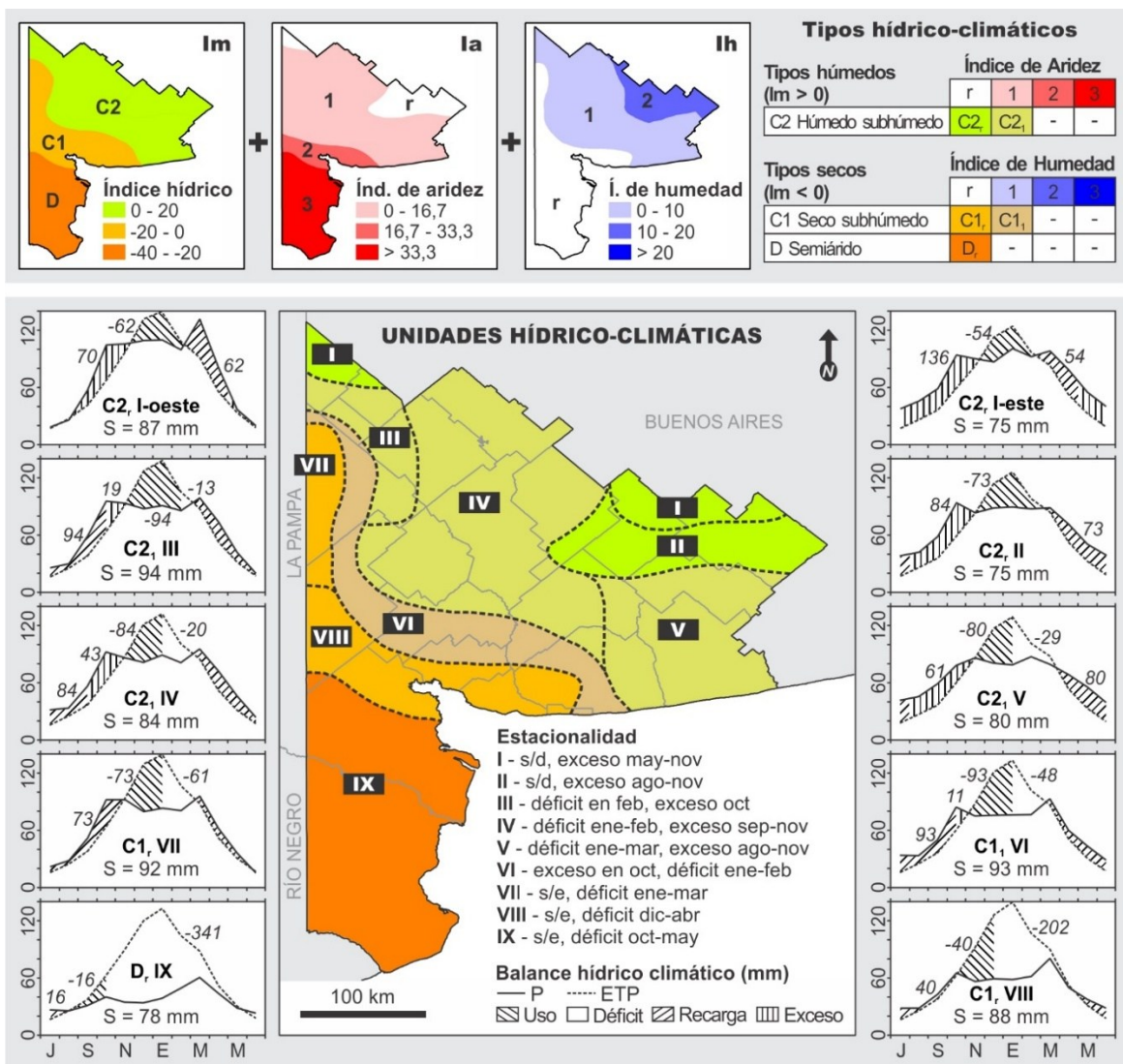


FIGURA 4. Unidades hídrico-climáticas del sudoeste bonaerense. Periodo 1981-2020. Fuente: elaboración propia

En el tipo húmedo subhúmedo C₂₁, el déficit es pequeño y se concentra en el verano. Sin embargo, se evidencian tres unidades hídrico-climáticas caracterizadas por un incremento de la duración de dicho déficit de W a E: un mes (C₂₁ III), dos meses (C₂₁ IV) y tres meses (C₂₁ V). La duración y la magnitud de los excesos se incrementan asimismo de W a E, alcanzando hasta 61 mm anuales en la unidad C₂₁ V y máximos que se adelantan progresivamente de la primavera hacia el invierno.

Las unidades remanentes corresponden a los tipos secos y se diferencian por el incremento progresivo de la duración y la magnitud del déficit hacia el SW. Las unidades C₁₁ VI y C₁₁ VII reúnen los sectores secos subhúmedos que exhiben pequeño déficit hídrico en verano, la primera diferenciada por la existencia de un pequeño exceso en octubre, mientras que la unidad C₁₁ VIII engloba la franja central sin exceso y déficit moderado en verano y otoño. La unidad D_r IX corresponde al sector semiárido, donde el déficit hídrico es severo y se interrumpe únicamente entre junio y octubre.

Con el objetivo de identificar la variabilidad temporal de las unidades hídrico-climáticas identificadas en el SOB, se calculó el BHC medio areal para cada una de ellas con base en series promediadas de P y ETP mensual. A fines de garantizar la legibilidad, los resultados se presentan por conjuntos de unidades que exhiben un comportamiento similar en relación con la tendencia y el cambio de las series a lo largo del periodo de análisis (1981-2020).

El primer conjunto reúne las unidades de clima húmedo subhúmedo del sector E-NE (FIGURA 5.1). El elemento que caracteriza a las tres regiones es la variabilidad de P, lo que se traduce en la alternancia de todos los tipos hídrico-climáticos entre secos subhúmedos y húmedos, alcanzando valores de $I_m > 60$ en CR_r I-este. Paralelamente, las tres regiones exhiben un cambio en las series de ETP anual a partir de 2007, evidenciado por un incremento de la media interanual de entre 10 y 24 mm. Aunque no se registran tendencias ni cambios estadísticamente significativos para las variables remanentes, el cambio de la ETP resulta en un incremento de la frecuencia y la magnitud relativa de los déficits anuales en los tres casos, sugiriendo una mutación de las unidades normales C_{2r} a C₂₁.

3.3 Variabilidad temporal del balance hídrico-climático

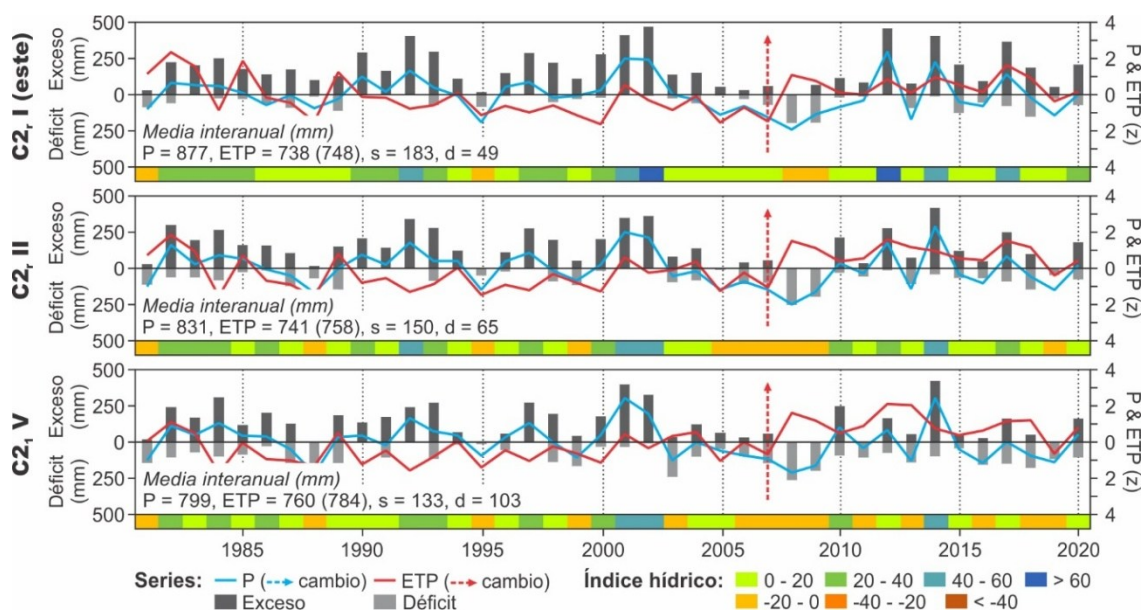


FIGURA 5.1. Variación anual del BHC y tipos climáticos resultantes para las unidades hídrico-climáticas del NE del SOB (1981-2020). Fuente: elaboración propia

El segundo conjunto reúne las unidades hídrico-climáticas del extremo NW (FIGURA 5.2). P y ETP exhiben aquí la máxima variabilidad regional, lo que resulta en la alternancia de todos los tipos climáticos entre semiáridos y húmedos. Otro elemento común a las tres unidades es la tendencia al incremento interanual de la ETP (entre 0,6 y 0,9 mm/año). Ello se combina con un

cambio de la serie en 2002, caracterizado por un incremento de la media interanual de entre 21 y 24 mm. Las variables remanentes no registran tendencias ni cambios estadísticamente significativos, excepto por los déficits anuales en la región C₁ VII, los cuales ven incrementada su media interanual en 82 mm.

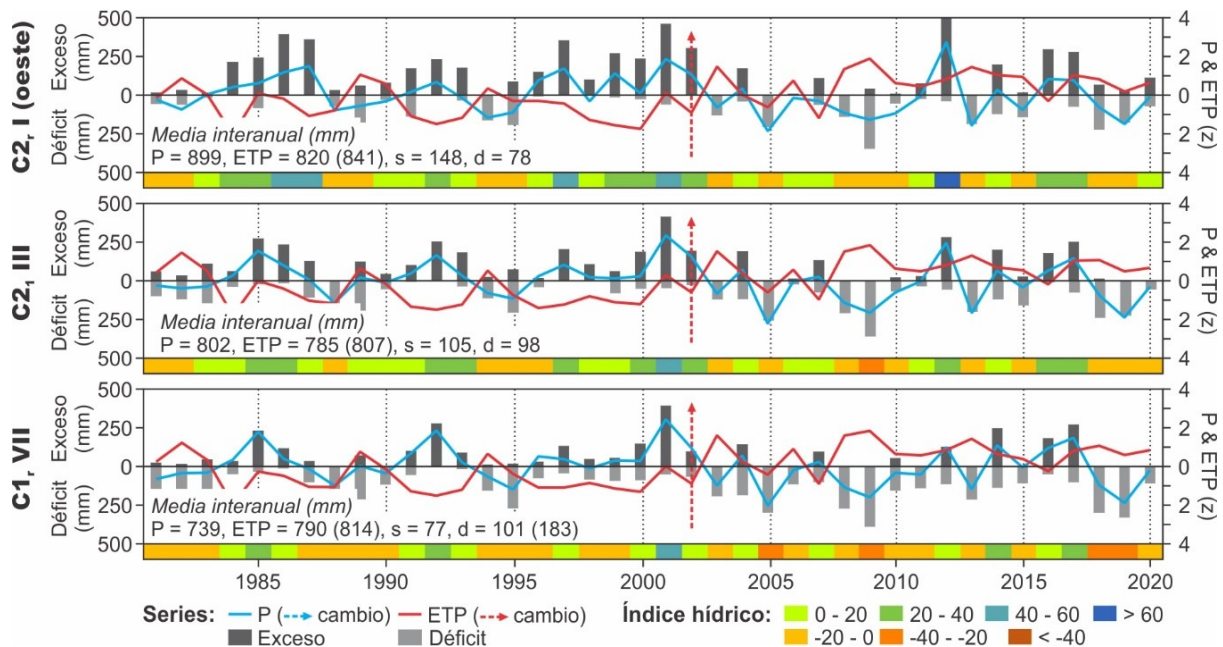


FIGURA 5.2. Variación anual del BHC y tipos climáticos resultantes para las unidades hídrico-climáticas del NW del SOB (1981-2020). Fuente: elaboración propia

El tercer conjunto reúne las unidades hídrico-climáticas centro-regionales (FIGURA 5.3). El elemento común es la tendencia y cambio para todas las variables del BHC. La ETP registra un aumento de entre 0,6 y 0,8 mm/año y un salto de la media interanual en 2000 de hasta 24 mm en la región C₁ VIII. A ello se suma una tendencia al decrecimiento de la precipitación anual de hasta -4,6 mm/año y una reducción de la media interanual de entre 118 y 151 mm a partir de

2004. Los excesos medios anuales se reducen en hasta 61% (a partir de 2002) y los déficits medios anuales se incrementan en hasta 87% (a partir del año 2004).

Paralelamente, se evidencia una mayor recurrencia de tipos hídrico-climáticos secos durante las últimas dos décadas de análisis, lo que sugiere que las normales del periodo 1981-2020 no son adecuadas para describir las condiciones medias de estas regiones

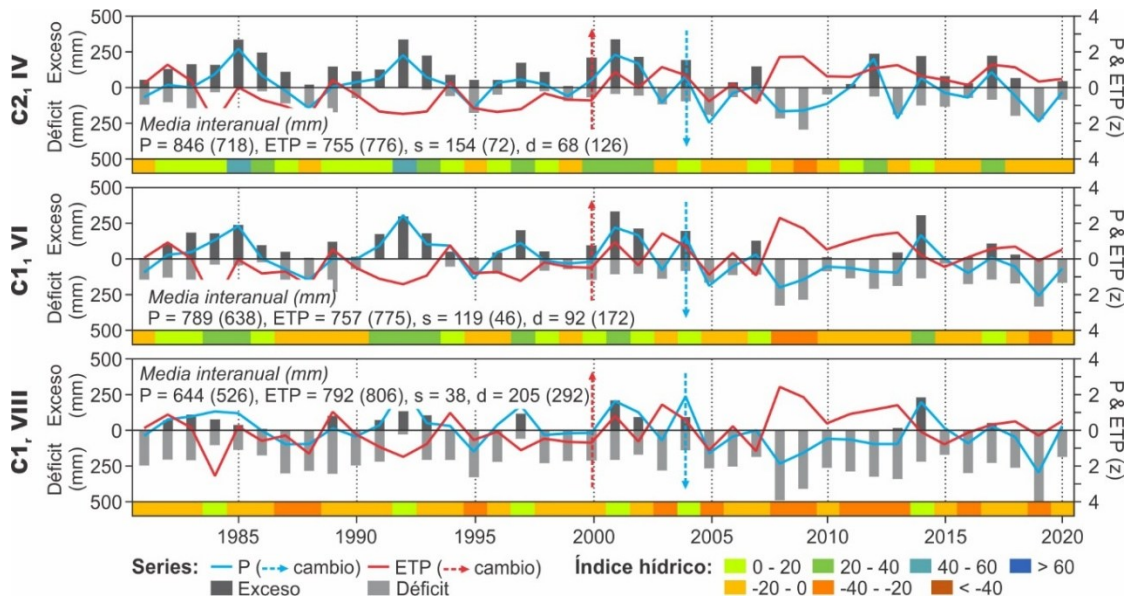


FIGURA 5.3. Variación anual del BHC y tipos climáticos resultantes para las unidades hídrico-climáticas del sector centro-norte del SOB (1981-2020). Fuente: elaboración propia

Finalmente, el sector sur del SOB emerge como una unidad única con características distintivas en relación con el resto de la región (FIGURA 5.4). La ETP media anual es 1,8 veces la precipitación media anual y, si bien los montos anuales de precipitación son variables a lo largo del periodo, no registran tendencias ni cambios significativos,

manteniéndose por debajo de la ETP para los 40 años considerados. Como resultado, los tipos climáticos que resultan del BHC anual se mantienen dentro de los climas secos y exhiben comparativamente menor variabilidad que en las regiones remanentes.

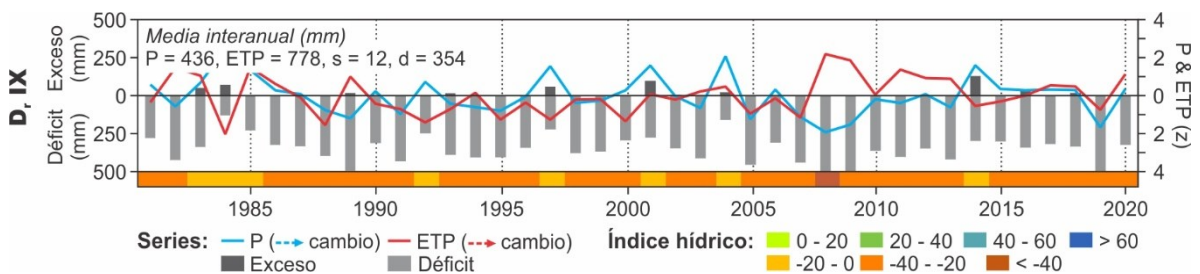


FIGURA 5.4. Variación interanual del BHC anual y tipos climáticos resultantes para el sector SW del SOB (1981-2020). Fuente: elaboración propia

4. Discusión

El agua regional disponible, en términos de exceso y déficit hídrico, configura patrones de distribución complejos que constituyen la

expresión de la variabilidad de P y ETP en espacio y tiempo. P exhibe un marcado gradiente decreciente en sentido NE-SW. Dicho gradiente

es característico de la región (Aliaga *et al.*, 2017; Casado y Campo, 2019; Scarpati y Capriolo, 2013) y obedece a la doble influencia de (i) masas de aire atlánticas que penetran por el NE y descargan su humedad a medida que avanzan sobre el continente y (ii) masas de aire pacíficas que, por subsidencia sobre el flanco oriental de los Andes australes, penetran como masas de aire secas por el SW (Campo *et al.*, 2004; Castañeda y Gonzalez, 2008; Garreaud y Aceituno, 2007). Los patrones de distribución de la ETP son comparativamente más complejos y resultan de la superposición de dos gradientes térmicos que obedecen a los efectos combinados de la latitud (disminución N-S) y la continentalidad (incremento E-W), (Aliaga *et al.*, 2017). El sistema de Ventania interrumpe la continuidad espacial de los gradientes de variación térmica por efecto de la altitud, conformando una isla central de temperatura mínima, a la vez que refuerza el gradiente de variación pluviométrica, imponiendo condiciones más húmedas de lo normal y máximos de precipitación sobre las laderas orientadas al NE (Gil, 2009). Por su parte, las masas de aire cálidas y secas que penetran por el NW inhiben la formación de nubes y favorecen una mayor insolación, realzando los gradientes termo-pluviométricos hacia el oeste de la región (Fernández *et al.*, 2021).

En términos temporales, la variabilidad de P es marcada y alcanza todas las escalas temporales (Aliaga *et al.*, 2017; Casado y Campo, 2019; Ferrelli *et al.*, 2019). Si bien responde a una conjunción de fenómenos atmosféricos y oceánicos (Scian *et al.*, 2006), el fenómeno ENOS emerge como el principal forzante de variabilidad del sureste de Sudamérica (Aceituno, 1988; Andreoli y Kayano, 2005; Grimm, 2011). Asimismo, existe evidencia de forzantes de baja frecuencia, como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), que se traducen en variaciones (inter)decádicas de la precipitación (Kayano y Andreoli, 2007). En la región del SOB, ello queda evidenciado por medias decádicas superiores a la normal del periodo durante los años 80 y 90, en respuesta a un ciclo climático húmedo que ha sido documentado a una variedad de escalas espaciales, incluyendo el extremo sur de

Suramérica (Rusticucci y Penalba, 2000), la Argentina subtropical (Barros *et al.*, 2015; Penalba y Vargas, 2004) y la región pampeana (Aliaga *et al.*, 2017). Durante las dos últimas décadas, la tendencia se revierte y se inicia un ciclo climático seco, con montos medios anuales de precipitación por debajo de la media para la mayoría de la región (Maenza *et al.*, 2017; Pérez *et al.*, 2015), excepto por el sector SW que presenta los extremos pluviométricos más marcados (Aliaga *et al.*, 2017; Ferrelli *et al.*, 2021). Independientemente de ello, solo la porción central del SOB registra un cambio en las series de precipitación anual, caracterizado por un descenso de la media interanual en el año 2004 de hasta 19%. Paralelamente, si bien la variabilidad de la ETP es comparativamente menos marcada que para P, las series exhiben un cambio en la década de 2000 para toda la región excepto por el extremo SW. Ello obedece a un incremento significativo de la temperatura máxima y una reducción de la temperatura mínima de hasta 0,6 y 0,3°C, respectivamente (Ferrelli *et al.*, 2019) y a un aumento significativo de las olas de calor (Barros *et al.*, 2015). Asimismo, ha sido documentado que la década del 2000 emerge como la más cálida desde 1850 a escala mundial (WMO, 2013).

Además de repercutir en la cantidad de agua disponible a escala regional, lo que se manifiesta en una disminución de los excesos y en un incremento de los déficits, el cambio de las series de P y ETP advierte asimismo sobre la probabilidad de migración de las isohietas hacia el norte y de la migración de las isoterms hacia el sur bajo distintos escenarios de cambio climático (Elguindi *et al.*, 2014; Ferrelli *et al.*, 2020). En este sentido, mientras que los cambios en los patrones termo-pluviométricos registrados durante la segunda mitad del siglo XX favorecieron los rendimientos de los cultivos regionales y la extensión de la frontera de cultivos de secano hacia el SW (Magrin *et al.*, 2005; Magrin *et al.*, 2009; Volante *et al.*, 2015), es de destacar que dichas tendencias parecen revertirse desde principios del siglo XXI (Maenza *et al.*, 2017; Pérez *et al.*, 2015). En efecto, dicho periodo registra una de las peores sequías de la

historia (2007-2009), con fuerte impacto en la producción del sector agrícola (WMO, 2013). Esto último evidencia la vulnerabilidad de los sistemas socio productivos regionales ante la variabilidad natural del clima y los posibles impactos del cambio climático y advierte sobre la importancia de diseñar medidas de adaptación y mitigación (Maenza *et al.*, 2017).

4.1. Perspectivas de investigación

En los casi 80 años transcurridos desde su desarrollo, el BHC se convirtió en una herramienta valiosa para evaluar el potencial hídrico de diversas cuencas y, si bien se han logrado avances en el cálculo del balance para cada componente del ciclo hidrológico (Rahaman *et al.*, 2022), el método de Thornthwaite-Mather sigue siendo uno de los más utilizados (Mammoliti *et al.*, 2021). Sin embargo, es importante destacar que el BHC constituye el balance de agua en el suelo (Westenbroek *et al.*, 2010) y ha sido tempranamente demostrado que no todo el agua excedente se encuentra inmediatamente disponible para escurrimiento superficial o recarga subterránea (Steenhuis y Van der Molen, 1986). Por ejemplo, la predicción de la escorrentía superficial requiere que una cierta porción se traslade de un mes al siguiente (Mather, 1981) y, paralelamente, cabe la posibilidad que los eventos de lluvia a corto plazo y en tiempo discreto no sean necesariamente representados por los factores climáticos mensuales que intervienen en el BHC (Ferguson, 1996).

Asimismo, el exceso hídrico mensual que se transforma en escorrentía superficial suele establecerse en 50% (Wolock y McCabe, 1999), proporción que no necesariamente representa la realidad hidrológica de las principales cuencas del área de estudio (Carrica y Lexow, 2004; López *et al.*, 2023; Luque *et al.*, 1979). Por su parte, el BHC no considera los tiempos de atenuación del escurrimiento subsuperficial y subterráneo (Steenhuis y Van der Molen, 1986; Westenbroek *et al.*, 2010), factores que han demostrado tener un peso preponderante en la recarga de agua al acuífero regional (Carrica y Lexow, 2004). Así, futuros esfuerzos de investigación deberán

abocarse a la determinación de parámetros hidrológicos que promuevan la correcta estimación del escurrimiento superficial y de la recarga subterránea a partir de los resultados del balance hídrico climático implementado aquí.

5. Conclusiones

Este estudio provee una regionalización del agua disponible en el sudoeste bonaerense en función de la variabilidad del clima (1981-2020), con base en el balance hídrico climático de Thornthwaite-Matter. El balance entre déficits y excesos y la variación anual de la humedad efectiva permitieron reconocer hasta diez unidades hídrico-climáticas que separan el sector NE, donde el agua disponible excede los requerimientos a lo largo de todo el año (climas húmedos subhúmedos), del sector SW, donde los requerimientos de agua exceden al agua disponible durante la mayoría de los meses del año (climas semiáridos).

Estas unidades constituyen la expresión de los regímenes termo-pluviométricos regionales y resultan de un complejo de gradientes de variación espacial de P y ETP. Paralelamente, la variabilidad temporal de P y ETP define escenarios futuros complejos. Estos evidencian una tendencia general al incremento de la ETP desde la década de 2000 y una tendencia a la disminución de las precipitaciones que se concentra en el sector central, aunque la variabilidad interanual se presenta muy marcada en toda la región.

Estos resultados dan continuidad a estudios previos regionales y advierten sobre la vulnerabilidad de los sistemas hídricos regionales frente a la variabilidad y el cambio del clima. Asimismo, se evidencia la practicidad en la adopción del balance hídrico climático en regiones pobremente instrumentadas, donde los datos mensuales de P y ETP resultan más fácilmente asequibles que las series climáticas de mayor frecuencia y/o complejidad y, sobre todo, cuando se considera que la escala de tiempo mensual es frecuentemente suficiente para evaluar y planificar los recursos hídricos en el contexto de la variabilidad y el cambio del clima.

6. Referencias citadas

- ACEITUNO, P. 1988. "On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate". *Monthly Weather Review*, 116(3): 505-524.
- ADA 2017. *Zonas de disponibilidad estimada del recurso hídrico en el territorio de la Provincia de Buenos Aires*. Autoridad del Agua de la Provincia de Buenos Aires. La Plata, Argentina.
- ALIAGA, V.; FERRELLI, F.; ALBERDI-ALGARAÑAZ, E.; BOHN, V. y M. C. PICCOLO. 2016. "Distribución y variabilidad de la precipitación en la región pampeana, Argentina". *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1): 261-280.
- ALIAGA, V. S.; FERRELLI, F. & M. C. PICCOLO. 2017. "Regionalization of climate over the Argentine Pampas". *International journal of climatology*, 37: 1237-1247.
- ANDREOLI, R. V. & M. T. KAYANO. 2005. "ENSO-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific decadal oscillation regimes". *International Journal of Climatology*, 25(15): 2017-2030.
- ANDRÉS, F.; BAMBILL, E.; BANDONI, A.; CAMPAÑA, H.; CARRICA, J.; CIFUENTES, O.; . . y J. C. SCHEFER. 2009. *Informe técnico sobre aspectos relevantes de la problemática del agua en la región de Bahía Blanca*. Universidad Tecnológica Nacional - Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.
- BARROS, V. R.; BONINSEGNA, J. A.; CAMILLONI, I. A.; CHIDIAC, M.; MAGRÍN, G. O. & M. RUSTICUCCI. 2015. "Climate change in Argentina: trends, projections, impacts and adaptation". *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(2): 151-169.
- BRENDEL, A. S.; BOHN, V. Y. y M. C. PICCOLO. 2017. "Variabilidad de la precipitación y su relación con los rendimientos agrícolas en una región semiárida de la llanura pampeana (Argentina)". *Estudios Geográficos*, 78(282): 7-29.
- CAMPO, A. M.; CAPELLI, A. y P. DIEZ. 2004. *El clima del suroeste bonaerense*. EdiUNS. Bahía Blanca, Argentina.
- CARRICA, J. C. y C. LEXOW. 2004. "Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires". *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59(2): 281-290.
- CASADO, A. y A. M. CAMPO. 2019. "Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina". *Cuadernos Geográficos*, 58(1): 6-26.
- CASADO, A. y N. PICONE. 2018. "Aplicabilidad de los datos grillados para el análisis espaciotemporal de las precipitaciones, provincia de Buenos Aires (Argentina)". *Párrafos Geográficos*, 17(1): 46-62.

- CASTAÑEDA, M. & M. GONZALEZ. 2008. "Statistical analysis of the precipitation trends in the Patagonia region in Southern South America". *Atmósfera*, 21(3): 303-317.
- ELGUINDI, N.; GRUNDSTEIN, A.; BERNARDES, S.; TURUNCOGLU, U. & J. FEDDEMA. 2014. "Assessment of CMIP5 global model simulations and climate change projections for the 21st century using a modified Thornthwaite climate classification". *Climatic Change*, 122: 523-538.
- FAO & UNWATER 2021. *Progress on level of water stress: global status and acceleration needs for SDG indicator 6.4.2*. United Nations. Roma, Italia.
- FERGUSON, B. K. 1996. "Estimation of direct runoff in the Thornthwaite water balance". *The Professional Geographer*, 48(3): 263-271.
- FERNÁNDEZ, M. E.; GENTILI, J. O.; CASADO, A. L. & A. M. CAMPO. 2021. "Global horizontal irradiation: spatio-temporal variability on a regional scale in the south of the Pampeana region (Argentina)". *AUC Geographica*, 56(2): 220-233.
- FERRELLI, F.; BRENDEL, A.; ALIAGA, V. S.; PICCOLO, M. C. & G. M. E. PERILLO. 2019. "Climate regionalization and trends based on daily temperature and precipitation extremes in the south of the Pampas (Argentina)". *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 45(1): 393-416.
- FERRELLI, F.; BRENDEL, A. S.; PERILLO, G. M. E. & M. C. PICCOLO. 2021. "Warming signals emerging from the analysis of daily changes in extreme temperature events over Pampas (Argentina)". *Environmental Earth Sciences*, 80(12): 422.
- FERRELLI, F.; BRENDEL, A. S.; PICCOLO, M. C. y G. M. E. PERILLO. 2020. "Tendencia actual y futura de la precipitación en el sur de la Región Pampeana (Argentina)". *Investigaciones geográficas*, (102): c59919.
- GARREAUD, R. D. & P. ACEITUNO. 2007. "Atmospheric circulation and climatic variability". En: T. VEBLEN *et al.* (Eds.), *The Physical Geography of South America*, pp. 45-66. Oxford University Press. Oxford, UK.
- GIL, V. 2009. *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas*. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina. Tesis Doctoral.
- GRIMM, A. M. 2011. "Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change". *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4): 537-554.
- GULEV, S. K.; THORNE, P. W.; AHN, J.; DENTENER, F. J.; DOMINGUES, C. M.; GERLAND, S.; . . . & J. QUAAS. 2021. "Changing state of the climate system". En: V. MASSON-DELMOTTE *et al.* (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 287-422. Cambridge University Press. Cambridge, UK.

- IPCC. 2021. "Summary for policymakers". En: V. MASSON-DELMOTTE *et al.* (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 3-32. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. A. & N. EL BEYROUTHY. 2019. "GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design". *Scientific Data*, 6(1): 6-145.
- KAYANO, M. T. & R. V. ANDREOLI. 2007. "Relations of South American summer rainfall inter-annual variations with the Pacific Decadal Oscillation". *International Journal of Climatology*, 27: 531-540.
- KRUSE, E. y P. LAURENCENA. 2005. *Aguas superficiales. Relación con el régimen subterráneo y fenómenos de anegamiento*. XVI Congreso Geológico Argentino, pp. 313-326. La Plata, Argentina. (20 al 23 de Septiembre).
- LÓPEZ, N.; CASADO, A. L.; REVOLLO SARMIENTO, N. V. y V. GIL. 2023. "Potencial de escorrentía en función del número de curva en una cuenca serrana, Napostá Grande (Argentina)". *Geociências*, 42(3): 402-418.
- LUQUE, J. A.; PAOLONI, J. D. y G. A. BONORINO. 1979. *Estudio hidrológico e hidrogeológico de la cuenca del río Sauce Grande*. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.
- MAENZA, R. A.; AGOSTA, E. A. & M. L. BETTOLLI. 2017. "Climate change and precipitation variability over the western 'Pampas' in Argentina". *International Journal of Climatology*, 37: 445-463.
- MAGRIN, G. O.; TRAVASSO, M. I. & G. R. RODRÍGUEZ. 2005. "Changes in climate and crop production during the 20th century in Argentina". *Climatic Change*, 72: 229-249.
- MAGRIN, G. O.; TRAVASSO, M. I.; RODRIGUEZ, G. R.; SOLMAN, S. & M. NUNEZ. 2009. "Climate change and wheat production in Argentina". *International Journal of Global Warming*, 1(1-3): 214-226.
- MAMMOLITI, E.; FRONZI, D.; MANCINI, A.; VALIGI, D. & A. TAZIOLI. 2021. "WaterbalANce, a WebApp for Thornthwaite–Mather Water Balance Computation: Comparison of Applications in Two European Watersheds". *Hydrology*, 8(1): 34.
- MATHER, J. R. 1981. "Using computed stream flow in watershed analysis". *Journal of the American Water Resources Association*, 17(3): 474-482.
- MISHRA, B. K.; KUMAR, P.; SARASWAT, C.; CHAKRABORTY, S. & A. GAUTAM. 2021. "Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions". *Water*, 13(4): 490.
- NRCS. 2004. *National Engineering Handbook, Part 630: Hydrology. Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall*. USDA. Washington, USA.

- PENALBA, O. C. & W. M. VARGAS. 2004. "Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina". *International Journal of Climatology*, 24(12): 1565-1580.
- PÉREZ, S.; SIERRA, E.; MOMO, F. & M. MASSOBRIO. 2015. "Changes in average annual precipitation in Argentina's Pampa region and their possible causes". *Climate*, 3(1): 150-167.
- RAHAMAN, M. H.; MASROOR, M.; REHMAN, S.; SINGH, R.; AHMED, R.; SAHANA, M. & H. SAJJAD. 2022. "State of art of review on climate variability and water resources: bridging knowledge gaps and the way forward". *Water Resources*, 49(4): 699-710.
- RUSTICUCCI, M. & O. PENALBA. 2000. "Interdecadal changes in the precipitation seasonal cycle over Southern South America and their relationship with surface temperature". *Climate Research*, 16(1): 1-15.
- SCARPATI, O. E. y A. D. CAPRIOLO. 2013. "Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal". *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (82): 38-51.
- SCIAN, B.; LABRAGA, J. C.; REIMERS, W. & O. FRUMENTO. 2006. "Characteristics of large-scale atmospheric circulation related to extreme monthly rainfall anomalies in the Pampa Region, Argentina, under non-ENSO conditions". *Theoretical and Applied Climatology*, 85(1-2): 89-106.
- SCHNEIDER, U.; HÄNSEL, S.; FINGER, P.; RUSTEMEIER, E. & M. ZIESE. (2022). *GPCC Full Data Monthly Product Version 2022 at 0.5°: monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and historical data* Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V2022_050
- SILI, M. 2000. *Los espacios de la crisis rural : geografía de una pampa olvidada*. EdiUNS. Bahía Blanca, Argentina.
- STEENHUIS, T. & W. VAN DER MOLEN. 1986. "The Thornthwaite-Mather procedure as a simple engineering method to predict recharge". *Journal of Hydrology*, 84(3-4): 221-229.
- SUN, Q.; MIAO, C.; DUAN, Q.; ASHOURI, H.; SOROOSHIAN, S. & K. L. HSU. 2018. "A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons". *Reviews of Geophysics*, 56(1): 79-107.
- THORNTHWAITE, C. & J. MATHER. 1955. *The Water Balance*. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology. Centerton, USA.
- THORNTHWAITE, C. & J. MATHER. 1957. *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology. Centerton, USA.
- THORNTHWAITE, C. W. 1948. "An approach toward a rational classification of climat". *Geographical Review*, 38: 55-94.

- UNESCO. 2020. *Agua y cambio climático. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. París, Francia.
- VOLANTE, J.; MOSCIARO, J.; MORALES POCLAVA, M.; VALE, L.; CASTRILLO, S.; SAWCHIK, J.; . . . y R. TRUJILLO. 2015. "Expansión agrícola en Argentina, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Chile entre 2000-2010: Caracterización espacial mediante series temporales de índices de vegetación". *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 41(2): 179-191.
- WESTENBROEK, S. M.; KELSON, V.; DRIPPS, W.; HUNT, R. & K. BRADBURY. 2010. *SWB-a modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance Code for estimating groundwater recharge*. US Geological Survey. Wisconsin, USA.
- WMO 2013. *The global climate 2001–2010: a decade of climate extremes*. World Meteorological Organization. Ginebra, Suiza.
- WOLOCK, D. M. & G. J. MCCABE. 1999. "Estimates of runoff using water-balance and atmospheric general circulation models". *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6): 1341-1350.
- XU, C.-Y. & V. P. SINGH. 1998. "A review on monthly water balance models for water resources investigations". *Water resources management*, 12: 20-50.

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina; julio, 2024