

Déficit hídrico en San Antonio Oeste, Argentina

Sibila A. Genchi¹, María E. Carbone^{1,2}, María C. Piccolo^{1,2} y Gerardo M.E. Perillo^{1,3}

¹ Instituto Argentino de Oceanografía, CC 804, CCT-CONICET, B8000FWB Bahía Blanca, Argentina (sgenchi@criba.edu.ar).

² Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, B8000FWB Bahía Blanca, Argentina.

³ Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, B8000FWB Bahía Blanca, Argentina.

(Recibido: 19-May-2010. Publicado: 30-Ago-2010)

Resumen

Se calcularon los componentes del balance hídrico en San Antonio Oeste (SAO), Argentina. SAO se localiza en el sector Nororiental de la Patagonia, en una zona semiárida de escasa productividad agropecuaria como consecuencia del elevado déficit anual y la insuficiencia del drenaje superficial. El objetivo principal de este trabajo es evaluar el déficit en SAO a partir de metodologías adaptadas a las condiciones de sitio. Para ello se realizaron balances hídricos climáticos normales y secuenciales de acuerdo con Thornthwaite y Matter (1955) en base a datos pertenecientes a la estación SAO del Servicio Meteorológico Nacional. Se seleccionó y calibró el método de estimación de la evapotranspiración potencial más adecuado, mediante una comparación entre cuatro métodos empíricos y FAO Penman-Monteith. Para la caracterización de las condiciones edáficas del terreno se realizó un análisis de textura del suelo y contenido de materia orgánica en tres sitios representativos próximos a la estación SAO. El método de evapotranspiración potencial de Christiansen presentó la mayor correlación ($r^2=0,994$) cuyo error relativo medio es 1,1 y 24,2% en verano e invierno, respectivamente. Las interrelaciones entre las variables precipitación y evapotranspiración potencial en los balances hídricos normales señalaron volúmenes anuales deficitarios en todos los períodos de análisis (1961-2000) del orden de los 1170 mm. Estos volúmenes ocurren principalmente durante los meses de septiembre a marzo, concentrando más del 80% del total anual. El período que mostró mayor déficit es el 1971-1980 (1258 mm año⁻¹). En contraposición, en los decenios 1981-1990 y 1991-2000 los valores de déficit fueron moderadamente inferiores ($\approx 12\%$) al citado período. Los aportes metodológicos y resultados obtenidos deben ser considerados en las políticas de planificación y manejo del riego, máxime en un contexto económico de creciente diversificación productiva.

Palabras clave: balance hídrico climático, evapotranspiración potencial, déficit hídrico, San Antonio Oeste.

Abstract

Water balance components were calculated in San Antonio Oeste (SAO), Argentina. SAO is located in the North-West of Patagonia, in a semiarid zone of low agricultural productivity due to high annual deficit and the lack of surface drainage. The main aim of this study is to evaluate the deficit in SAO using methodologies adapted to local site conditions. For this, climatic water balances (normal and sequential) according to Thornthwaite and Matter (1955) were calculated based on data from SAO station pertaining to National Meteorological Service. An adequate method to estimate potential evapotranspiration was selected and calibrated through a comparison of four empirical methods and FAO Penman-Monteith. Soil conditions on the terrain were evaluated from texture and organic matter content of soil in three representative sites near the station SAO. The potential evapotranspiration method of Christiansen showed the highest correlation ($r^2=0.994$) which mean relative error is 1.1 and 24.2 % in summer and winter, respectively. Interrelationships between precipitation and potential evapotranspiration under normal water balances showed a loss for all periods analyzed (1961-2000) of approximately 1170 mm year⁻¹. More than 80 % of the annual losses occur mainly from September to March. The period that showed the greatest deficit was between the years 1971 and 1980 (1258 mm year⁻¹). In contrast, in the period 1981-1990 and 1991-2000 the values of deficit were slightly lower ($\approx 12\%$). Methodological contributions and results should be considered in planning and management of irrigated, especially in an economic context of growing diversification.

Key words: climatic water balance, potential evapotranspiration, water deficit, San Antonio Oeste.

1. Introducción

El contenido de agua en el suelo está determinado por la precipitación, evapotranspiración y propiedades del suelo. El estudio de estas variables en ambientes áridos y semiáridos resulta esencial para el desarrollo de políticas de manejo del agua (Abdulrazzak *et al.*, 1989). La evapotranspiración involucra un complejo conjunto de procesos que están afectados por varios factores dependientes de las condiciones locales (Ali y Shui, 2009). Cuando no se dispone de mediciones directas, la evapotranspiración potencial (*ETP*) puede ser obtenida a través de métodos de estimación que se basan en diferentes modelos teóricos. El método de FAO Penman-Monteith (*FAOP – M*) es considerado el más fidedigno (Jensen *et al.*, 1990; Di Stefano y Ferro, 1997; Allen *et al.*, 2006) ya que se basa en principios físicos y requiere una gran variedad de parámetros meteorológicos que inciden en la *ETP* (Mohan y Arumugan, 1995; Shahidian *et al.*, 2009). Consecuentemente, el método *FAO P – M* permite una comparación de la *ETP* durante varios períodos del año, en diferentes regiones y para diferentes cultivos (Er-Raki *et al.*, 2007). Numerosos trabajos previos se focalizaron en el análisis comparativo entre diversos métodos de estimación de *ETP* con referencia al método estandarizado de FAO P-M (p.ej., Paltineanu *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2005; Mallikarjuna y Jyothy, 2008; Trajkovic y Kolakovic, 2009) cuyo grado de correlación varía de acuerdo con las condiciones locales.

Las tendencias a largo plazo del efecto combinado de la evapotranspiración y la precipitación afectan la hidrología superficial y subsuperficial y en consecuencia los sistemas agropecuarios (Thomas, 2000). Numerosos estudios evaluaron impactos hidrológicos a corto y largo plazo en regiones áridas y semiáridas a partir de simples modelos de balances hídricos (p.ej., Tsuchiya, 1994; Belmonte Serrato y Romero Díaz, 1996; Domingo *et al.*, 2001; Thomas, 2000; Peranginangin *et al.*, 2004; De La Casa y Moore, 2008). Por ejemplo, en la región semiárida de Murcia (España) el déficit medio mensual entre los años 1941 y 2000 osciló entre 110 y 120 mm durante el período seco (Belmonte Serrato y Romero Díaz, 1996). En china el déficit promediado en sesenta y cinco localidades mostró una tendencia decreciente del 13,5% para el período 1954-1993 (Thomas, 2000). El máximo valor de déficit estimado para ese período fue del orden de 350 mm mes⁻¹ en el año 1980. Estudios similares en Argentina realizaron un análisis en tres localidades de la región central semiárida que mostraron una tendencia decreciente del déficit para el período 1941-2000 (De La Casa y Moore, 2008). En dicho estudio, los valores máximos de déficit estimados superaron los 150 mm mes⁻¹ (De La Casa y Moore, 2008).

San Antonio Oeste (SAO) se localiza en la costa Noroccidental del Golfo San Matías, en una zona semiárida de escasa productividad agropecuaria como consecuencia del elevado déficit anual y la insuficiencia de aguas superficiales. La demanda hídrica de los núcleos poblacionales de SAO y Las Grutas es abastecida por el río Negro mediante un canal de 188 km de longitud que conecta las localidades de Pomona–SAO (figura 1), cuya capacidad de transporte es 7 m³ s⁻¹. En las fracciones rurales aledañas a SAO se desarrolla la ganadería extensiva, principalmente ovina (Plunkett y Gastaminza, 2004) aunque su distribución es dispersa. La actividad agrícola está basada en el cultivo de la especie *Olea europaea* bajo un sistema de producción intensivo, que ocupa una superficie de 0,11 km² en el Suroeste de la localidad de Las Grutas (figura 1).

En el esquema geomorfológico regional el área se ubica sobre un pedimento litoral suavemente ondulado, cuya pendiente media es 1,6%. Hidrográficamente, el pedimento es disectado por una red de drenaje efímera e influente (Genchi *et al.*, 2008) con profundidades de la napa freática que varían entre 60 y 85 m (Olivares y Sisul, 2005). Desde el punto de vista biogeográfico, el área se ubica en la unidad Monte Austral Típico, provincia del Monte, distrito Estepa Arbustiva (Cabrera, 1976). El área se caracteriza por una estepa arbustiva de baja cobertura y varios estratos. Los estratos de mayor cobertura son los medios y bajos, con alturas que oscilan entre 0,5 y 1,5 m (León *et al.*, 1998). La especie dominante es *Larrea divaricata*, arbusto perennifolio de altura inferior a 1,5 m, cuyas hojas indican caracteres adaptativos a condiciones de aridez.

Teniendo en cuenta la importancia de este tipo de estudios y la ausencia de antecedentes en el área de estudio, el objetivo principal de este trabajo es evaluar el déficit hídrico en SAO a partir de un enfoque metodológico adaptado a las condiciones de sitio. En este estudio se analizan en forma sistemática las variables que componen el balance hídrico, con particular interés en la *ETP*, la cual requiere una adecuada estimación en función de las características del área. Los resultados y aportes metodológicos proveen una base para el desarrollo de políticas de planificación y manejo del riego a escalas local y regional.

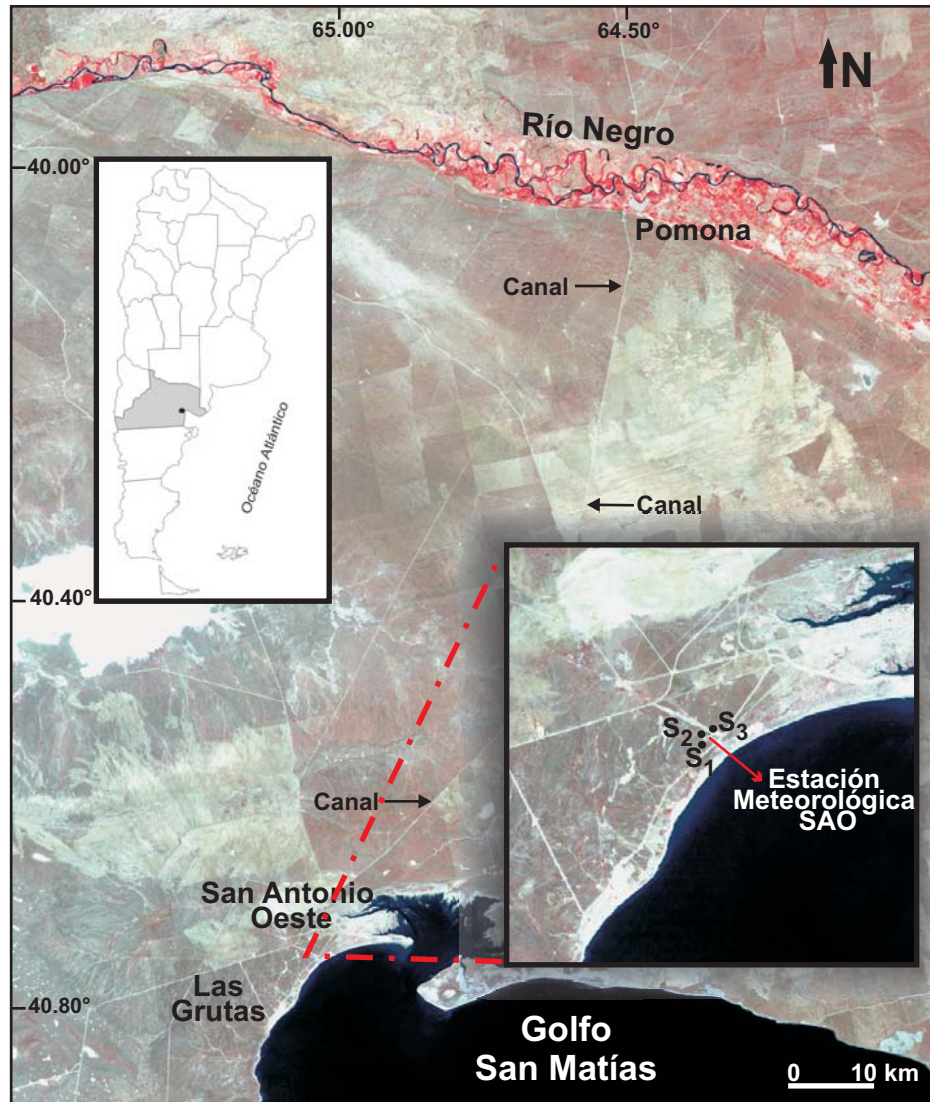


Figura 1: Localización del área de estudio y sitios de muestreo sedimentológico (S1, S2 y S3) y climático. Imagen satelital Landsat 5 TM proporcionada por CONAE

2. Método de trabajo

Se realizaron balances hídricos climáticos normales (BHC_n) y secuenciales (BHC_s) de acuerdo con Thornthwaite y Matter (1955) en base a datos climáticos registrados en la estación meteorológica SAO ($40^{\circ}44'S$ y $64^{\circ}67'W$; 20 msnm) perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (figura 1). Los BHC_n se aplicaron a cuatro decenios de estadísticas climáticas para el período 1961-2000. Para el BHC_s se seleccionaron los años 1986 y 1997, los cuales presentan valores mínimos y máximos de precipitación del período 1961-2000, respectivamente. Se analizó el comportamiento de la precipitación (P), ETP y condiciones edáficas.

Para el cálculo de los BHC_n y BHC_s se seleccionó y calibró el método de estimación de la ETP más adecuado a las condiciones de sitio. Se realizó una comparación entre cuatro métodos empíricos de ETP mensual (Christiansen, Turc, Thornthwaite y Hargreaves) con referencia al método de FAO P-M a escala diaria (ver relación en el anexo). Para ello se empleó una serie de datos continua, de resolución temporal diaria, perteneciente a la estación SAO (Abril de 2008 – Marzo de 2009).

El modelo de Thornthwaite y Matter (1955) asume que la evapotranspiración real adquiere el rango de potencial en un determinado mes en el cual $P \geq ETP$. El BHC_s para el año húmedo se realizó a diferentes niveles de almacenamiento de agua en el suelo ($AAS=30, 50$ mm) y se basa en un nivel de reservorio unitario en el perfil del suelo. La reserva se adiciona cuando la diferencia positiva entre $P - ETP$ es superior a la AAS .

Para la caracterización de las condiciones edáficas se realizó un análisis de textura del suelo y contenido de materia orgánica. Se muestrearon tres sitios representativos próximos a la estación SAO (S_1, S_2 y S_3 , figura 1) en noviembre del año 2009. Los sedimentos fueron recogidos con tubos de policarbonato de 30 cm de longitud y 8 cm de diámetro. Para la clasificación textural de los sedimentos se utilizó un analizador de partículas *Mastersizer 2000* (partículas $< 1000 \mu m$) y una serie de tamices (partículas $> 1000 \mu m$). El contenido de materia orgánica se determinó por calcinación a $500^\circ C$ durante 4 horas, sobre una muestra de 5 g, previa desecación ($100^\circ C$ en 24 h).

3. Resultados

3.1. Clima

El área de estudio se localiza en una zona templada semiárida, con rasgos bien localizados debido a la influencia del mar. De acuerdo al índice de aridez de Gaussen (1954) el área es de tipo subdesértico, con aproximadamente 270 días secos. Los meses de mayo, junio y julio son considerados semihúmedos (figura 2). El índice de continentalidad de Currey (1974) expresado como la amplitud de la oscilación anual de la temperatura es 1,03 e indica un tipo de clima oceánico.

La temperatura media anual para el período 1961-2000 es de $15,1^\circ C$. En los meses de invierno la temperatura media es $8,4^\circ C$, mientras que en verano es $21,8^\circ C$ (figura 2). La humedad relativa media anual es 57%, alcanzando los máximos registros en el período invernal, con valores que se aproximan al 70% (1961-2000). La dirección predominante de los vientos es Noroeste entre los meses de marzo a noviembre, mientras que en los meses estivales la dirección dominante es Sureste. La velocidad del viento promedio anual es $5,05 m s^{-1}$ (1961-2000).

El área se ubica en el límite Sur de la zona de influencia del anticiclón del Atlántico Sur. Las lluvias son de carácter pluvial con un promedio anual de 256,5 mm (1961-2000). El desvío estándar de las lluvias medias mensuales es 4,6 lo que indica una moderada variación intraanual. La estación del año más lluviosa corresponde al otoño seguida por la primavera (figura 2). La evolución temporal de la lluvia para el período 1961-2000 señala una tendencia creciente en los últimos decenios. La media móvil (3 años) indica máximos de precipitación principalmente a partir de fines del decenio de 1970 (figura 3). Sin embargo, las menores precipitaciones del período de estudio se produjeron en la segunda mitad de la década de 1980, lo que señala una significativa variabilidad interanual (figura 3).

3.2. Evapotranspiración potencial

La comparación entre los métodos empíricos considerados (Christiansen, Turc, Thornthwaite, Hargreaves) y el método estándar de FAO P-M indica que los métodos de Christiansen y Turc presentan los valores más elevados de correlación, cuyos valores son $r^2=0,994$ y $r^2=0,9904$, respectivamente (figura 4). En contraposición, los métodos de Thornthwaite y Hargreaves señalan una menor correlación de $r^2=0,9116$ y $r^2=0,8603$, respectivamente (figura 4). El método de Christiansen muestra una mayor apro-

ximación al método de FAO P-M en particular durante el período estival, con un error relativo medio de 1,1% (figura 5). Durante los meses de invierno este método posee un error relativo medio de 24,2% con tendencia a subestimar la ETP. En cambio, el método de Turc tiende a subestimar los valores de ETP tanto en verano como en invierno, con errores relativos medios de 37,7 y 46,3%, respectivamente (figura 5).

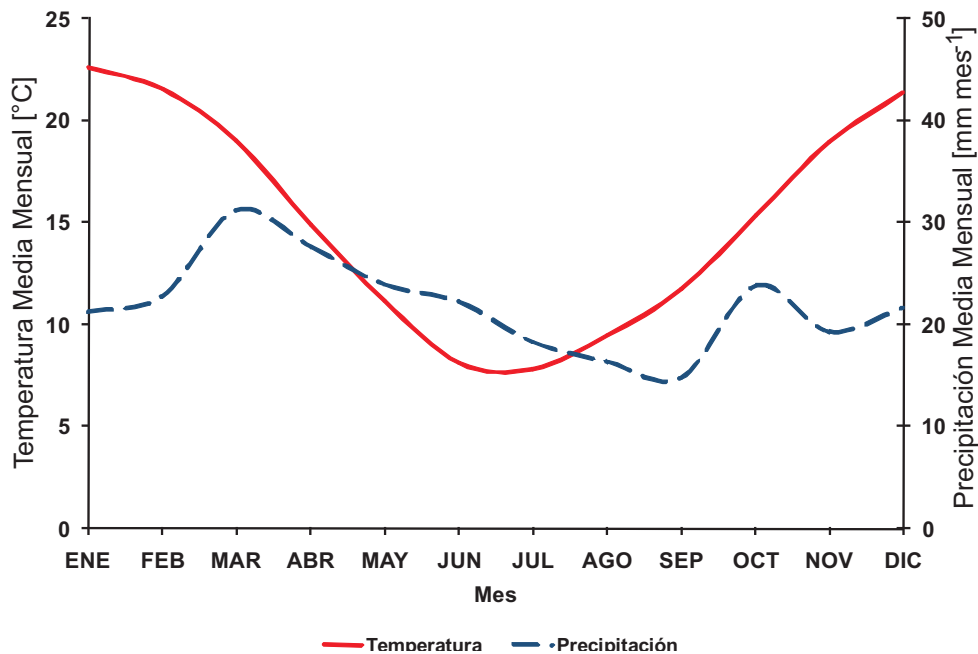


Figura 2: Diagrama ombrotérmico (1961-2000)

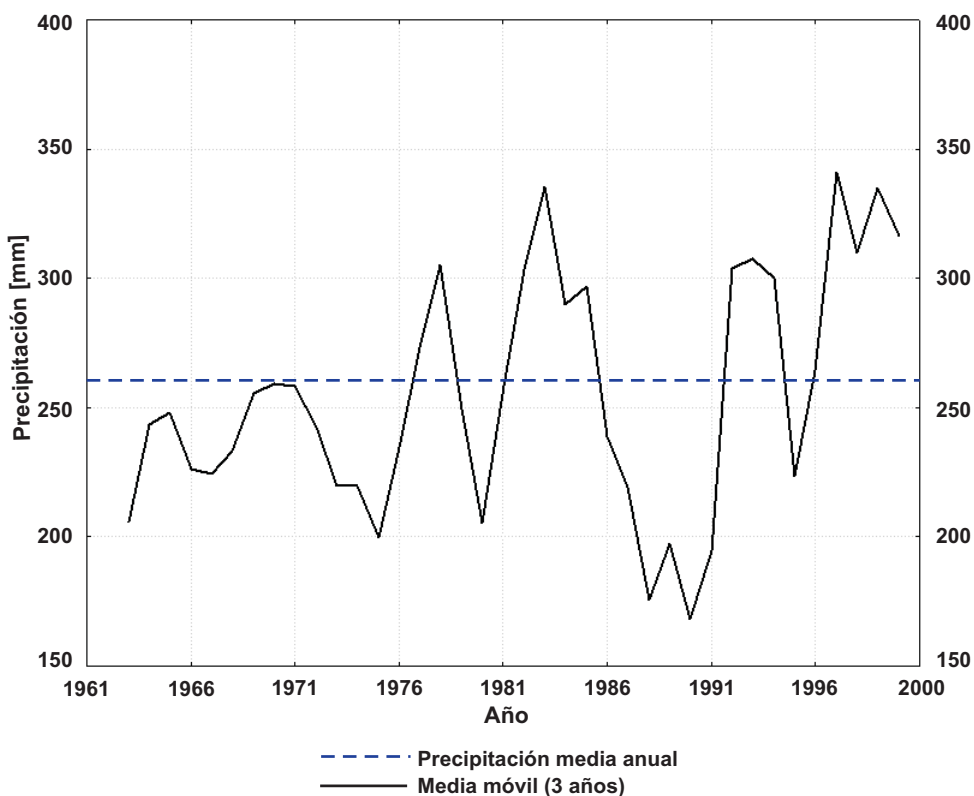


Figura 3: Evolución de la precipitación anual para el período 1961-2000

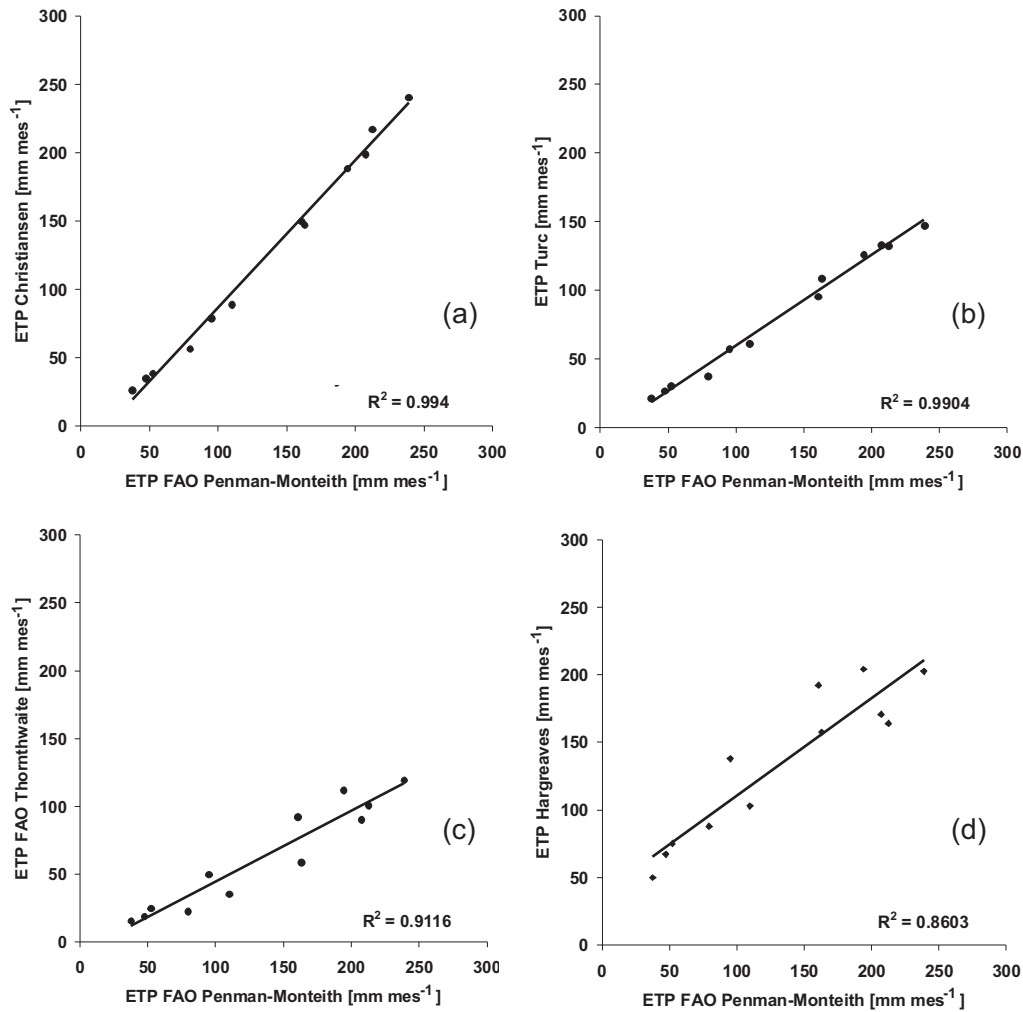


Figura 4: Correlación entre cuatro métodos de estimación de *ETP* y el método de FAO P-M. (a) Christiansen; (b) Turc; (c) Thornthwaite; (d) Hargreaves.

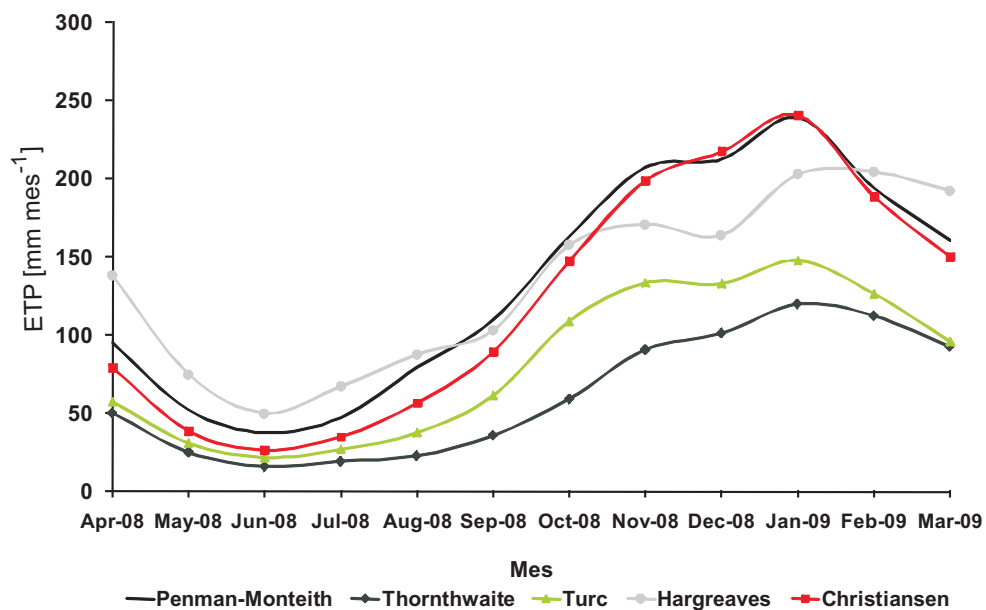


Figura 5: Comparación de la *ETP* computada por FAO P-M y cuatro métodos empíricos para el período de abril de 2008 a marzo de 2009.

La calibración del método de Christiansen con referencia a FAO P-M se obtiene a partir de la correlación entre ambos métodos. La ecuación de calibración se expresa como

$$CH_c = a CH + b$$

donde CH_c es el valor obtenido por el método de Christiansen corregido, CH el valor de Christiansen, y a y b valen 0,9212 y 20,345 respectivamente.

La ETP media anual para el área de estudio estimada por el método de Christiansen previa calibración es 1434 mm (1961-2000). La tendencia para el período 1961-2000 es decreciente, con un máximo medio anual en el decenio 1971-1980 (1485 mm) y un mínimo de 1377 mm en el siguiente decenio. El comportamiento intraanual medio de la ETP muestra una marcada variación estacional (figura 6). Los resultados indican valores medios de 181 mm mes^{-1} durante el período estival, mientras que en los meses de invierno la ETP media es de 62 mm mes^{-1} .

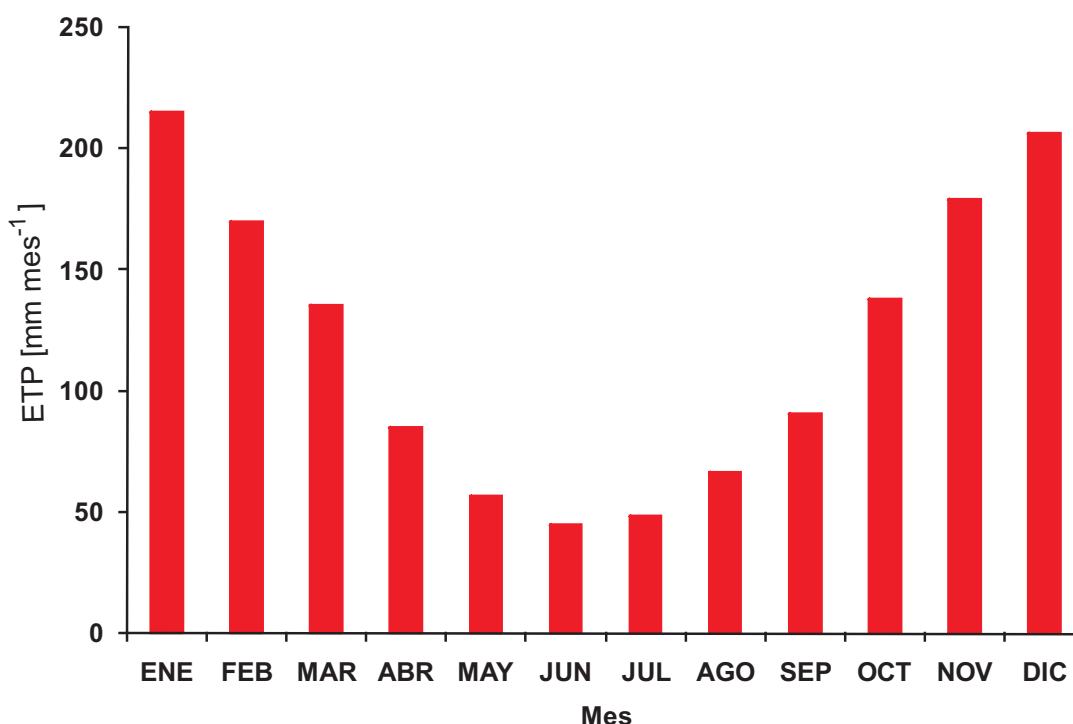


Figura 6: Evapotranspiración potencial media mensual de acuerdo con Christiansen (1961-2000)

3.3. Características edáficas

El área de estudio se ubica en un sistema hidrogeológico de planicies con importante infiltración. Los suelos corresponden al orden Aridisol, con dominio de los Calciortides típicos (Godagnone y Salazar, 1993). Se caracterizan por poseer escaso desarrollo pedogenético y bajo contenido de materia orgánica (< 1%) (tabla 1). Presentan perfiles poco evolucionados y de escaso espesor (< 50 cm). El grupo textural predominante es la arena limosa (tabla 1), con presencia de arcilla menor al 10%. Las gravas poseen una localización errática en superficie y sólo contienen un porcentaje significativo (17%) en el S_1 (figura 1).

A escala regional, los suelos presentan valores de almacenamiento de agua que oscilan entre 20 y 50 mm (Damiano y Taboada, 2000). Estos suelos pertenecen al grupo hidrológico B, caracterizados por poseer buen drenaje y bajo potencial de escorrentía (Monsalve Sáenz, 1999). Las velocidades de infiltración superan los 100 mm h^{-1} .

Tabla 1: Granulometría y contenido de materia orgánica del suelo en tres sitios representativos.

Sitio	Latitud	Longitud	Grava (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Materia Orgánica (%)
S ₁	40°45'29"S	65°01'50"W	17,1	56,1	20,0	6,8	0,54
S ₂	40°45'17"S	65°01'56"W	3,2	57,5	29,6	9,8	0,76
S ₃	40°45'12"S	65°01'39"W	2,1	48,2	40,7	9,0	0,72

3.4. Balances hídricos climáticos normales 1961-2000

Las interrelaciones entre los componentes de los BHC_n evidenciaron condiciones semejantes en los cuatro decenios considerados. Los valores de ETP se incrementan significativamente durante el período estival, mientras que las escasas lluvias se distribuyen con suficiente uniformidad a lo largo del año (figura 7). Los BHC_n mostraron déficit hídrico permanente, con valores anuales que oscilaron entre 1110 y 1258 mm. El déficit se acentúa en el período comprendido entre los meses de septiembre a marzo, que concentra más del 80% del total anual (figura 7). El máximo valor medio mensual de déficit para el período 1961-2000 es de 194 mm, que corresponde al mes de enero. El mínimo valor medio de déficit para el mismo período es de 22 mm mes^{-1} perteneciente al mes de junio.

De acuerdo a los decenios considerados, el período que mostró mayor déficit hídrico es el 1971-1980 cuyo valor medio anual alcanzó 1258 mm (figura 8). En contraposición, en los últimos dos decenios los valores de déficit fueron moderadamente inferiores ($\approx 12\%$) al período 1971-1980. Resulta notorio el reducido déficit ocurrido durante el mes de junio correspondiente al decenio 1991-2000, el cual alcanzó 6 mm (figura 8).

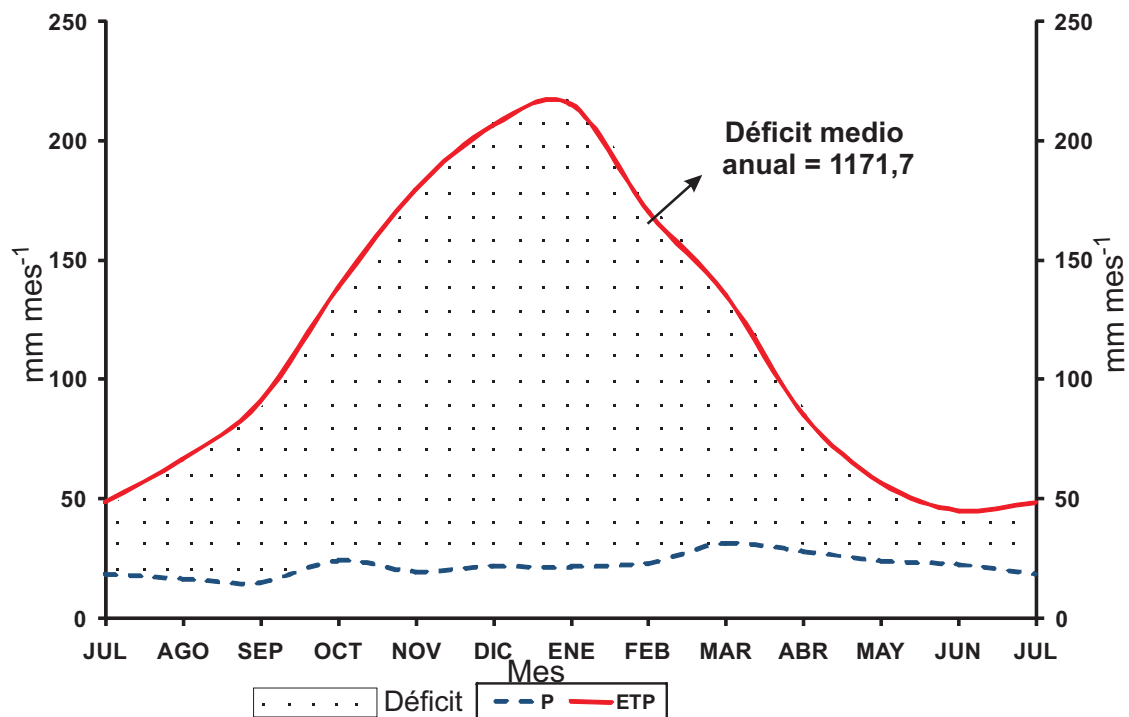


Figura 7: Balance hídrico climático normal 1961-2000, empleando el método de ETP de Christiansen.

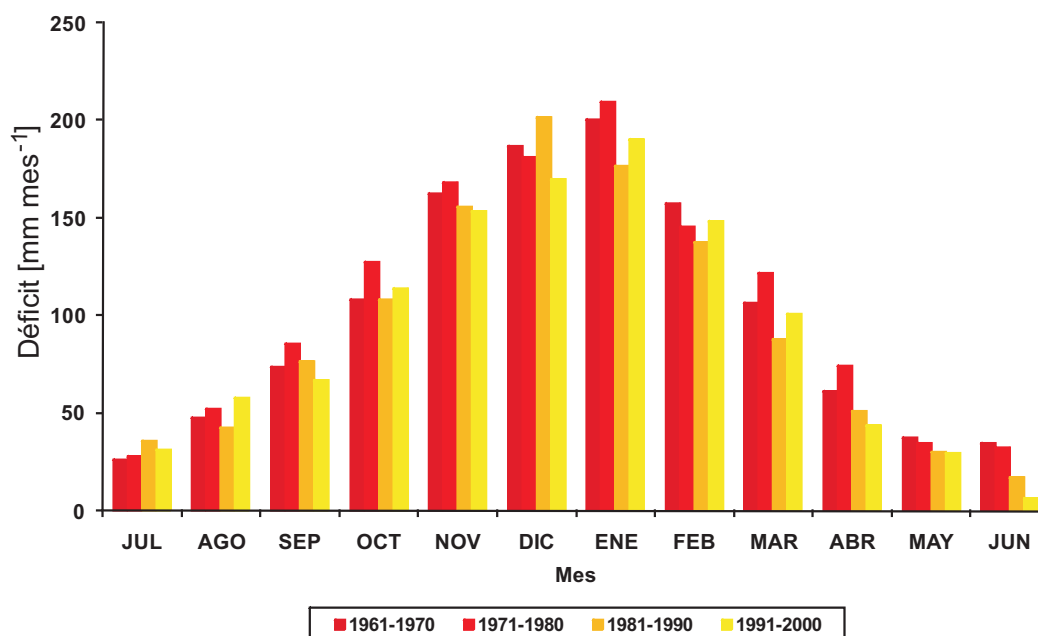


Figura 8: Déficit hídrico medio mensual para cada decenio analizado.

3.5. Balances hídricos climáticos secuenciales

En el período de análisis 1961-2000, los años 1986 y 1997 mostraron valores anuales de lluvias significativamente inferior y superior a la media, respectivamente. En 1986 la P acumuló un total de 89,5 mm que reflejó un 65,1 % menos que la media anual. El déficit hídrico para ese año fue de 1301,7 mm (figura 9a) el cual superó en un 11 el valor medio anual. Durante el año húmedo, cuyas lluvias (487,7 mm) superaron en un 90,1 % el valor medio, el balance hídrico resultó deficitario. El déficit resultante para AAS de 30 y 50 mm fue de 950 y 970 mm año⁻¹, respectivamente. El exceso hídrico se restringió al mes de junio en el cual la P superó ampliamente la ETP (figura 9b,c). La irregular distribución intraanual de la P determinó también diferencias positivas entre la P y la ETP en el mes de marzo, aunque sin generar excedentes.

Las respuestas en los excedentes hídricos y el posterior consumo mostraron particularidades en función de los niveles de AAS (figura 9b,c). Por un lado, los excedentes variaron inversamente proporcional a la AAS. Por otro lado, para valores de AAS de 30 mm, el consumo ocurre en forma inmediata y prevalece el déficit hídrico, mientras que para valores de 50 mm, el consumo fue la condición predominante durante el mes de julio.

4. Discusión

El método de ETP de Christiansen, empleado en el cálculo de los BHC , es el que presenta la mayor correlación ($r^2=0,994$) con el método estándar de FAO P-M. Asimismo, el método de Christiansen arroja valores semejantes al del FAO P-M a lo largo del año, con un mínimo error relativo medio principalmente en verano (1,1 %). El método de Christiansen utiliza variables que afectan la evapotranspiración en forma directa (p.ej., temperatura, radiación solar, brillo solar y humedad relativa) e indirecta (p.ej., velocidad del viento y elevación sobre el nivel del mar) permitiendo estimar la ETP con suficiente precisión en ambientes semiáridos.

Las fuerzas que retienen el agua en el suelo, de atracción superficial (Navarro Blaya y Navarro García, 2003) provocan menor absorción en este tipo de suelos esqueléticos y poco evolucionados. La fuerza de cohesión al asociarse a un bajo porcentaje de materia orgánica es menor que la de gravedad, por lo que el agua se filtra y penetra hasta las capas más profundas. De este modo, estas características implican AAS inferiores a 50 mm.

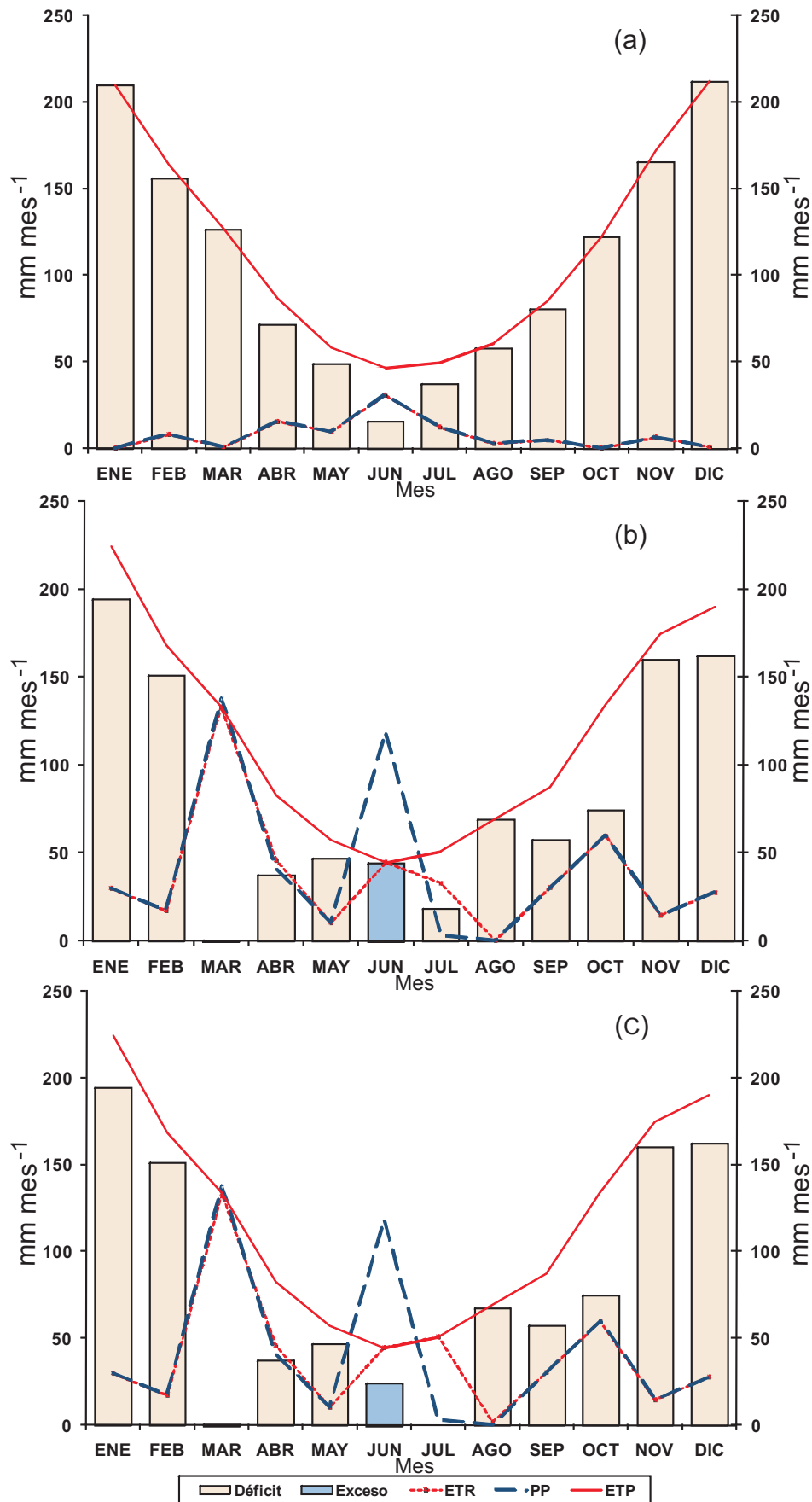


Figura 9: Balances hídricos climáticos secuenciales. (a) Año seco (1986); (b) Año húmedo (1997) AAS=30 mm; (c) Año húmedo (1997) AAS=50 mm.

En los BHC_n la deficiencia hídrica prevalece ininterrumpidamente sobre los excesos. Los valores medios de P no alcanzan a superar aquellos de ETP , aún en los meses semihúmedos (mayo a julio). Durante este período las bajas temperaturas ($8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y los valores de humedad relativa que alcanza el 70% explican las ligeras pérdidas por ETP . El aumento progresivo de las lluvias anuales durante el período 1961-2000 (figura 4) contribuye a explicar el descenso (12%) del déficit medio anual en los últimos dos decenios. Esta tendencia decreciente del déficit entre los años 1961-2000, similar a la encontrada en otras regiones semiáridas (p.ej., la región central semiárida de Argentina entre los años 1941 y 2000; China durante el período 1954-1993) se asocia a la fuerte tendencia a la variación de parámetros tales como la precipitación, nubosidad y evapotranspiración en escalas regional y global (Thomas, 2000).

A diferencia de los BHC_n que emplean valores medios de ETP y P , los BHC_s permiten identificar la ocurrencia de eventuales condiciones hídricas extremas. Estas condiciones están determinadas fundamentalmente por las lluvias. El año 1986 presentó una lluvia anual significativamente inferior a la media anual que determinó un déficit anual ligeramente superior al valor medio (11%). En contraposición, el BHC_s correspondiente al año 1997 anormalmente lluvioso, presentó excedentes concentrados en el mes de junio, que redujeron el déficit medio anual en un 18%. La delgada lámina de agua disponible en el suelo contribuye a un rápido agotamiento luego de producirse las pérdidas derivadas de la relación $P - ETP$.

El elevado déficit hídrico y el insuficiente drenaje superficial y subsuperficial que caracterizan al área de estudio afectan principalmente al sector agrario. En dicho contexto, las necesidades hídricas deben ser complementadas mediante infraestructura hidráulica, tal es el caso del canal de riego Pomona-SAO. Sin embargo, los requerimientos en la producción de cultivos potenciales en condiciones de secano implican la adecuación de la mencionada infraestructura de riego.

5. Conclusiones

En la cuantificación de los BHC resulta fundamental el análisis sistemático de sus variables, en particular de la ETP . Cuando no se dispone de mediciones directas de ETP es posible la estimación empleando aquel método que se adecúe a las condiciones locales. El método de FAO P-M es ampliamente recomendado en la literatura como estándar para evaluar la fiabilidad de otros métodos de estimación. En el área de estudio, la comparación entre diferentes métodos de estimación (Christiansen, Turc, Thornthwaite y Hargreaves) y FAO P-M para un período de un año, mostró una fuerte correlación con Christiansen y Turc, mientras que con los restantes métodos la correlación fue ligeramente más débil. La determinación del error relativo medio con referencia a FAO P-M indicó una mayor aproximación del método de Christiansen, con valores muy bajos durante los meses de verano.

El conocimiento del comportamiento intraanual del déficit hídrico normal y en condiciones extremas (p.ej., 1986 y 1997) permite elaborar estrategias y planes de manejo del recurso agua, máxime en un contexto económico de creciente diversificación productiva. Estos resultados podrían extrapolarse hacia zonas próximas como consecuencia de la escasa variabilidad topográfica regional. Asimismo, los aportes metodológicos podrían aplicarse en zonas con similares características agroclimáticas.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Eustaquio A. Molas, Sub-Oficial, Jefe de la estación meteorológica San Antonio Oeste, quien proporcionó registros anuales de precipitación. Este trabajo es financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica y la Universidad Nacional del Sur.

Bibliografía

- Abdulrazzak M, Sorman A, Alhames S (1989): Water balance approach under extreme arid conditions. A case study of Tabalah Basin, Saudi Arabia. *Hydrological Processes*, 3:107-122.
- Aguiló Alonso M (2000): *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. Editorial MOPT (4ª ed.), Madrid.
- Ali H, Shui L T (2009): Potential Evapotranspiration Model for Muda Irrigation Project, Malaysia. *Water Resources Management*, 23:57-69.
- Allen RG, Pruitt WO, Wright JL, Howell TA, Ventura F, Snyder R, Itenfisu D, Steduto P, Berengena J, Yrisarry JB, Smith M, Pereira IS, Raes D, Perrier A, Alves I, Walter I Elliott R (2006): A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agric. Water Manag.*, 81:1-22.
- Belmonte Serrato F, Romero Díaz A (1996): Aproximación a las características climáticas en el área de influencia del campo experimental de El Ardal (Murcia). La representatividad de las series climáticas disponibles. *Papeles de Geografía*, 23-24:47-61.
- Cabrera A (1976): Regiones fitogeográficas argentinas. En *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería* (W. Kugler, Ed.), pp. 1-85.
- Chen D, Gao G, Xu CH, Guo J, Ren G (2005): Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Clim. Res.*, 28:123-132.
- Currey DR (1974): Continentality of extratropical climates. *Annals of the Association of American Geographers*, 64:268-280.
- Damiano F, Taboada M (2000): Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo*, 18:77-88.
- De La Casa A, Moore F (2008): Impacto del cambio climático-ambiental sobre la aptitud del cultivo de la soja en tres localidades de la región central de Argentina durante la segunda mitad del siglo XX. *XII Reunión Argentina de Agrometeorología*, San Salvador de Jujuy, Argentina.
- Di Stefano C, Ferro V (1997): Estimation of evapotranspiration by Hargreaves formula and remotely sensed data in semiarid Mediterranean areas. *Agric. Eng. Res.*, 68:189-199.
- Domingo F, Villagarcía L, Boer MM, Alados-Arboledas L, Puigdefábregas J (2001): Evaluating the long-term water balance of arid zone stream bed vegetation using evapotranspiration modelling and hillslope runoff measurements. *Journal of Hydrology*, 243:17-30.
- Er-Raki S, Chehbouni A, Guemouria N, Duchemin B, Ezzahar J, Hadria R (2007): Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural water management*, 8:41-54.
- Gausson H (1954): Théorie et classification des climats et des microclimats du point de vue Phytogéographique. *Actes du VIII Congrès International de Botanique*. Paris.
- Genchi SA, Carbone ME, Perillo GME, Piccolo MC (2008): Study of the temporary hydrographic networks as a conditioner of the urban morphology. Case Las Grutas beach resort, Argentina (Abstract). *Prints of the Estuarine and Coastal Sciences Association*, 44 Congress, Instituto Argentino de Oceanografía, Bahía Blanca, Argentina.
- Godagnone R, Salazar Lea Plaza J (1993): *Mapa de suelos*. Escala 1:2500000. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria e Instituto Nacional del Suelo.

- Jensen ME, Burman RD, Allen RG (1990): *Evaporation and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, N°70, Nueva York.
- Lee TS, Najim M, Aminul HM (2004): Estimating evapotranspiration of irrigated rice at the West Coast of the Peninsular of Malaysia. *Journal of Applied Irrigation Science*, 39:103-17.
- León R, Bran D, Collantes M, Paruelo J, Soriano A (1998): Grandes unidades de vegetación de la Patagonia extra andina. *Ecología Austral. Asociación Argentina de Ecología*, 8:125-144.
- Mallikarjuna P, Jyothy AS (2008): Evapotranspiration Studies for Irrigation Projects. A Case Study. *IE(I). Journal-AG*, 89:5-13.
- Mohan S, Arumugam N (1995). Forecasting weekly reference crop evapotranspiration series. *Hydrol. Sci.*, 40:689-702.
- Navarro Blaya S, Navarro García G (2003): *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Mundi-Prensa, España.
- Olivares G, Sisul A (2005): Los recursos hídricos en el sector costero rionegrino. En *Las mesetas patagónicas que caen al mar: La costa rionegrina* (R Freddy Masera, J Lew, G Serra Pirano, Eds.), Gobierno de Río Negro, pp. 237-247.
- Paltineanu C, Panorás AG, Mavroudis IG, Louisakis A (1999): Estimating reference evapotranspiration and irrigation water requirements in the Gallikos river basin, Greece. *Int. Agrophysics*, 13:49-62.
- Peranginangin N, Sakthivadivel R, Scotta NR, Kendy E, Steenhuis TS (2004): Water accounting for conjunctive groundwater/surface water management: case of the Singkarak-Ombilin River basin, Indonesia. *Journal of Hydrology*, 292:1-22.
- Plunkett S, Gastaminza S (2004): *Ordenamiento y Protección de los Recursos Naturales de la Costa Atlántica de Río Negro*. Pre diagnóstico ampliado-Proyecto 1, Río Negro.
- Servicio Meteorológico Nacional (1985): *Estadística Climatológica 1961-1970*. Serie B, N°35, Comando de Regiones Aéreas, Fuerza Aérea Argentina, Buenos Aires.
- Servicio Meteorológico Nacional (1986): *Estadística Climatológica 1971-1980*. Serie B, N°36, Comando de Regiones Aéreas, Fuerza Aérea Argentina, Buenos Aires.
- Servicio Meteorológico Nacional (1992): *Estadística Climatológica 1981-1990*. Serie B, N°37, Comando de Regiones Aéreas, Fuerza Aérea Argentina, Buenos Aires.
- Servicio Meteorológico Nacional (2006): *Estadística Climatológica 1991-2000*. CD, Comando de Regiones Aéreas, Fuerza Aérea Argentina, Buenos Aires.
- Shahidian S, Serralheir R, Teixeira JL, Santos FL, Oliveira MR, Costa J, Toureiro C, Haie N, Machado R (2009): Drip irrigation using a PLC based adaptive irrigation system. *Wseas Transactions On Environment And Development*, 5:209-218.
- Thomas A (2000): Climatic changes in yield index and soil water deficit trends in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102:71-81.
- Thornthwaite CW, Mather JR (1955): The Water Balance. *Publications in Climatology*, 8:1-104.
- Trajkovic S, Kolakovic S (2009): Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations Under Humid Conditions. *Water Resources Management*, 23:3057-3067.
- Tsuchiya A (1994): Relationships between wood volumen increments by stem analysis and water balance in the semi-arid interior of northeastern Brazil. *Mem. Fac. Integrated Arts and Sci.*, Hiroshima Univ., Ser., 20:71-80.

Veihmeyer FJ (1964): Evapotranspiration. En *Handbook of applied hydrology* (Ven Te Choe, ed.), McGraw-Hill, U.S.A.

Xu C, Singh V (2001): Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrol. Process.*, 15:305-319.

Anexo

Ecuaciones y nomenclatura de los métodos de estimación de ETP empleados

1. **Christiansen** (Mallikarjuna y Jyothy, 2008):

$$ETP = 0,324 R_i C_t C_w C_h C_s C_e$$

ETP : evapotranspiración potencial [mm mes⁻¹]

R_i : radiación extraterrestre [mm d⁻¹]

$$C_t = 0,463 + 0,425 \frac{T}{T_0} + 0,122 \left(\frac{T}{T_0} \right)^2$$

$$C_w = 0,672 + 0,406 \frac{W}{W_0} - 0,078 \left(\frac{W}{W_0} \right)^2$$

$$C_h = 1,035 + 0,240 \frac{H}{H_0} - 0,275 \left(\frac{H}{H_0} \right)^2$$

$$C_s = 0,340 + 0,856 \frac{S}{S_0} - 0,196 \left(\frac{S}{S_0} \right)^2$$

$$C_e = 0,970 + 0,030 \frac{E}{E_0}$$

T : temperatura media mensual [°C] y $T_0 = 20$

W : velocidad del viento media mensual a 2 m sobre el nivel del suelo [km h⁻¹] y $W_0 = 6,7$

H : humedad relativa media mensual (en decimales) y $H_0 = 0,60$

S : porcentaje medio de brillo solar (en decimales) y $S_0 = 0,80$

E : elevación sobre el nivel del mar [m] y $E_0 = 300$

2. **Turc** (Aguiló Alonso M. *et al.*, 2000):

$$ETP = 0,4 (R_i + 50) \frac{T}{T + 15} c$$

ETP : evapotranspiración potencial [mm mes⁻¹]

R_i : radiación de onda corta [cal cm⁻² día⁻¹]

$$c = \begin{cases} 1 & \text{para } H \leq 50 \\ (50 - H)/70 & \text{para } H > 50 \end{cases}$$

H : humedad relativa media mensual (en porcentaje)

3. Thornthwaite (Xu y Singh, 2001):

$$ETP = 16 K_a \left(\frac{10 T_j}{I} \right)^a$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$$

$$I : \text{índice de calor, } I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1,514}$$

ETP : evapotranspiración potencial [mm mes⁻¹]

T_j : temperatura media mensual [°C]

K_a : factor de corrección en función de la latitud y el mes

4. Hargreaves (Veihmeyer, 1964):

$$ETP = k d (0,38 - 0,0038 H)(T - 32)$$

ETP : evapotranspiración potencial [pulgadas mes⁻¹]

k : coeficiente de uso consuntivo ($k \simeq 1$ para zonas semiáridas)

d : coeficiente en función de la latitud (1,08)

T : temperatura media mensual [°F]

5. FAO Penman-Monteith (Shahidian *et al.*, 2009):

$$ETP = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

ETP : evapotranspiración potencial [mm día⁻¹]

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor [kPa °C⁻¹]

R_n : radiación neta [MJ m⁻² día⁻¹]

G : flujo del calor de suelo [MJ m⁻² día⁻¹]

γ : constante psicrométrica [kPa °C⁻¹]

T : temperatura media diaria a 2 m de altura [°C]

u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura [m s⁻¹]

e_s : presión de vapor de saturación [kPa]

e_a : presión real del vapor [kPa]

