

Mapa bioclimático para las Travesías de Mendoza (Argentina) basado en la fenología foliar

Bioclimatic map for the Travesías (vast plains) of Mendoza province (Argentina) based on foliar phenology

María Margarita González Loyarte ¹

Massimo Menenti ²

Ángela M. Diblasi ³

Originales: Recepción: 19/03/2009 - Aceptación: 24/04/2009

RESUMEN

El objetivo fue generar un mapa bioclimático de la llanura de Mendoza que reflejara las diferencias climáticas expresadas por la actividad de la vegetación (fenología foliar) a escala regional. Se partió de la imagen digital del índice bioclimático de aridez *P/ETP*, generada en una etapa anterior a partir de una serie temporal de imágenes de índice verde (IVDN), y se recodificó en clases bioclimáticas. Se evaluó en cada clase la influencia antrópica y edáfica sobre las condiciones climáticas de aridez reflejadas por la vegetación. Se graficó la marcha fenológica anual media para cada bioclima a partir de una reconstrucción del IVDN. Las clases de clima húmedo y subhúmedo son de carácter edáfico debido al riego (oasis). Se proponen las clases: subdesértico (8,4%), árido inferior (15,3%), árido superior (24,2 %), semiárido inferior (25%) y semiárido superior (27,1%). Cada bioclima tiene una expresión vegetativa diferente en condiciones naturales. La marcha fenológica anual muestra que a mayor aridez menor es el contraste entre el IVDN mínimo y máximo, y que el momento de máxima co-

ABSTRACT

The aim was to propose a bioclimatic map of the plain of Mendoza province reflecting the climatic differences expressed by vegetation activity (foliar phenology) at regional scale. The digital image of the bioclimatic aridity index *P/ETP*, resulting from a previous research on time series of NDVI images, was recoded into bioclimatic classes. Each class was analysed, assessing whether factors such as soil or human activities are influencing aridity, as expressed by vegetation. Mean annual phenological rhythm was graphed for each bioclimate by reconstructing the yearly NDVI curve. Results show that humid and subhumid classes are due to irrigation. The proposed map presents five classes: subdesert (8.4%), lower arid (15.3%), upper arid (24.2%), lower semiarid (25%) and upper semiarid (27.1%). Each climatic class has a different expression of vegetation activity under natural conditions, all year long. The phenological rhythm shows that aridity reduces the contrast between minimum and maximum NDVI and that time of maximal vegetation cover varies from

- 1 Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas (IADIZA/CCT Mendoza, sede CRICYT), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. C.C. 507. 5500 Mendoza. Argentina. gloyarte@lab.cricyt.edu.ar
- 2 Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo - ISAFoM, S. Sebastiano al Vesuvio, Italia. Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection (LSIIT), Univ. L. Pasteur. Strasbourg. Francia.
- 3 Facultad de Ciencias Económicas. UNCuyo. Mendoza. Argentina. Área de Ciencias Exactas/CCT Mendoza, sede CRICYT, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Mendoza. Argentina.

bertura vegetal varía de enero (semiárido) a abril (subdesértico). Esta propuesta permite extender y optimizar el conocimiento climático de las estaciones meteorológicas a través de toda la llanura mediante la expresión fenológica de la vegetación.

January, under semiarid climate, to April, in subdesert climate. This proposal allows enhancement and optimization of meteorological data throughout the whole plain by means of vegetation phenology.

Palabras clave

índice de aridez • evapotranspiración potencial • fenología foliar • bioclima • imágenes NOAA-AVHRR NDVI GAC.

Keywords

aridity index • potential evapotranspiration • foliar phenology • bioclimate • NOAA-AVHRR NDVI GAC imagery

INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre cambios climáticos en Argentina indican para la provincia de Mendoza una disminución de precipitaciones en la cordillera y un aumento en la llanura oriental (58). Para determinar la marcha de las variaciones climáticas es necesario contar con una red de estaciones meteorológicas de varios años de registro. Sin embargo, en la llanura oriental (Travesías) de Mendoza (56085 km²) que se extiende N-S a lo largo de 440 km, hay un déficit de estaciones en el secano. Las estaciones se concentran en los oasis irrigados aunque ocupan sólo el 12% de la llanura (14).

Las imágenes satelitarias constituyen una valiosa herramienta en la evaluación climática de grandes extensiones. El radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR), a bordo de los satélites de NOAA (Administración Nacional para el Océano y la Atmósfera de EEUU), registra la reflectancia en el rojo del visible (canal 1 = 0,58-0,68 μ m) y en el infrarrojo cercano (canal 2 = 0,72-1,1 μ m), sectores del espectro electromagnético donde la vegetación activa presenta un comportamiento contrastado. Con estas imágenes se calcula el Índice Verde de la Diferencia Normalizada (en inglés NDVI) $IVDN = (\text{canal 2} - \text{canal 1}) / (\text{canal 2} + \text{canal 1})$ y se derivan las correspondientes imágenes de IVDN. El IVDN y la fracción de radiación fotosintéticamente activa están relacionados mediante una función curvilínea (7); de allí su vinculación con la actividad fotosintética de la cubierta vegetal (56) y de la relación entre patrones climáticos y fenología foliar a escala regional (22, 44).

La relación entre el IVDN como expresión de la fenología foliar y las precipitaciones ha sido muy documentada (19, 23). Entre los numerosos estudios regionales realizados para África se demostró una relación lineal entre el IVDN y la lluvia mientras ésta estuviera en el rango de 150-1000 mm (31). Anyamba & Tucker (2) profundizaron el análisis de la variabilidad de las precipitaciones a través de la variabilidad del IVDN a lo largo de 23 años en el Sahel. De este modo, las series temporales de imágenes NOAA-AVHRR NDVI permiten analizar los cambios fenológicos como respuesta a la variabilidad de las precipitaciones. Numerosos autores han aplicado las series de imágenes de IVDN al estudio de la variabilidad interanual producida por los eventos El Niño (ENSO) (5, 18, 45, 52) llegando a predecir el inicio de sequías en el NE de Brasil, con una anticipación de 4 meses y 68% de éxito (30).

Diversas metodologías han sido aplicadas para sintetizar las series temporales en pocos parámetros como las componentes principales (9, 54) y el análisis de Fourier (32, 46, 57). La Transformada Rápida de Fourier (TRF) es un algoritmo que descompone para cada pixel la serie temporal en varias componentes sencillas y comprensibles (parámetros de Fourier): un índice verde medio para toda la serie y, varias amplitudes y fases (3, 33). Cada amplitud y fase están asociadas a un determinado período, e.g., 9; 4,5; 3 años; 12; 6 meses, etc. La amplitud representa la medida de la máxima variabilidad del IVDN y la fase el tiempo transcurrido entre el inicio de la serie y el momento en que se produce la máxima variabilidad. La información sintetizada por los Parámetros de Fourier permite comprender el efecto de la lluvia sobre la vegetación (4) y la estacionalidad foliar (10) o explicar cuantitativamente las diferencias fenológicas debido a sequías o exceso de precipitaciones (13).

Roerink *et al.* (46) concluyeron que el IVDN medio y la amplitud a un año son indicadores sensibles a la variabilidad climática en Europa. Para el NE de Brasil se concluyó que la fase es útil para distinguir variaciones espaciales y estacionales de las lluvias (37) y que el IVDN medio concuerda con los regímenes de precipitaciones y los tipos de clima (30).

Los parámetros de Fourier resultantes de la descomposición de una serie de 108 imágenes IVDN mensuales fueron aplicados para estudiar en qué medida podían expresar las condiciones climáticas (particularmente el índice bioclimático de aridez P/ETP) de áreas extensas con escasos registros meteorológicos como las Travesías de Mendoza (14). La regresión multilínea aplicada permitió estimar el índice bioclimático de aridez P/ETP (variable dependiente), a través de las variaciones espaciales del IVDN medio y de la amplitud y fase a un año (variables independientes), y explicar 92% de la variación de P/ETP estimado. Este modelo optimiza la distribución espacial de los datos climáticos y ha permitido generar una imagen de índice bioclimático de aridez basada en la fenología foliar (14). Esta imagen es el punto de partida (material utilizado) del mapa bioclimático presentado en este trabajo.

El índice bioclimático de aridez ha sido calculado según la relación: P/ETP siendo P la lluvia anual promedio del período considerado y ETP la evapotranspiración potencial. La ETP se basa en la ecuación empírica de Le Houérou (24) $ETP = 68,64 * t$ donde t es la temperatura media anual en grados Celsius. Esta ecuación comparada con la ETP calculada con la ecuación de Penman para 196 estaciones áridas y saharianas del norte de África presenta una subestimación del 6,2% (24) y una sobreestimación de 7,1% en relación con la ETP medida durante cinco años en Túnez (25). Las diferencias entre esta ETP medida y la calculada con otros métodos son de -27,6% con Thornthwaite, +7,2% con Papadakis, +6,7% con Penman-Monteith y -6,4% con Penman standard (25), métodos utilizados en clasificaciones climáticas para Argentina (12, 27). De este modo, el error de estimación de la ETP calculada en este estudio es similar al obtenido aplicando las ecuaciones de Penman con la ventaja que permite trabajar con datos sencillos que son registrados por todas las estaciones meteorológicas.

Objetivo

Analizar los resultados del modelo bioclimático de aridez publicado por los mismos autores (14), particularmente la imagen del índice P/ETP estimado y generar una propuesta de mapa bioclimático de la llanura que refleje las diferencias climáticas expresadas por la actividad de la vegetación (fenología foliar).

Se obtuvo un mapa con cinco clases de bioclima: subdesértico, árido inferior, árido superior, semiárido inferior y semiárido superior.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La extensa llanura oriental forma parte de las planicies de la provincia de Mendoza (1) constituyendo las llamadas “Travesías”: Travesía de Guanacache al norte, Travesía del Tunuyán en la parte central y Pampa o Travesía de la Varita al sur del río Diamante (49) (figura 1).

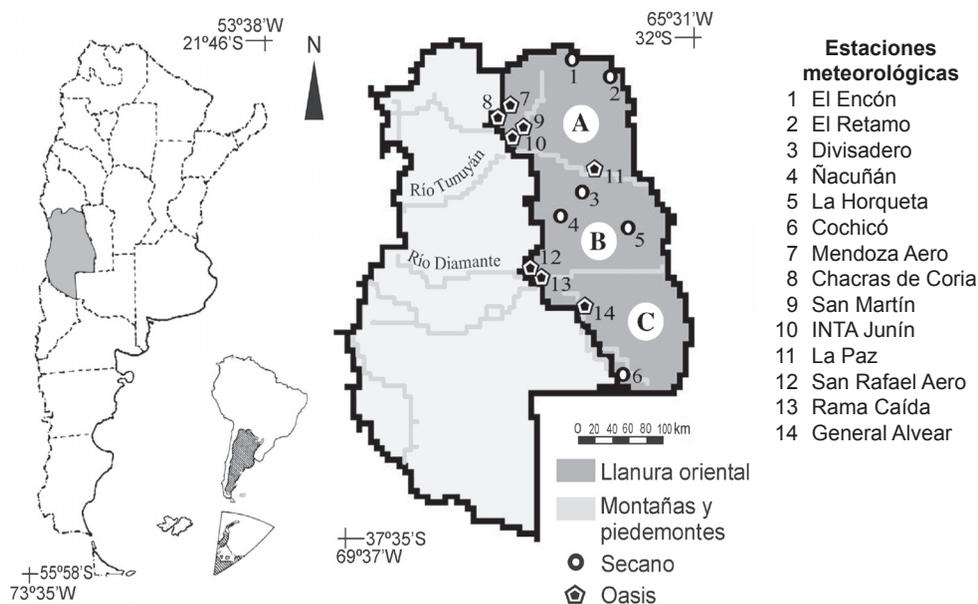


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona estudiada y localización de las estaciones meteorológicas de secano y oasis de la llanura oriental de Mendoza. A) Travesía de Guanacache, B) Travesía del Tunuyán, C) Travesía de la Varita.

Figure 1. Map showing location of study area and meteorological stations in drylands and oases of the eastern plain of Mendoza: A) Guanacache Travesía, B) Tunuyán Travesía, C) Varita Travesía.

Estas Travesías abarcan 3°57' de latitud, con una variación altitudinal de 530 a 440 msnm y diferencias de temperatura media anual desde más de 18°C en el norte hasta 15°C en el sur (tabla 1).

Tabla 1. Estaciones meteorológicas analizadas y datos climáticos considerados para las Travesías de Mendoza, Argentina.
Table 1. Analysed meteorological stations and climate data used for the Travesías of Mendoza, Argentina.

Estación meteorológica	Latitud	Long.	Altitud (msnm)	Periodo	Precipitación			Temp. med. anual °C f	ETP	Bioclima			
					Anual (mm/año)	% de octubre a marzo	CV %			P/ETP	P/ETP (aridez)	m	Estrés frío invernal m
1 El Encón ¹	32°15'	67° 50'	530	1971-87	167	88	54	18,20	1249	0,133	Subdesértico	1,09	Fresco
2 El Retamo ¹	32°27'	67° 24'	525	1971-85	155	80	67	18,70	1284	0,121	Subdesértico	3,50	Templado
3 Divisadero ¹	33°45'	67° 41'	520	1987-04	309	80	34	15,59	1070	0,289	Árido sup.	-3,81	Extremadamente frío
4 Ñacuñán ¹	34°02'	67° 58'	572	1972-02	346	76	35	15,56	1068	0,324*	Semiárido inf.	-1,09	Muy frío
5 La Horqueta ¹	34°10'	67° 10'	433	1978-90	417	79	33	16,11	1105	0,377**	Semiárido sup.	-0,68	Frío
6 Cochicó ¹	35°44'	67° 21'	440	1972-82	403	75	22	15,05	1033	0,390**	Semiárido sup.	-0,26	Frío
7 Mendoza Aero ²	32°50'	68° 47'	704	1951-00	198	76	SD	16,62	1140	0,174	Árido inf.	1,7	Fresco
8 Chacras de Coria ²	32°59'	68° 52'	921	1961-00	237	74	SD	14,70	1012	0,234	Árido inf.	0,10	Frío
9 San Martín ²	33°05'	68° 25'	653	1951-00	201	80	SD	15,92	1093	0,184	Árido inf.	1,4	Fresco
10 INTA Junín ²	33°09'	68° 28'	653	1971-80	204	84	SD	15,80	1084	0,188	Árido inf.	1,00	Fresco
11 La Paz ²	33°28'	67° 33'	506	1951-60	295	83	SD	16,80	1139	0,259	Árido sup.	0,4	Frío
12 San Rafael Aero ²	34°35'	68° 24'	748	1951-00	347	71	SD	15,18	1042	0,333	Semiárido inf.	1,1	Fresco
13 Rama Calda ³	34 40	68° 23	728	1950-03	350	72	40	15,00	1030	0,340	Semiárido inf.	-0,59	Frío
14 General Alvear ³	35°00'	67° 39'	465	1951-80	348	73	46	15,60	1071	0,325*	Semiárido inf.	1,1	Fresco

Fuente de los datos climáticos:

¹ Programa Regional de Meteorología Mendoza (PRM), ² Servicio Meteorológico Nacional (SMN) e ³ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).
 * Considerado semiárido inferior a pesar de $P/ETP < 0,34$ y ** considerado semiárido superior a pesar de $P/ETP < 0,42$ por sus respectivas ubicaciones en el mapa de anidez.

CV: coeficiente de variación interanual. SD: sin dato. ETP: evapotranspiración potencial (68,64 * t).

P: precipitación media anual. P/ETP: índice bioclimático de anidez.

m: temperatura mínima media de julio.

Las precipitaciones medias varían desde menos de 200 mm/año en el norte a 400 mm/año en el SE (38). De este modo y siguiendo el criterio de Galmarini & Raffo del Campo (11) y de Roig & Abraham (51) la llanura está transitada por la isohieta de 300 mm/año que divide la zona árida de la semiárida. En el uso del suelo se distinguen cultivos bajo riego (oasis) y campos con vegetación natural en secano (algarrobales abiertos, jarillales y médanos semifijos con estepas arbustivas) dedicados a la ganadería extensiva de caprinos y bovinos en pequeñas explotaciones (N) y de bovinos en explotaciones medianas (centro) a grandes (S) (15).

A las lluvias se suma el aporte hídrico de la capa freática ubicada a menos de 20 m de profundidad en toda la llanura. Se puede considerar constante su influencia con excepción del sector NW de la Travesía del Tunuyán, donde la freática supera los 30 m de profundidad y queda fuera del alcance de las raíces aunque hay aporte de agua subsuperficial retenida en lentes de arcilla (agua vadosa) (47, 49, 55). Los datos climáticos muestran la disparidad de su disponibilidad: las series más largas corresponden a las estaciones en los oasis; la serie más corta para el secano es de 13 años (La Horqueta) (figura 1 -pág. 108-, tabla 1 -pág. 109-). Debido a la variabilidad de las lluvias el error probable de la media anual para las series de datos más cortas (11 años) podría oscilar del 9 al 21% según estudios realizados para San Juan (34). Por esta razón el error en los datos observados en el presente estudio debería ser inferior.

Material utilizado: imagen *P/ETP* estimado

El material utilizado es la imagen de *P/ETP* estimado obtenida por González Loyarte *et al.* (14) mediante un modelo de regresión multilinear. En dicho modelo *P/ETP* fue la variable predicha y los parámetros de Fourier IVDN medio, amplitud y fase a un año fueron las variables predictoras (figura 2, pág. 111). Además de las imágenes de los parámetros de Fourier señalados se utilizaron datos de las imágenes de amplitud y fase a 9; 4,5; 3 y 1 año para modelar la marcha anual media del IVDN (fenología foliar).

Metodología: obtención del mapa de aridez

Tabla 2. Límites de clase del índice bioclimático de aridez *P/ETP* aplicados en la recodificación de la imagen de índice bioclimático estimado. Adaptación de Le Houérou (24, 25, 26, 27, 28).

Table 2. Class limits of the bioclimatic aridity index (*P/ETP*) applied in recoding the estimated bioclimatic index image. Adapted from Le Houérou (24, 25, 26, 27, 28).

<i>P/ETP</i>	Clase bioclimática	<i>P/ETP</i>	Clase bioclimática
0,06-0,15	Subdesértica		
0,16-0,33	Árida	0,16-0,24	Árida inferior
		0,25-0,33	Árida superior
0,34-0,50	Semiárida	0,34-0,41	Semiárida inferior
		0,42-0,50	Semiárida superior
0,51-0,75	Subhúmeda	0,51-0,59	Subhúmeda inferior
		0,60-0,68	Subhúmeda media
		0,69-0,75	Subhúmeda superior
≥ 0,76	Húmeda		

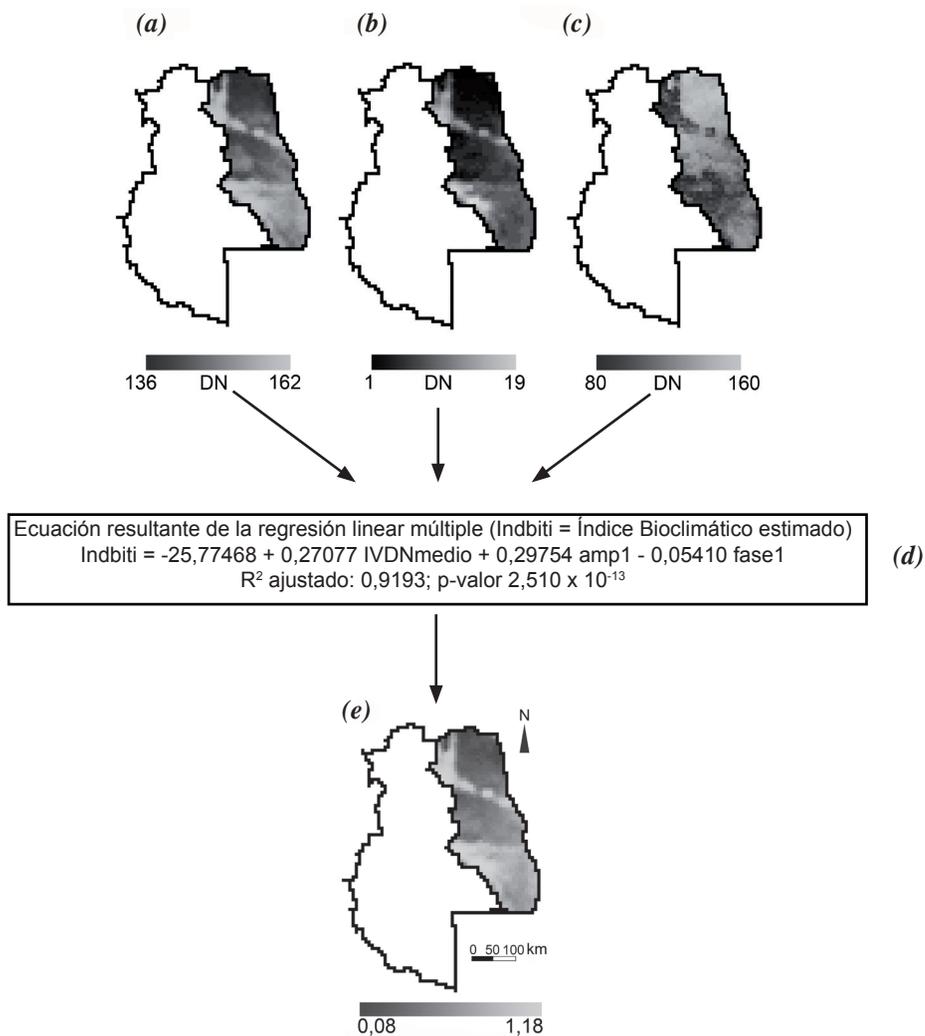


Figura 2. Proceso de obtención de la imagen del índice bioclimático *P/ETP* utilizada como material de trabajo. Variables predictoras (independientes): a) IVDN medio, b) Amplitud a 1 año, c) Fase a 1 año y d) Modelo de regresión lineal múltiple. e) Imagen de índice bioclimático *P/ETP* estimado. DN son los números o valores digitales de las imágenes. Adaptado de González Loyarte *et al.* (14).

Figure 2. Steps to obtain the image of the bioclimatic index *P/ETP* used as work material. Predictive variables (independent): a) Mean NDVI, b) Amplitude for a one-year period, c) Phase for a one-year period and d) Multiple linear regression model. e) Image of the estimated bioclimatic index *P/ETP*. DN are the digital numbers or values of the images. Adapted from González Loyarte *et al.* (14).

A la imagen de P/ETP estimado, con valores continuos (figura 2d, pág. 111), se aplicó una recodificación digital para transformar estos valores en rangos de aridez. Para establecer dichos rangos (clases) de P/ETP se siguió el criterio determinado por Le Houérou (25, 26, 27) para Argentina considerando las clases subdesértica (P/ETP : 0,06-0,15), árida (0,16-0,33), semiárida (0,34-0,50), subhúmeda (0,51-0,75) y húmeda ($\geq 0,76$) (tabla 2, pág. 110). Las clases árida, semiárida y subhúmeda se subdividieron en forma equidistante, adaptando el criterio de identificar matices de Le Houérou (28) debido a la gradación climática de la llanura (49). Se obtuvo un primer mapa del índice de aridez P/ETP . Las imágenes fueron procesadas con ERDAS 7.5.

Mapa bioclimático propuesto

Debido a que esta propuesta se basa en cambios regionales de la fenología foliar ha sido necesario evaluar cada una de las clases del índice de aridez del primer mapa y analizar en qué medida la influencia antrópica y edáfica podría modificar localmente la cubierta vegetal y no reflejar adecuadamente las condiciones climáticas. Este análisis se apoyó en antecedentes bibliográficos y cartográficos sobre distribución espacial de geoformas, suelos, vegetación y clima para Mendoza y provincias vecinas tratando de explicar lo que se presentó como incongruente climáticamente, como "islas" climáticas. Los resultados se expresaron en un ajuste del primer mapa de aridez mediante edición y recodificación digital de los píxeles involucrados obteniendo el mapa bioclimático de aridez propuesto. El mapa bioclimático que expresa la propuesta bioclimática es explicado justificando cada una de las decisiones y planteando las dudas surgidas de la ausencia de datos climáticos. Se incluyen las coordenadas de los límites de clase para facilitar su localización.

Ritmo anual medio de la fenología foliar

Se graficó la marcha fenológica anual para cada clase bioclimática a partir de una reconstrucción (modelado), mes a mes del IVDN, obteniendo la curva media anual del IVDN (4). Se seleccionaron píxeles de las clases bioclimáticas propuestas y para esas coordenadas se extrajeron de las imágenes correspondientes los valores de amplitud y fase para los períodos de 9, 4,5, 3 y 1 año. Con estos datos se aplicó la ecuación para obtener, mes a mes, el IVDN modelado (sin el ruido que introducen los períodos muy breves como 4, 3, 2, etc., meses) y graficar la curva del ritmo fenológico anual medio. Cada curva corresponde a un píxel de la clase bioclimática representada, que debido a su baja resolución espacial (7,6 x 7,6 km) integra las comunidades vegetales presentes en esa superficie. Se aplicó la ecuación (4):

$$I = \sum_n \left[A_n * \sin(\omega_n t + \varphi_n) + A_n * \cos(\omega_n t + \varphi_n) \right]$$

donde:

I = valor del IVDN modelado
 n = frecuencia (se consideraron cuatro frecuencias)

$$\omega_n = \frac{2\pi}{P_n}$$

A_n = valor de la amplitud correspondiente a la frecuencia ω_n

P_n = período en meses correspondiente a la frecuencia ω_n

t = tiempo, de 1 a 12 meses

φ = valor de la fase en radianes

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para realizar una propuesta de mapa bioclimático ha sido necesario confrontar los datos obtenidos en el primer mapa de aridez y ajustarlos en función de antecedentes existentes en clima, geformas, suelos, vegetación, que han permitido explicar las condiciones que modifican la expresión de la vegetación atribuyéndoles un bioclima diferente que aparece en forma de "isla" más húmeda o más seca que el entorno.

Generación del primer mapa de aridez

Los resultados de transformar los valores continuos de la imagen *P/ETP* estimados por González Loyarte *et al.* (14) en rangos de valores según criterios anunciados (tabla 2, pág. 110) se observan en el primer mapa de aridez (figura 3a).

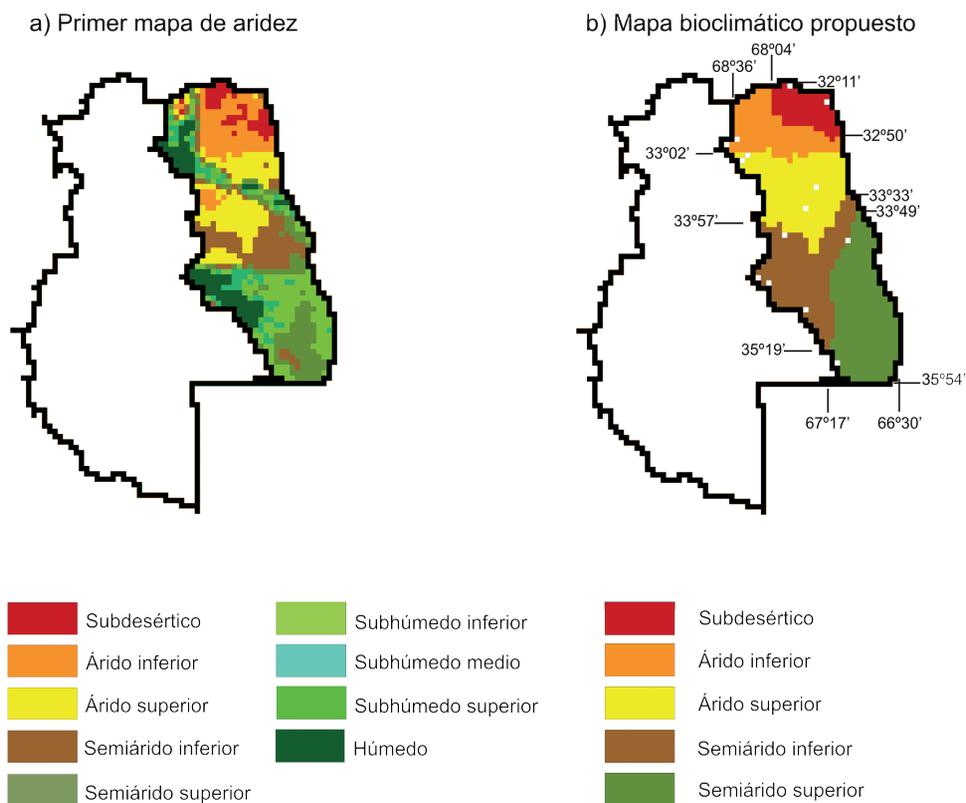


Figura 3. Proceso de obtención del mapa bioclimático propuesto. a) Primer mapa de aridez, resultante de la recodificación de la imagen de índice bioclimático *P/ETP*. b) Mapa bioclimático de aridez propuesto a partir de ajustes del mapa anterior; los puntos en blanco representan las estaciones meteorológicas.

Figure 3. Steps to obtain the proposed bioclimatic map: a) First aridity map, resulting from recoding the image of the bioclimatic index *P/ETP*. b) Proposed aridity bioclimatic map derived from the previous map; white dots show the location of meteorological stations.

La clase bioclimática de aridez asignada a cada estación meteorológica surge de la aplicación de los criterios del índice *P/ETP* planteados por Le Houérou (27) para Argentina excepto para Ñacuñán, General Alvear, La Horqueta y Cochicó donde a pesar de *P/ETP* inferior a dichos valores se decidió ajustarles la clase de aridez sobre la base de los resultados obtenidos de la recodificación de la imagen y los criterios de límite de precipitación discutidos a continuación (tabla 1, figura 1, figura 3a,b).

Mapa bioclimático propuesto

La distribución espacial de las clases del primer mapa de aridez (figura 3a, pág. 113) muestra que las clases de clima húmedo y subhúmedo (superior y medio) coinciden con los oasis y son de carácter edáfico debido al riego de 800 mm/año (35), así como la clase subhúmeda inferior periférica a los oasis (clase intermedia entre el seco y el oasis). Consecuentemente se asigna a los oasis la clase bioclimática del seco que los rodea que responde a condiciones naturales (figura 3b, pág. 113).

Para la llanura se propone modificar el límite de 400 mm/año entre el árido y semi-árido dado por Le Houérou (25, 26, 27) para el clima mediterráneo. La distribución de las lluvias y su coincidencia o no con el período de crecimiento de la vegetación determina la diferencia. En los seis patrones de distribución mensual de lluvias bajo clima mediterráneo el verano es siempre la estación más seca (sequías estivales) con diferencias muy importantes ya que llueve en verano entre 0 y 18% del total de lluvia anual (36). A tal punto es importante la influencia de las lluvias estivales en la vegetación que en la clasificación de fitoclimas mediterráneos, a igualdad de otros parámetros, la vegetación será biológicamente idéntica sólo si recibe una cantidad semejante de lluvia estival (36). La distribución de lluvias de la llanura sigue un patrón opuesto al mediterráneo ya que las sequías son invernales con una concentración primavera-estival (74-88%) de las precipitaciones anuales con un aprovechamiento directo de la vegetación (tabla 1, pág. 109).

La distribución de las lluvias determina la distribución geográfica de las comunidades vegetales. Así la alianza Mesobromion se desarrolla en Europa con precipitaciones de 900 mm/año pero puede extenderse a zonas de hasta 600-700 mm/año cuando las precipitaciones se concentran en verano (6). Se advierte que hay un mayor rendimiento de las lluvias cuando ocurren en el momento de mayor actividad de la vegetación. Por estas razones es que el límite de 400 mm entre el árido y semiárido bajo clima mediterráneo ha sido modificado a 300 mm/año de acuerdo con lo determinado para Argentina (11, 51).

Además, Le Houérou (comunicación personal, 2008) considera que este límite depende de la confiabilidad y mono o bimodalidad de las lluvias: con precipitaciones monomodales y confiables el límite árido-semiárido para Medio Oriente es de 300 mm/año. En Mendoza las precipitaciones son monomodales con una concentración primavera-verano (tabla 1, pág. 109), que es cuando las temperaturas medias diarias superan los 12°C, umbral térmico a partir del cual se produce crecimiento vegetal si la humedad es adecuada (29). Por estas razones se mantuvo el límite de *P/ETP* dado por Le Houérou (27) pero se redujo de 400 a 300 mm/año el límite superior de lluvia para el bioclima árido.

Los resultados de la distribución de las clases subdesértica, árido y semiárida se discuten detalladamente:

Bioclima subdesértico

Mediante edición se dio continuidad espacial a la clase subdesértica debido a que los antecedentes confirmaron que es la zona más cálida de Mendoza (figura 3a,b). Esta clase continúa sin conflicto el clima desértico cálido de San Juan (42) en coincidencia con la temperatura media anual superior a 18 °C que sólo presentan las estaciones de El Encón y El Retamo (figura 1, tabla 1). También es coincidente con la isoterma de enero 26°C trazada por Roig *et al.* (49) que atraviesa como un eje NW-SE la clase subdesértica propuesta. Por otro lado, De Fina *et al.* (8) asignan al extremo NE de Mendoza el distrito agroclimático Las Casuarinas y lo describen como el más cálido de la provincia. Las condiciones de alta temperatura y estrés hídrico son confirmadas por Poblete & Minetti (43) al estimar 1800 mm/año de ETP mediante un modelo aplicado al desierto subtropical argentino; esta isolinéa envuelve la clase subdesértica.

Debido a la baja resolución espacial de la imagen, cada pixel cubre 7,6 x 7,6 km; el modelo de marcha del IVDN refleja el ritmo fenológico del conjunto de comunidades contenidas en dicha superficie: las estepas arbustivas sobre médanos, los bosques cerrados a semicerrados en valles y los abiertos a muy abiertos en ondulaciones arenosas con escaso contraste de cobertura total entre invierno y verano. El máximo valor de cobertura (IVDN) se da tardíamente (abril) (figura 4). La clase de bioclima subdesértico muestra el mayor coeficiente de variación interanual de lluvia (El Encón: 54%, El Retamo: 67%) con precipitaciones anuales inferiores a 200 mm, concentradas en primavera verano (80-88%), e inviernos templados a frescos (tabla 1) y cubre el 8,4% de la llanura.

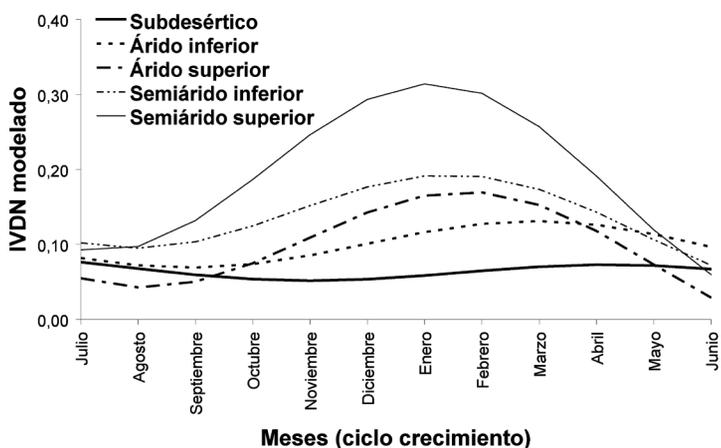


Figura 4. Modelado anual de la marcha del IVDN (fenología foliar) para la clases bioclimáticas propuestas para la llanura oriental de Mendoza.

Figure 4. Modelled yearly NDVI curve (foliar phenology) for the bioclimatic classes proposed for the eastern plain of Mendoza.

Bioclima árido

Esta clase, dividida en árida inferior y superior (tabla 2, pág. 110) muestra los matices climáticos existentes en la llanura, con un cambio gradual N-S, que se reflejan en la fenología foliar media (figura 4, pág. 115). Según Le Houérou (27) la precipitación de la clase árida debería ser de 200 a 400 mm/año.

La clase *árida inferior*, cuyo límite sigue de cerca la isohieta de 200 mm/año trazada por Norte (38), involucra en el oasis las estaciones de alrededor de 200 mm/año (Mendoza Aero, San Martín, Junín y Chacras de Coria) con el 75% de las lluvias concentradas de octubre a marzo (tabla 1 -pág. 109-, figura 3b -pág. 113-). Esta clase también aparece a modo de "isla" en el NW de la Travesía del Tunuyán (figura 3a, pág. 113) en coincidencia con la planicie fluvio-lacustre con derrames y playas (1). La zona presenta una red de arroyos secos que descienden de las huayquerías con derrames de escasa cubierta vegetal observables en la carta de imagen satelitaria a escala 1:250000 (21). Esta "isla" responde a condiciones geomorfológicas y edáficas que determinan una menor cobertura vegetal que la zona oriental y consecuentemente una categoría climática inferior, es decir una inconsistencia bioclimática por razones edáficas. Por ello se propone que la zona de bioclima árido inferior se extienda sólo en la Travesía de Guanacache en coincidencia con los antecedentes del sistema climático de Koeppen (38) y el índice pluviotérmico de Emberger (48), que marcan al río Tunuyán como límite del clima seco desértico e hiperárido, respectivamente. La clase árida inferior (P/ETP 0,16-0,24), con precipitaciones de 200 mm/año e inviernos frescos a fríos, cubre 15,3% de la llanura.

En la zona con *bioclima árido superior* quedaban inicialmente involucradas las estaciones La Paz, El Divisadero y Ñacuñán; posteriormente se decidió asignar la localidad de Ñacuñán al bioclima semiárido inferior (tabla 1 -pág. 109-, figura 3a,b -pág. 113-). Las dos primeras estaciones se localizan en plena clase, Ñacuñán en cambio se encuentra geográficamente en el límite entre la clase árida superior y semiárida inferior y por problema de escala no se puede ubicar exactamente su coordenada ya que está contenida en un pixel intermedio entre las dos clases, de modo que podría pertenecer geográficamente a una u otra clase climática. Por su valor de P/ETP (0,324) si bien es inferior al límite de clase semiárida (0,33) está muy cerca de su valor. Por otra parte, la precipitación media anual de Ñacuñán (346 mm) supera la dada como límite inferior de la zona semiárida (300 mm) (11, 51) aunque no el límite inferior establecido por Le Houérou (27) para la zona semiárida que es de 400 mm/año cuya validez para climas con lluvias primavera-estivales ya se discutió.

La estación El Divisadero, debido a la variabilidad interanual, presenta 62% de los años con P/ETP entre 0,25 y 0,33 (árido superior) y un 31% de los años el índice es superior a 0,33 (semiárido). Esta razón, sumada a que posee un promedio de 309 mm/año (tabla 1) y dado que la zona ha sido clasificada en la imagen como árida superior, lleva a asignar a la zona del Divisadero esta clase climática. El bioclima árido superior corresponde a P/ETP 0,25-0,33 y precipitación de 200-300 mm/año con inviernos fríos a extremadamente fríos. El bioclima árido superior representa el 24,2% de la llanura.

Bioclima semiárido

El bioclima *semiárido inferior* se caracteriza por *P/ETP* 0,34-0,41 y 300-400 mm/año según criterios mencionados precedentemente. Para la localidad de Ñacuñán, además de las razones esgrimidas para ubicarla en el bioclima semiárido inferior por su proximidad geográfica y precipitación se suma el argumento de cierta semejanza con otras estaciones. Ñacuñán presentaba en el período 1921-1950 lluvias semejantes a las de las estaciones vecinas (al sur): Arístides Villanueva, Guadales y Monte Comán (tabla 3). Al quedar estas tres estaciones incluidas dentro del bioclima semiárido inferior en la zonificación de la imagen se confirma la decisión de incluir a Ñacuñán en el bioclima semiárido inferior, aunque muy próximo a las condiciones del árido superior.

Tabla 3. Comparación de lluvias anuales entre la primera y segunda mitad del siglo XX para diversas localidades clasificadas con bioclima semiárido inferior en las Travesías de Tunuyán y de la Varita, Mendoza, Argentina.

Table 3. Comparison of annual rainfall between the first and second half of the XX century for localities assigned lower semiarid bioclimate in Tunuyán and Varita Travesías.

Estación	Lluvia anual (mm) 1 ^{ra} mitad Siglo XX	Lluvia anual (mm) 2 ^{da} mitad Siglo XX	Incremento (mm)	Coordenadas geográficas
Ñacuñán	270 (DF1)	346 (2)	76	34°02'S, 67°58'W
Arístides Villanueva	273 (SMN)	SD	SD	34°14'S, 67°55'W
Guadales	251 (SMN)	SD	SD	34°29'S, 67°53'W
Monte Comán	283 (SMN)	SD	SD	34°36'S, 67°53'W
San Rafael	278 (DF1)	347 (2)	69	34°35'S, 68°24'W
Rama Caída	263 (DF)	346 (2)	83	34°40'S, 68°23'W
General Alvear	270 (SMN)	348 (2)	78	35°00'S, 67°39'W

(DF1) De Fina *et al.* (8), obtenido de Archivo pluviométrico del SMN; (SMN) Servicio Meteorológico Nacional (53); (DF) De Fina *et al.* (8), sin especificar su origen; (2) ver Tabla 2; SD: sin dato.

La clase semiárida inferior es extendida en forma continua hasta el río Diamante absorbiendo la "isla" de clima árido superior (entre los 34°16' y los 34°28') que se localiza entre las estaciones de Arístides Villanueva y Guadales y que corresponde a un conjunto de médanos extensos (Médano Colorado, Médanos Los Naranjos y Médanos Los Carboneros) cuya influencia edáfica modificaría la expresión climática de la vegetación por un clima más seco que el que los rodea. Esta "isla" da una clase por debajo de las precipitaciones que podrían ser del orden de 350 mm asumiendo variaciones semejantes de precipitación para Ñacuñán, Arístides Villanueva, Monte Comán, San Rafael, Rama Caída y General Alvear entre 1921-1950 y los últimos 30 a 50 años (tabla 3, figura 1 -pág. 108-).

Para el oasis sur, representado por las estaciones de San Rafael, Rama Caída y General Alvear (figura 1 -pág. 108-, tabla 1 -pág. 109-), también se propone el bioclima semiárido inferior ya que las precipitaciones medias son > 300 mm/año y la zonificación del secano involucrado corresponde al bioclima semiárido inferior (figura 3a,b -pág. 113-). Para estas estaciones el porcentaje de años con precipitación anual > 300 mm es superior al 50% (Ñacuñán 68%, Rama Caída 62% y General Alvear 56%).

El límite oriental de la clase coincide en buena medida con la isohieta actual de 400 mm/año que podría trazarse uniendo las estaciones de La Horqueta y Cochicó (tabla 1 -pág. 109-, figura 3b -pág. 113-). El bioclima semiárido inferior propuesto, con lluvias de 300 a 400 mm/año concentradas en primavera-verano (71-76%) e inviernos que varían según la zona de frescos a muy fríos, cubre el 25% de la llanura.

La clase *semiárida superior* propuesta involucra el territorio al este de la isohieta de 400 mm/año (figura 3b, pág. 113). La misma incluye el sector al sur del río Diamante que presenta un núcleo con clase semiárida superior rodeado por la clase subhúmeda inferior; esta última clase está en parte asociada al borde de oasis y ríos (Diamante, Atuel y Salado) por lo que se considera parcialmente una influencia edáfica (figura 3a, pág. 113). De acuerdo con el modelo, la clase subhúmeda inferior resulta muy alta en humedad para la zona considerando las condiciones climáticas de las vecinas provincias de San Luis y La Pampa. Esto es razonable debido a la mayor variabilidad de la predicción en el rango de valores correspondientes a la región donde no se cuenta con estaciones meteorológicas. La "isla" de clase semiárida inferior en medio de la clase semiárida superior corresponde a los médanos de General Alvear que son una continuidad de los cordones medanosos (Torripsamente típico) con pastizales de La Pampa (40) dentro del distrito agroclimático La Pastoril (8). En consecuencia se decidió asignar a todo el sector el clima semiárido superior limitado al oeste por la isohieta de 400 mm/año continuando la misma subregión climática, para el cálculo de productividad de suelos, que San Luis y La Pampa (20, 40, 41).

La clase semiárida superior propuesta se despliega N-S desde la desembocadura del río Tunuyán al Desaguadero hasta el límite con la provincia de La Pampa. La presencia de caldén (*Prosopis caldenia*) (50), árbol de raíces superficiales (47), es consistente con esta clase bioclimática ya que no usufructuaría la freática sino la humedad superficial aportada por las lluvias. De Fina *et al.* (8) y Roig *et al.* (48) asignan a la llanura, al sur del río Diamante, un carácter más húmedo. Para las estaciones de La Horqueta y Cochicó, en el 50% de los años la precipitación es ≥ 400 mm/año pero sólo en el 20% de los años supera los 500 mm/año. Este bioclima, con el 75-79% de las lluvias entre octubre y marzo, ha posibilitado ensayos de implantación de pasturas de clima semiárido como *Eragrostis curvula* (39).

La clase propuesta presenta valores de P/ETP 0,42-0,50 con precipitaciones ≥ 400 mm/año e inviernos fríos y cubre el 27,1% de la llanura (figura 3a,b -pág. 113-). Esta clase muestra el menor coeficiente de variación interanual de lluvia (La Horqueta 33% y Cochicó 22%) y es la que presenta la mayor amplitud en la marcha anual del IVDN modelado (contraste entre la cobertura vegetal de invierno y verano) alcanzando el mayor IVDN en enero (figura 4, pág. 115).

Progresión climática

El modelo de la marcha anual del IVDN (figura 4, pág. 115) muestra una progresión, en el valor máximo de índice verde (amplitud) y en el momento en que éste se produce (fase), entre el clima subdesértico y el semiárido superior. A medida que disminuye la aridez el contraste entre el valor mínimo y máximo del índice verde se acentúa. Por otro

lado, el momento en que se logra la máxima cobertura (máximo IVDN), con respecto al inicio del ciclo en julio, se reduce con la mayor disponibilidad hídrica variando desde abril para el clima subdesértico a enero para el semiárido. Se advierte que cada condición climática tiene una expresión vegetativa diferente a lo largo de todo el año.

Si bien los valores de *ETP* estimados por Poblete & Minetti (43), en función de la temperatura máxima, superan los estimados según la ecuación de Le Houérou ($ETP = 68,64 * t$) la zonificación dada por estos autores muestra que la isolínea de mayor *ETP* de Mendoza (1800 mm/año) se corresponde con la clase de bioclima subdesértico propuesta; que la clase árida se corresponde en buena medida con el área de *ETP* 1600-1800 mm/año y que la clase semiárida inferior es parcialmente atravesada por la línea de 1500 mm/año. El gradiente climático N-S es reflejado por la capacidad de carga animal sustentable que varía de 64,5 ha/equivalente vaca (EV) para la zona subdesértica-árida inferior (Lavalle), a 25ha/EV para el bioclima árido superior (Divisadero) y a 16 ha/EV para el semiárido superior (General Alvear) (16, 17).

Esta propuesta permite extender el conocimiento climático de las estaciones meteorológicas a toda la llanura mediante la expresión fenológica de la vegetación (en condiciones naturales) ya que ésta refleja las condiciones climáticas. Las clases bioclimáticas propuestas muestran una distribución geográfica continua, evidencia de coherencia espacial y homogeneidad de las clases, características que reflejan la influencia climática. De haber aparecido una alternancia espacial de clases distintas (mezcla de píxeles) derivadas de la imagen del índice bioclimático de aridez en distancias muy reducidas hubiera reflejado una heterogeneidad climática que no sería consistente debido a la ausencia de relieves muy contrastados como cerros altos o valles amplios y profundos.

CONCLUSIÓN

Propuesta novedosa que se basa en la expresión de la vegetación (fenología foliar) como respuesta a las distintas condiciones climáticas tratando de explicar y soslayar las influencias edáficas y antrópicas a nivel regional. Debido a que el mapa bioclimático ha sido elaborado sobre la base del ritmo de la fenología foliar, detectado por imágenes satelitarias de IVDN, permite una distribución espacial continua de los datos bioclimáticos optimizando los datos climáticos de las estaciones meteorológicas existentes (puntuales).

Como esta propuesta se basa en los cambios regionales en la fenología foliar y ya que éstos pueden ser modificados por razones antrópicas (riego) o naturales (médanos), ha sido necesario analizar y ajustar los resultados de modo de explicar climáticamente estas diferencias. Este aspecto debe ser tenido en cuenta en la aplicación de la metodología.

Globalmente esta propuesta muestra coherencia con los mapas climáticos existentes elaborados exclusivamente con datos climáticos y plantea una zonificación

ajustada en función de la actividad de la vegetación. El mapa propuesto plantea cinco clases bioclimáticas en función de la aridez: subdesértica, árida (inferior y superior) y semiárida (inferior y superior); las clases de mayor aridez abarcan el 48% de la llanura y la semiárida el 52%.

BIBLIOGRAFÍA

1. Abraham, E. M. 2000. Geomorfología de la Provincia de Mendoza. p. 29-48. En: E. M. Abraham & F. Rodríguez Martínez (eds.). Argentina. Recursos y Problemas Ambientales de la Zona Árida. Primera Parte. Provincias de Mendoza, San Juan y La Rioja. Vol. I-II. PAN/SDSyPA-INTA-GTZ, IADIZA, Universidad de Granada. Mendoza, Argentina.
2. Anyamba, A.; C. J. Tucker. 2005. Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003. *J. Arid Environ.* 63(3): 596-614.
3. Azzali, S.; M. Menenti (eds.). 1996. Fourier analysis of temporal NDVI in the Southern African and American continents. Report 108. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Wageningen, The Netherlands. 149 p.
4. _____; M. Menenti 2000. Mapping vegetation-soil-climate complexes in southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR data. *Int. J. Rem. Sens.* 21(5): 973-996.
5. Barbosa, H. A.; A. R. Huete; W. E. Baethgen. 2006. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. *J. Arid Environ.* 67(2): 288-307.
6. Braun-Blanquet, J. 1979. Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales. H. Blume Ediciones, Madrid. 820 p.
7. Choudhury, B. J. 1987. Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitive analysis. *Remote Sens. Environ.* 22(2): 209-233.
8. De Fina, A. L.; F. Giannetto; A. E. Richard; L. J. Sabella. 1964. Difusión geográfica de cultivos índices en la Provincia de Mendoza y sus causas. Instituto de Suelos y Agrotecnia, Publicación N° 83. INTA: Buenos Aires, Argentina. 61 p.
9. Eastman, J. R.; M. Fulk. 1993. Long sequence time series evaluation using standardized principal components. *Photogramm. Eng. Rem. Sens.* 59(6): 991-996.
10. Fuller, D. O.; S. D. Prince. 1996. Regional-scale foliar phenology in tropical Southern Africa: An application of the Fast Fourier Transform to time series of satellite imagery. p.113-132. In: S. Azzali & M. Menenti (eds.). Fourier analysis of temporal NDVI in the Southern African and American continents. Report 108. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research. Wageningen, The Netherlands.
11. Galmardini, A. G.; J. M. Raffo del Campo. 1963. Condiciones de aridez y humedad en la República Argentina. Consejo Nacional de Desarrollo. Buenos Aires, Argentina. 55 p.
12. García, C. V. 1967. Análisis de las clasificaciones climáticas del territorio argentino. Centro de Estudios Geográficos, Serie A (24): 1-82. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires.
13. González Loyarte, M. M.; M. Menenti. 2008. Impact of rainfall anomalies on Fourier parameters of NDVI time series of northwestern Argentina. *Int. J. Rem. Sens.* 29(4): 1125-1152.
14. _____; M. Menenti; A. M. Diblasi. 2008. Modelling bioclimate by means of Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI time series in Western Argentina. *Int. J. Climatol.* 28(9): 1175-1188.
15. Guevara, J. C.; J. A. Páez; O. R. Estevez. 1993. Caracterización económica de los principales sistemas de producción ganadera en el árido mendocino. *Multequina.* 2: 259-273.
16. _____; O. R. Estevez; E. R. Torres. 1995. Receptividad de las pasturas naturales de la llanura de Mendoza. *Multequina.* 4: 29-35.
17. _____; J. B. Cavagnaro; O. R. Estevez; H. N. Le Houérou; C. R. Stasi. 1997. Productivity, management and development problems in the arid rangelands of the central Mendoza plains (Argentina). *J. Arid Environ.* 35(4): 575-600.
18. Gurgel, H. C.; N. J. Ferreira. 2003. Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate. *Int. J. Rem. Sens.* 24(18): 3595-3609.
19. Henricksen, B. L.; J. W. Durkin. 1986. Growing period and drought early warning in Africa using satellite data. *Int. J. Rem. Sens.* 7(11): 1583-1608.
20. Hudson, R. R.; A. Aleksa; H. T. Masotta; E. Muro. 1990. Provincia de Mendoza. Tomo II: 71-106. En: INTA (ed.). INTA Atlas de suelos de la República Argentina. Buenos Aires, Argentina.

21. Instituto Geográfico Militar. 1998. San Martín 3369-IV, Provincia de Mendoza. Carta de Imagen Satelitaria de la República Argentina 1:250.000. Buenos Aires.
22. Justice, C. O.; B. N. Holben; M. D. Gwynne. 1986. Monitoring East African vegetation using AVHRR data. *Int. J. Rem. Sens.* 7(11): 1453-1474.
23. _____; G. Dugdale; J. R. G. Townshend; A. S. Narracott; M. Kumar. 1991. Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development in semi-arid West Africa. *Int. J. Rem. Sens.* 12(6): 1349-1368.
24. Le Houérou, H. N. 1989. Classification éoclimatique des zones arides (s.l.) de l'Afrique du Nord. *Ecologia Mediterranea.* 15: 95-144.
25. _____. 1995. Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. Diversité biologique, développement durable et désertisation. Options Méditerranéennes Série B: Études et recherches, N° 10. Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes. Montpellier. Francia. 397 p.
26. _____. 1995. Climate change drought and desertification. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Working Group II Adaptation and Mitigation. 53 p.
27. _____. 1999. Estudios e investigaciones ecológicas de las zonas áridas y semiáridas de Argentina. Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas. Mendoza, Argentina. 228 p.
28. _____. 2004. An Agro-Bioclimatic Classification of Arid and Semiarid Lands in the Isoclimatic Mediterranean Zones. *Arid Land Res. Manag.* 18(4): 301-346.
29. _____; G. F. Popov; L. See. 1993. Agro-bioclimatic Classification of Africa. FAO Agrometeorology Series 6. Roma. 227 p.
30. Liu, W. T.; R. I. Negrón Juárez. 2001. ENSO drought onset prediction in northeast Brazil using NDVI. *Int. J. Rem. Sens.* 22(17): 3483-3501.
31. Malo, A. R.; S. E. Nicholson. 1990. A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using normalized difference vegetation index. *J. Arid Environ.* 19(1): 1-24.
32. Menenti, M.; S. Azzali; W. Verhoef; R. van Swol. 1991. Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. Monitoring Agroecological Resources with Remote Sensing and Simulation (MARS). Report 32. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research. Wageningen, The Netherlands. 46 p.
33. _____; S. Azzali; W. Verhoef; R. van Swol. 1993. Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. *Adv. Space Res.* 13(5): 233-237.
34. Minetti, J. L.; P. M. Barbieri; M. C. Carletto; A. G. Poblete; E. M. Sierra. 1986. El régimen de precipitación de la provincia de San Juan y su entorno. Informe Técnico N° 8. Centro de Investigaciones Regionales de San Juan. CONICET(CIRSAJ). 174 p.
35. Morábito, J. A.; E. P. Querner; D. Tozzi. 2005. SIMGRO regional hydrological model as a tool to evaluate water and salinity control measures in Mendoza North oasis irrigated area. In *Groundwater Resources Sustainability Indicators*, VIIIth IAHS Scientific Assembly, Foz do Iguaçu, Brazil.
36. Nahal, I. 1981. The Mediterranean climate from a biological viewpoint. Chapter 3: 63-86 en: Castri, F di; DW Goodall; RL Specht (eds.). *Ecosystems of the world 11. Mediterranean-type shrublands.* Elsevier. Paris, Francia.
37. Negrón Juárez, R. I.; W. T. Liu. 2001. FFT analysis on NDVI annual cycle and climatic regionality in Northeast Brazil. *Int. J. Climatol.* 21(14): 1803-1820.
38. Norte F. 2000. Mapa climático de Mendoza. p. 25-27. En: E. M. Abraham & F. Rodríguez Martínez (eds.). *Argentina. Recursos y Problemas Ambientales de la Zona Árida. Primera Parte. Provincias de Mendoza, San Juan y La Rioja. Vol.I-II.* PAN/SDSyPA-INTA-GTZ, IADIZA, Universidad de Granada. Mendoza, Argentina.
39. Ochoa, M. A.; O. Terenti; C. A. Frasinelli. 2002. Implantación de especies forrajeras perennes en el sudeste mendocino. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Informe interno. INTA San Luis, Argentina.
40. Peña Zubiati, C. A.; D. Maldonado Pinedo. 1990. Provincia de La Pampa. Tomo II: 1-37. En: INTA (ed.). *INTA Atlas de suelos de la República Argentina.* Buenos Aires, Argentina.
41. _____; M. A. Demmi; A. d'Hiriart; A. A. Marchi. 1990. Provincia de San Luis. Tomo II: 377-410. En: INTA (ed.). *INTA Atlas de suelos de la República Argentina.* Buenos Aires, Argentina.
42. Poblete, A. G.; J. L. Minetti. 1999. Los Mesoclimas de San Juan. Instituto de Geografía Aplicada Informe Técnico N° 11 (en CD). Facultad de Filosofía Humanidades y Artes, Univ. Nac. de San Juan, Argentina.

43. _____; J. L. Minetti. 2001. Distribución areal de la evapotranspiración potencial en el desierto subtropical argentino. *Revista del Departamento de Geografía* VI(6): 58-70. Univ. Nac. de Tucumán, Argentina.
44. Potter, C. S.; V. Brooks. 1998. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. *Int. J. Rem. Sens.* 19(15): 2921-2948.
45. Poveda, G.; L. F. Salazar. 2004. Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index (NDVI) in Amazonia. *Remote Sens. Environ.* 93(3): 391-401.
46. Roerink, G. J.; M. Menenti; W. Soepboer; Z. W. Su. 2003. Assessment of climate impact on vegetation dynamics by using remote sensing. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 28: 103-109.
47. Roig, F. A. 1993. Informe Nacional para la selección de germoplasma en especies de *Prosopis* de la República Argentina. p. 1-71. En: IADIZA-CRICYT-C.I.I.D (eds.). *Contribuciones Mendocinas a la Quinta Reunión Regional para América Latina y el Caribe de la Red de Forestación del C.I.I.D. Conservación y mejoramiento de especies del género Prosopis*. Mendoza, Argentina.
48. _____; E. Martínez Carretero; E. Méndez. 1988. Mapa Ecológico de la Provincia de Mendoza. *Suplemento Diario Los Andes*: Mendoza, Argentina. 2 p.
49. _____; M. M. González Loyarte; E. Martínez Carretero; A. Berra; C. Wuilloud. 1992. La Travesía de Guanacache, Tierra Forestal. *Multequina*. 1: 83-91. Mendoza, Argentina.
50. _____; E. Martínez Carretero; E. Méndez. 2000. Vegetación de la Provincia de Mendoza. p. 63-64. En: E. M. Abraham & F. Rodríguez Martínez (eds.). *Argentina. Recursos y Problemas Ambientales de la Zona Árida. Primera Parte. Provincias de Mendoza, San Juan y La Rioja. Vol. I-II. PAN/SDSyPA-INTA-GTZ, IADIZA, Universidad de Granada*. Mendoza, Argentina.
51. _____; E. M. Abraham. 2003. Regiones agropecuarias naturales de las zonas áridas y semiáridas argentinas como unidades de base para el análisis de los indicadores de la desertificación. p.175-187. En: Abraham *et al.* (eds). *Desertificación. Indicadores y puntos de referencia en América Latina y el Caribe*. LaDyOT-IADIZA-CONICET. Mendoza, Argentina.
52. Seiler, R. A.; F. Kogan. 2002. Monitoring ENSO cycles and their impacts on crops in Argentina from NOAA-AVHRR satellite data. *Adv. Space Res.* 30(11): 2489-2493.
53. Servicio Meteorológico Nacional. 1973. Datos pluviométricos 1921-50. Servicio Meteorológico Nacional, Publicación B1, N°2. Buenos Aires. 160 p.
54. Soriano, A.; J. M. Paruelo. 1992. Biozones: vegetation units defined by functional characters identifiable with the aid of satellite sensor images. *Global Ecol. & Biogeog. Letters*, 2: 82-89.
55. Torres, E. 2001. Hidrología o Recursos Hídricos superficiales y subterráneos. p. 35-40. En Claver, S. & Roig-Juñent, S. (eds). *El desierto del Monte: La Reserva de Biosfera de Ñacuñán*. IADIZA-CRICYT, MAB-UNESCO/ORCYT. Mendoza, Argentina.
56. Tucker, C. J.; P. J. Sellers. 1986. Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Rem. Sens.* 7(11): 1395-1416.
57. Verhoef, W. 1996. Application of Harmonic Analysis of NDVI Time Series (HANTS). p. 19-24. In S. Azzali and M. Menenti (eds.). *Fourier Analysis of Temporal NDVI in the Southern African and American Continents*. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research. Wageningen, The Netherlands.
58. Villalba, R. 2006. Calentamiento global y cambios climáticos regionales. *Ciencia Regional* I(2): 4-6. Mendoza, Argentina.

Agradecimientos

A F. A. Roig, H. N. Le Houérou, J. C. Guevara, C. Regairaz y a todos los revisores por sus valiosas sugerencias.

Al Programa Regional de Meteorología de Mendoza por el acceso a datos inéditos.

A M. C. Scoones, Magraf y V. Lotti W. por su ayuda en el diseño gráfico.

A C. Jacobs por su apoyo bibliográfico.

A N. Horak por la traducción del resumen al inglés.