

CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE THORNTHWAITE PARA LAS PROVINCIAS DE JUJUY Y SALTA, ARGENTINA

THORNTHWAITE CLIMATE CLASSIFICATION FOR THE PROVINCES OF JUJUY AND SALTA, ARGENTINA

Alabar, F. D.^{1*}, Tejerina, Y. S.², Valdiviezo Corte, M. B.¹, Lamas, M. J.³, Woletz, E.³, Chaile, V.⁴, Mercado, C.⁴, Llanos Tarifa, Marianela³, Rodríguez, F.³, Hurtado, R.¹

¹ Cátedra de Agroclimatología, Facultad de Ciencias Agrarias, UNJu

² Instituto de Ecorregiones Andinas, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³ Estudiante de la carrera de Ingeniería Agronómica de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNJu

⁴ Centro de Estudios Bioestadísticas, Bioinformáticas y Agromática Facultad de Ciencias Agrarias, UNJu

***Autor para correspondencia:**
davidalabar@fca.unju.edu.ar

Período de Publicación:
Junio 2026

Historial:
Recibido: Septiembre 2025
Aceptado: Mayo 2026

RESUMEN

Una clasificación climática establece zonas donde los diferentes elementos del clima son similares. Esto permite la caracterización de la región o localidad, y su conocimiento es necesario para estudios de impacto ambiental, escenarios de cambio climático, e investigaciones agronómicas aplicadas. Este trabajo tiene como objetivo determinar la clasificación climática de Thornthwaite para las provincias de Jujuy y Salta de Argentina. Se utilizaron raster(s) de precipitación y evapotranspiración mensual media del periodo 1960-2021, y la capacidad de campo obtenida por ecuaciones de pedotransferencia. Mediante el método del Balance hidrológico climático y los tres elementos anteriormente descritos, se obtuvieron los componentes necesarios para la clasificación climática. Cuatro de las nueve regiones hídricas (Subhúmedo-Húmedo "C2", Subhúmedo-Seco "C1", Semiárido "D", Árido "E") se encuentran en las provincias de Jujuy y Salta. La región hídrica Semiárido "D" está presente en mayor extensión territorial en ambas provincias (38%), mientras que Subhúmedo-Húmedo "C2" en menor medida (3%). Para los climas secos la variación estacional de la eficiencia hídrica resulta en "Poco o ningún excedente de agua" (d), y en el clima húmedo "Poco o ninguna deficiencia de agua" (r). La concentración estival de la eficiencia térmica en ambas provincias es (a'), lo que indica que menos del 42% de la evapotranspiración anual, se concentra durante el verano. El régimen térmico abarca seis de nueve tipos climáticos, con mayor porcentaje en el Megatermal o cálida (29%), en el sector este de la provincia de Salta, mientras que el menor es Mesotérmica templada cálida (9%). La clasificación climática de Thornthwaite permitió resaltar los diferentes tipos de climas en ambas provincias. Esta información resulta necesaria para evaluar el impacto de las cambiantes condiciones climáticas en un contexto de cambio climático.

Palabras clave: balance hidrológico climático, regiones climáticas, zonificación

SUMMARY

A climate classification establishes zones where different climate elements are similar. This allows for the characterization of the region or locality, and its knowledge is necessary for environmental impact studies, climate change scenarios, as well as applied agronomic research. This work aims to determine the Thornthwaite climate classification for the provinces of Jujuy and Salta, Argentina. Rasters of mean monthly precipitation and evapotranspiration for the period 1960–2021 were used, along with field capacity obtained from pedotransfer equations. Using the Climate Hydrological Balance method and the three elements described above, the necessary components for the climate classification were obtained. Four of the nine hydrological regions (Subhumid-Humid "C2", Subhumid-Dry "C1", Semi-Arid "D", Arid "E") are located in the provinces of Jujuy and Salta. The Semi-arid "D" hydrological region is present over a larger area in both provinces (38%), while the Sub-humid-Humid "C2" region is present to a lesser extent (3%). For dry climates, seasonal variation in water efficiency results in "Little or no water surplus" (d), and for humid climates, "Little or no water deficiency" (r). The summer concentration of thermal efficiency in both provinces is (a'), indicating that less than 42% of annual evapotranspiration is concentrated during the summer. The thermal regime encompasses six of the nine climate types, with the highest percentage in Megathermal or warm (29%) in the eastern sector of Salta province, while the lowest is Warm Temperate Mesothermal (9%). The Thornthwaite climate classification made it possible to highlight the different climate types in both provinces. This information is necessary to assess the impact evolving climatic conditions in a context of climate change.

Keywords: climatic regions, hydrological climate balance, zoning.

INTRODUCCIÓN

El clima desempeña un papel crucial en el desarrollo de las plantas y los animales, influyendo directamente en su rendimiento y adaptación. Comprender sus características y variaciones no solo permite optimizar los procesos productivos, sino que también es esencial para numerosas disciplinas científicas y profesionales. Esta comprensión facilita la planificación, el manejo sustentable de los recursos y la adecuada organización territorial en función de las condiciones climáticas de cada región. El clima es el resultado de las interacciones entre los cinco componentes del sistema climático (atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera), las cuales mantienen un equilibrio en el intercambio de energía, masa y movimiento, generando dinámicas que afectan las condiciones climáticas (Murphy & Hurtado, 2011; Hernández Cerda, Ordoñez Díaz & Giménez de Azcárate, 2018). El comportamiento, distribución y evolución del clima se analizan con diferentes elementos meteorológicos (temperatura, precipitación, viento, presión atmosférica, humedad, evapotranspiración, etcétera) que pueden ser considerados de forma aislada o combinada (Pérez-Briceño, Amador Astúa & Alfaro, 2017). Estas combinaciones conducen a parámetros e índices más o menos complejos, cuyos valores son utilizados para establecer tipos climáticos. Los tipos climáticos son el resultado de una clasificación climática, cuyo objetivo es establecer zonas en las que los diferentes elementos del clima varían dentro de ciertos márgenes, lo que implica que estos elementos presentan características similares (Méndez, Vergara, Casagrande & Bongianino, 2021). El método de clasificación debe elaborarse en función del objetivo perseguido, aunque no siempre los parámetros y los datos de los que se dispone son adecuados o suficientes, ni están en consonancia

con los fines de las distintas disciplinas (geografía, botánica, agronomía) (Hernández Cerda *et al.*, 2018).

Existen gran variedad de métodos de clasificación climática entre los que se pueden mencionar al de Köppen (1918), Holdridge (1947), Thornthwaite (1948) y Troll (1958), entre otros, y la mayoría de las clasificaciones consideran la precipitación (cantidad y tiempo de ocurrencia) y las temperaturas, utilizando normalmente valores promedio mensuales de precipitación y temperatura (Méndez *et al.*, 2021). El estándar mundial para clasificar el clima es la clasificación climática de Köppen, la cual se basa en la teoría en la que la distribución espacial de los elementos climáticos tiene un impacto directo en la vida de las plantas nativas (Lohman *et al.*, 1993). Sin embargo, la clasificación climática de Köppen presenta limitaciones desde una perspectiva agrícola, ya que no tiene en cuenta factores como el tipo de suelo y el flujo de agua en el mismo. En 1948, Thornthwaite propuso una clasificación climática que utilizaba la evapotranspiración potencial como parámetro clave para definir los distintos tipos climáticos. Considera la evapotranspiración como el principal proceso de intercambio de energía y humedad entre la superficie terrestre y la atmósfera, y su medición como una variable fundamental para esta clasificación (Bernabé, 2006). La clasificación climática de Thornthwaite requiere calcular un balance hídrico en el suelo utilizando datos climáticos de precipitación, evapotranspiración y la cantidad de agua retenida en el suelo a capacidad de campo (Murphy & Hurtado, 2011; Pérez-Briceño *et al.*, 2017). La clasificación propuesta resultaba difícil de aplicar en su momento debido al elevado número de cálculos requeridos. Además, Thornthwaite se limitó a aplicar su clasificación en Norteamérica y nunca la cartografió a escala mundial (Bernabé, 2006).

La expresión de los elementos climáticos (como la lluvia, la temperatura, la heliofanía, entre otros) se ve modificada por diversos factores que influyen en su comportamiento. Estos factores pueden clasificarse según su naturaleza en: astronómicos (que se encuentran fuera de la atmósfera y el planeta), geográficos (que pertenecen al planeta, pero no a la atmósfera, topográficos entre otros) y meteorológicos (que son propios de la atmósfera). Las características climáticas en Jujuy y Salta, varían considerablemente, provocando en ellas grandes contrastes climáticos. La causa de estos se atribuye, fundamentalmente, a la variada y cambiante topografía (Buitrago, 2004); así, en una transecta que va desde el extremo noreste de Jujuy (El Talar, a 327 msnm) hasta el límite con Chile (a 4325 msnm), a una latitud de 23° 23' S, se observa un gradiente altitudinal de aproximadamente 4000 metros en tan solo 280 km (Hurtado *et al.*, 2014). Si bien la topografía es un factor clave en la determinación de la precipitación en la región occidental de ambas provincias (Murphy & Hurtado, 2011), en los valles, los sistemas frontales —zonas de transición en la atmósfera donde se encuentran dos masas de aire con diferentes características, como temperatura, humedad y densidad— contribuyen al mayor número de días con precipitación. En el este de la provincia de Jujuy, estos sistemas aportan hasta 40% de la precipitación (Hurtado *et al.*, 2014), mientras que en Tucumán llegan a representar hasta 70% (Bianchi, Yáñez & Acuña, 2005).

La variada topografía de Jujuy y Salta no solo influye en las precipitaciones, sino también en las temperaturas. Al ascender el aire a través de una barrera orográfica, la presión atmosférica disminuye, provocando una mayor expansión del aire ya que las moléculas de gas se separan entre sí, chocan con menor frecuencia y genera una disminución de la temperatura. Este proceso, conocido como enfriamiento adiabático (sin intercambio de calor con el ambiente circundante), es responsable de la reducción de la temperatura (Bianchi *et al.*, 2005). La disminución de la temperatura con la altitud se ve favorecida por el albedo y la presencia de vientos fríos en las capas altas de la atmósfera. En la región occidental de ambas provincias la topografía es determinante de las menores temperaturas (Buitrago, 2004).

Las variaciones en los elementos del clima influyen directamente en el comportamiento y la adaptación de las especies vegetales. Para el Noroeste Argentino, Bianchi *et al.*, (2005) describen tres regiones: de los Andes, las Sierras y el Chaco Occidental. En las provincias de Jujuy y Salta, la región de los Andes se extiende hacia el oeste. El sector norte de esta región, conocido como la Puna, se distingue por su clima árido. Es una altiplanicie que presenta algunas variaciones, debido a que está atravesada por cadenas montañosas dispuestas de norte a sur, que dividen amplios valles relativamente planos (Buitrago, 2004). Esta región está conformada por cuencas hidrográficas endorreicas, cuyas aguas no tienen salida al mar y

desembocan en lagunas o salares. La región de las Sierras se encuentra al este de la región de los Andes y está formada por una serie de valles, bolsones y sierras que configuran un territorio heterogéneo. Este paisaje cambiante da lugar a una configuración ambiental compleja, especialmente en lo relacionado con la distribución de los parámetros climáticos y edáficos, y factores claves para la actividad productiva (Buitrago, 2004). A continuación de la región de las Sierras, hacia el este se encuentra la Región del Chaco Occidental, caracterizada por ser una llanura semiárida con un relieve libre de alteraciones por sistemas montañosos. Hacia el oeste de esta región, las precipitaciones disminuyen gradualmente, dando lugar a una transición desde el paisaje de las selvas en galería hacia una fitogeografía de parque chaqueño, donde las masas arbóreas, inicialmente densas, se vuelven progresivamente más xerofíticas a medida que se avanza hacia el este (Bianchi *et al.*, 2005).

El objetivo de este trabajo es determinar la clasificación climática de Thornthwaite para las provincias de Jujuy y Salta, Argentina de manera tal que la información generada contribuya al conocimiento detallado del clima en las mismas. Este análisis, basado en la aplicación de la clasificación climática de Thornthwaite, proporciona una base sólida para futuros estudios que consideren las implicancias de las variaciones climáticas en estas provincias, particularmente en términos de disponibilidad de recursos hídricos, agricultura y adaptación a condiciones ambientales cambiantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las provincias de Jujuy y Salta se ubican en el Noroeste de la República Argentina entre las latitudes 21°48' y 26°23' S. Jujuy limita al Norte con Bolivia, al Oeste con Chile, al Sur y Este con la provincia de Salta; mientras que Salta limita al Norte con Jujuy y Bolivia, al Este con Formosa y Chaco, al Sur con Santiago del Estero, Tucumán y Catamarca y al Oeste con Chile. Dieciséis son los departamentos que conforman la provincia de Jujuy (1. El Carmen, 2. Yavi, 3. Santa Catalina, 4. San Pedro, 5. Valle Grande, 6. Susques, 7. Tilcara, 8. Palpalá, 9. Santa Bárbara, 10. Dr. Manuel Belgrano, 11. San Antonio, 12. Rinconada, 13. Ledesma, 14. Humahuaca, 15. Cochinoca y 16. Tumbaya), y 23 son los departamentos de Salta (17. Anta, 18. Cachi, 19. Cafayate, 20. Capital, 21. Cerrillos, 22. Chicoana, 23. General Güemes, 24. General José de San Martín, 25. Guachipas, 26. Iruya, 27. La Caldera, 28. La Candelaria, 29. La Poma, 30. La Viña, 31. Los Andes, 32. Metán, 33. Molinos, 34. Orán, 35. Rivadavia, 36. Rosario de la Frontera, 37. Rosario de Lerma, 38. San Carlos y 39. Santa Victoria) (Figura 1). La provincia de Jujuy tiene una superficie de 53.244 km² y una población de 811.611 habitantes, y la provincia de Salta abarca 155.488 km² y registra una población de 1.441.351 habitantes (Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas, Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina, INDEC, 2022).

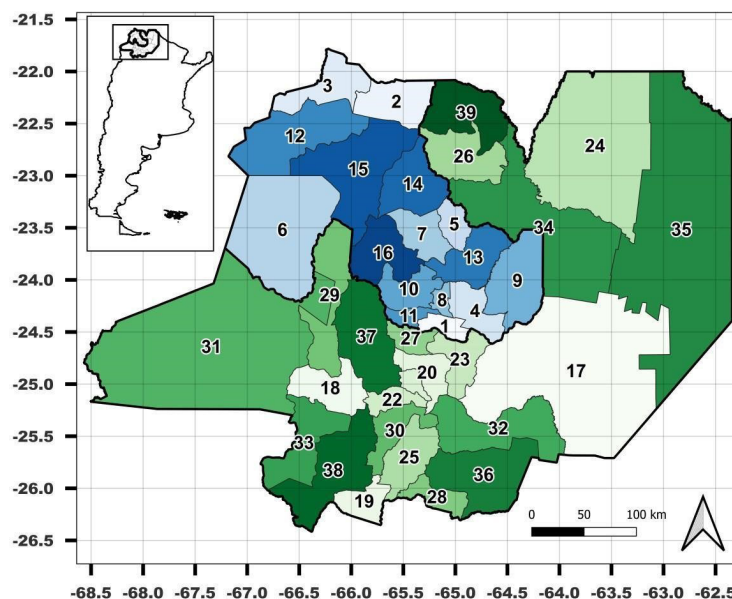


Figura 1: Departamentos de las provincias de Jujuy (1-16 escala azul) y Salta (17-39 escala verde).

Clasificación climática de Thornthwaite

Para elaborar la clasificación climática en ambas provincias se utilizó el método del Balance Hidrológico Climático de Thornthwaite (BHC) descrito en Spescha y Hurtado (2011). El BHC considera la precipitación y evapotranspiración media mensual, y la capacidad de campo. La precipitación se obtuvo del trabajo de Llanos Tarifa *et al.*, (2024) (Figura 2) y la Evapotranspiración potencial (ETP) de Rodríguez *et al.*, (2024) (Figura 4.c), ambas variables climáticas para un periodo de 62 años (1960-2021). La capacidad de campo (Figura 3) se obtuvo de Turek *et al.*, (2023) y corresponde a la obtenida por ecuaciones de pedotransferencia referenciadas a una profundidad de un metro. Se utilizaron archivos ráster(s) para los tres elementos de entrada con una resolución de 1 km².

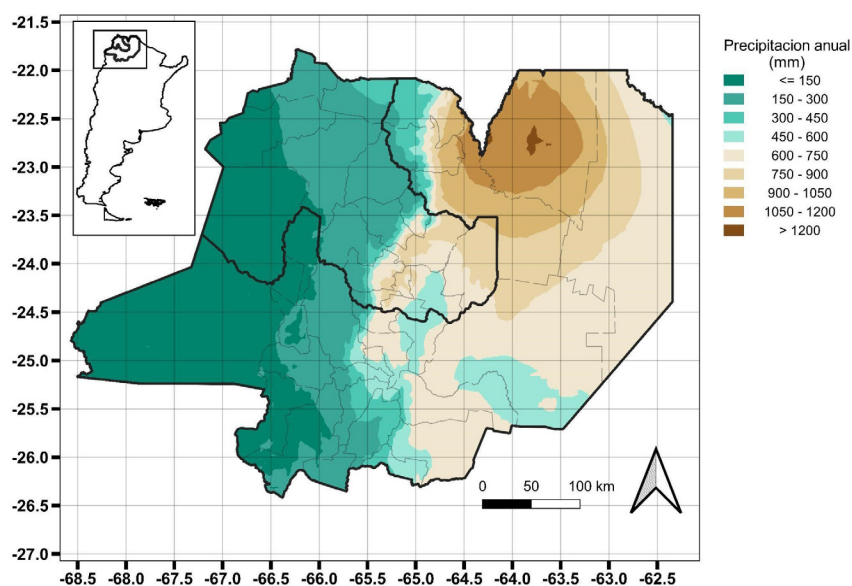


Figura 2: Precipitación anual media (mm) (1960-2021) para las provincias de Jujuy y Salta, Argentina.

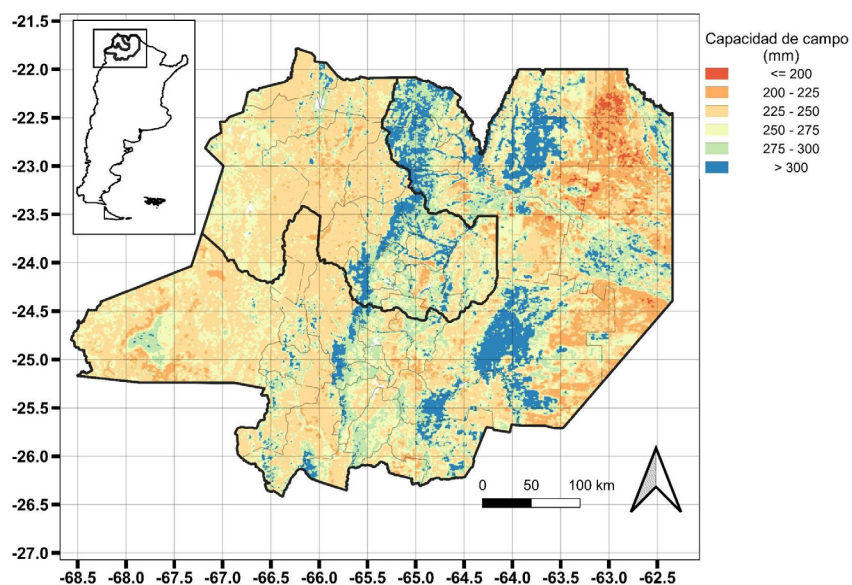


Figura 3: Capacidad de campo (mm) para las provincias de Jujuy y Salta, Argentina.

La clasificación climática de Thornthwaite utiliza un conjunto de índices que se calculan a partir de los resultados del BHC. Para la determinación de los diferentes tipos de climas considera cuatro aspectos: “Regiones hídricas”, “Variación estacional de la eficiencia hídrica”, “Regiones térmicas” y “Concentración estival de la eficiencia térmica” (Spescha & Hurtado, 2011).

Regiones hídricas

Las regiones hídricas se identifican mediante el índice hídrico (IH) que expresa el grado de humedad de un lugar a través de los déficits y excesos anuales en relación a la evapotranspiración anual (Ecuación 1 “Ec.”). Según la magnitud del IH, se determinan los tipos de clima (Cuadro 1).

$$IH = \frac{100 \text{ Excesos anuales} - 60 \text{ Deficiencias anuales}}{\text{Evapotranspiración potencial anual}} \quad (\text{Ec.1})$$

Cuadro 1: Índice hídrico.

Símbolo	Tipo de clima	Índice hídrico
A	Perhúmedo	>100
B4	Húmedo	100 a 80
B3	Húmedo	80 a 60
B2	Húmedo	60 a 40
B1	Húmedo	40 a 20
C2	Subhúmedo - Húmedo	20 a 0
C1	Subhúmedo - Seco	0 a -20
D	Semiárido	-20 a - 40
E	Árido	-40 a - 60

Variación estacional de la eficiencia hídrica

La variación estacional de la eficiencia hídrica de humedad se determina con el índice de Aridez (Ecuación 2) si el IH es húmedo (A, B o C2) para caracterizar la magnitud y distribución de los períodos secos. Para los IH secos (C1, D o E) se utiliza el índice de Humedad (Ecuación 3) que describe la magnitud y distribución de los períodos húmedos (Cuadro 2).

$$\text{Índice de aridez} = \frac{\text{Deficiencias anuales} \times 100}{\text{Necesidad de agua (ETP anual)}} \quad (\text{Ec.2})$$

$$\text{Índice de humedad} = \frac{\text{Excesos anuales} \times 100}{\text{Necesidad de agua (ETP anual)}} \quad (\text{Ec.3})$$

Cuadro 2: Variación estacional de la eficiencia hídrica.

Símbolo	Climas húmedos (A, B y C2)	Índice de aridez
r	Poca o ninguna deficiencia de agua	0 a 16,7
s	Moderada deficiencia de agua en verano	16,7 a 33,3
w	Moderada deficiencia de agua en invierno	16,7 a 33,3
s2	Deficiencia grande de agua en verano	más de 33,3
w2	Deficiencia grande de agua en invierno	más de 33,3
Símbolo	Climas secos (C1, D y E)	Índice de humedad
d	Poco o ningún excedente de agua	0 a 10
s	Moderado excedente de agua en invierno	10 a 20
w	Excedente moderado de agua en verano	10 a 20
s2	Excedente grande de agua en invierno	más de 20
w2	Excedente grande de agua en verano	más de 20

Régimen térmico

El régimen térmico se expresa mediante el índice de eficiencia térmica representado por la ETP anual (mm) y es un indicador de la disponibilidad calórica del clima. Las distintas categorías de los Tipos Climáticos se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Índice de eficiencia térmica.

ETP anual	Símbolo	Tipo climático
>1140	A'	Megatermal o cálido
1140 a 997	B'4	Mesotérmico semicálido
997 a 855	B'3	Mesotérmico templado cálido
855 a 712	B'2	Mesotérmico templado frío
712 a 570	B'1	Mesotérmico semifrío
570 a 427	C'2	Microtérmico frío moderado
427 a 285	C'1	Microtérmico frío acentuado
285 a 142	D'	Tundra
<142	E'	Helado o Glacial

Concentración estival de la eficiencia térmica

La concentración estival de la eficiencia térmica (Cet) indica cómo es el régimen térmico durante el verano con respecto al resto del año (Ecuación 4). Se calcula como la relación porcentual entre la ETP acumulada de los meses de verano (diciembre, enero y febrero) y ETP anual. El Cuadro 4 muestra una tipificación de los índices Cet.

$$Cet = \frac{ETP \text{ meses de verano}}{ETP \text{ anual}} \times 100 \quad (\text{Ec.4})$$

Cuadro 4: Índice de concentración estival de la eficiencia térmica.

Porcentaje de concentración estival	Tipo
<48,0	a'
48,0 a 51,9	b'4
51,9 a 56,3	b'3
56,3 a 61,6	b'2
61,6 a 68	b'1
68 a 76,3	c'2
76,3 a 88	c'1
> 88	d

Los tipos de clima están definidos por una fórmula climática de cuatro dígitos que en su conjunto expresan las características del lugar. Por ejemplo, para la fórmula climática D-d-A'-a'. Las letras mayúsculas se refieren al "índice hídrico" y a la "Eficiencia térmica", respectivamente. Las letras minúsculas, corresponden a la "Variación estacional de la eficiencia hídrica" y a la "Concentración estival de la eficiencia térmica", respectivamente. El primer y segundo dígito se refieren al régimen de humedad (IH e "índices de aridez o humedad) y los dos restantes al régimen térmico (eficiencia térmica y concentración estival de la eficiencia térmica) (Specha & Hurtado, 2011; Pérez-Briceño *et al.*, 2017; Méndez *et al.*, 2021).

Obtención del BHC

Las salidas del BHC necesarias para la clasificación climática se generaron utilizando el lenguaje de programación Visual Basic for Applications (VBA). Previamente, se obtuvieron las coordenadas geográficas correspondientes a los tres raster(s) requeridos: precipitación media, evapotranspiración media y capacidad de campo. Para cada ubicación geográfica, se aplicó el método del BHC, y los resultados fueron almacenados en archivos de Excel, que posteriormente se transformaron a matrices. La clasificación climática y su visualización se llevaron a cabo mediante los softwares QGIS v3.3 (QGIS Development Team, 2023) y R v4.2.2 (R Core Team, 2023)

RESULTADOS

En ambas provincias se observan 4 de las 9 regiones hídricas clasificadas por Thornthwaite (Subhúmedo-Húmedo "C2", Subhúmedo-Seco "C1", Semiárido "D" y Árido "E") (Figura 4.a). La región hídrica D está presente en mayor extensión territorial (38%), seguida de E (35%), mientras que C2 en menor proporción (3%). Si bien la región hídrica C2 se encuentra en ambas provincias, en Salta se observa la mayor superficie (5.940 km²) (Figura 4.a). Para los climas secos la variación estacional de la eficiencia hídrica resulta en "Poco o ningún excedente de agua" (d) con índices de humedad entre 0 a 9,91, y para el clima húmedo "Poco o ninguna deficiencia de agua" (r) con índices de aridez entre 4,2 a 11,17 en ambas provincias (Figura 4.b). La concentración estival de la eficiencia térmica en Jujuy y Salta es "a'", lo que indica que del total de la evapotranspiración anual menos del 48%, se concentra durante el verano. El régimen térmico abarca 6 de 9 tipos climáticos, con mayor porcentaje en el Megatermal o cálido A' (29%) para el sector este de la provincia de Salta, mientras que los menores: con un 9% son Mesotérmico templado cálido B'3 y Mesotérmico templado frío B'2 (Figura 4.c).

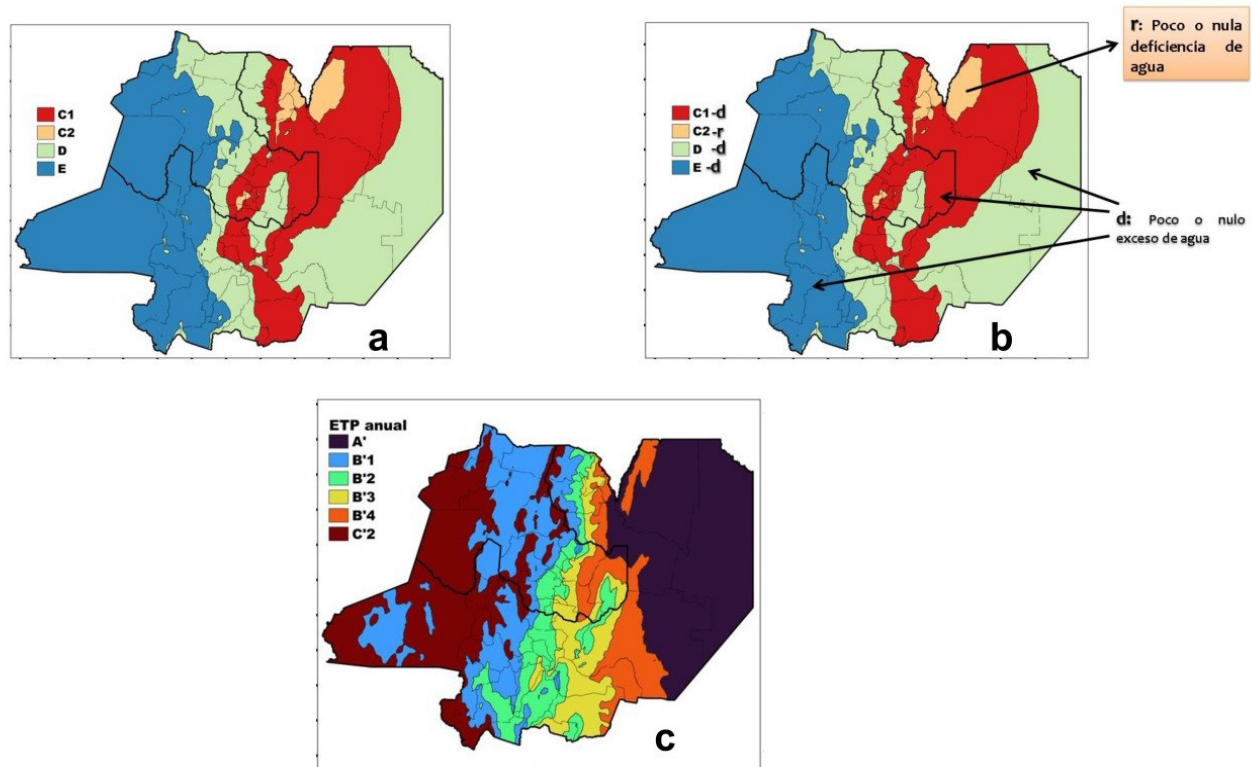


Figura 4: Distribución espacial de los índices utilizados para la Clasificación climática de Thornthwaite. a) Índice Hídrico, b) Variación estacional de la eficiencia hídrica y c) Régimen térmico (Evapotranspiración anual media “ETP”).

Ambas provincias presentan diversidad climática 32 tipos climáticos según la clasificación climática de Thornthwaite. En Salta se observan 18 tipos climáticos, mientras que en Jujuy 14 (Figura 5). El tipo climático D-d-A'-a' (Semiárido-Poco o ningún excedente de agua-Megatermal- <48% de la concentración estival de la eficiencia térmica) se ubica al este de la provincia de Salta y presenta la mayor extensión (35.474 km²), mientras que C2-r-B'2-a' (Subhúmedo - Húmedo-Poca o ninguna deficiencia de agua-Mesotérmico templado frío- <48% de la concentración estival de la eficiencia térmica) en menor extensión (14 km²) y solamente en el departamento Orán (Figuras 2 y 5; Cuadro 5). En Jujuy, E-d-C'2-a' (Árido-Poco o ningún excedente de agua-Microtérmico frío moderado- <48% de la concentración estival de la eficiencia térmica) presenta la mayor extensión territorial (17.220 km²) ubicado al oeste de la provincia, y C2-r-B'3-a' (Subhúmedo - Húmedo-Poca o ninguna deficiencia de agua-Mesotérmico templado cálido- <48% de la concentración estival de la eficiencia térmica) la menor (0,07 km²) ubicado en el extremo norte del departamento Ledesma (Figura 5; Cuadro 5).

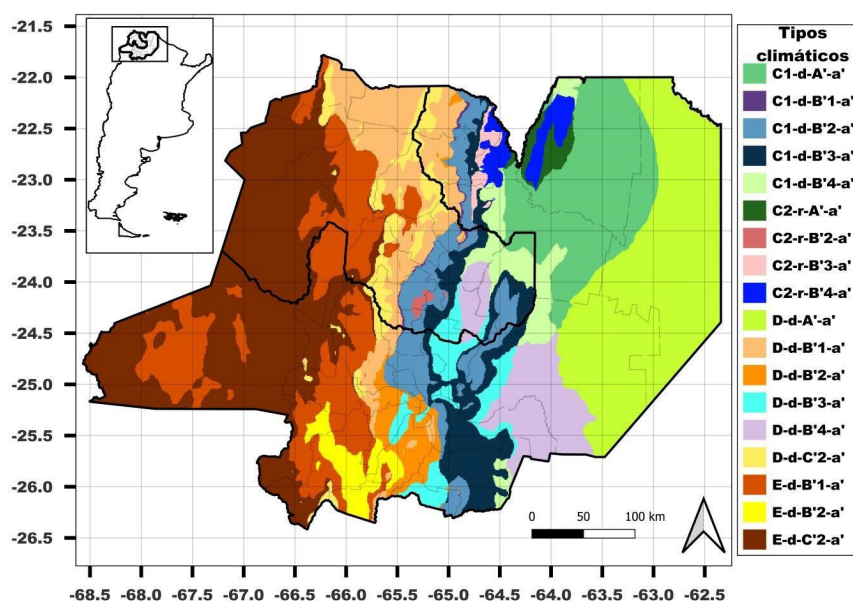


Figura 5: Clasificación climática de Thornthwaite para las provincias de Jujuy y Salta.

Cuadro 5: Superficies (km²) de los Tipos climáticos según Thornthwaite por provincia.

Tipos climáticos	Salta	Jujuy
C1-d-A'-a'	21.659	522
C1-d-B'1-a'	250	202
C1-d-B'2-a'	6.866	4.055
C1-d-B'3-a'	8.424	2.936
C1-d-B'4-a'	4.280	2.107
C2-r-B'2-a'	14	359
C2-r-B'3-a'	983	0,07
D-d-B'1-a'	4.895	10.219
D-d-B'2-a'	4.403	24
D-d-B'3-a'	4.927	927
D-d-B'4-a'	8.982	2.012
D-d-C'2-a'	2.153	4.512
E-d-B'1-a'	16.880	8.102
E-d-C'2-a'	26.022	17.220
E-d-B'2-a'	3.963	-
C2-r-A'-a'	1.752	-
C2-r-B'4-a'	3.191	-
D-d-A'-a'	35.474	-

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La extensión territorial de ambas provincias (208.732 km²) sumada a sus estratégicas conexiones con

otras provincias argentinas y regiones de Sudamérica, favorecen la existencia de una notable diversidad climática. En Salta se identificaron 18 tipos climáticos y en Jujuy 14, lo que evidencia un alto grado de heterogeneidad en comparación con otras regiones del país. A modo de ejemplo se cita que en las provincias del Litoral Argentino, se registran comúnmente entre 4 y 5 tipos climáticos bajo el mismo sistema de clasificación (Vich, Antelo & Hurtado, 2010). La diversidad hallada en estas provincias encuentra correlatos en estudios internacionales y nacionales. Bernabé (2006) identifica 162 tipos climáticos de Thornthwaite en la Península Ibérica y Baleares, y 22 en las Islas Canarias, reflejando también una gran variabilidad condicionada por la geografía y las particularidades locales. A nivel nacional, Méndez *et al.*, (2021) encontraron diferentes tipos climáticos en tres localidades de la provincia de La Pampa, lo cual reafirma la importancia del análisis a escala local y regional para comprender la dinámica climática. Una de las principales contribuciones del presente estudio es el énfasis en la interacción entre el clima y las propiedades del suelo. La inclusión de la capacidad de campo (Figura 3), determinada mediante ecuaciones de pedotransferencia (Turek *et al.*, 2023). Thornthwaite utiliza esta variable en la clasificación y demuestra que la misma no es solo un producto de variables atmosféricas, sino el resultado de interacciones complejas entre los componentes del sistema atmosfera-litósfera.

Los diferentes climas encontrados podrían ser explicados por la variabilidad espacial de los elementos climáticos. En la región occidental de ambas provincias, predominan las regiones hidrológicas «Árida-E» y «Semiárida-D» (Figura 4.a), lo que podría estar relacionado con la cantidad de precipitación, ya que en esa zona esta variable se ve influenciada por la altitud del sitio (Figura 2) (Buitrago, 2004; Murphy & Hurtado, 2011). En el norte de la provincia de Salta, se identifica exclusivamente la región hidrológica C2, lo que también podría atribuirse a los niveles promedio de precipitación registrados en esa zona (Figura 2). La distribución de las regiones hídricas presentada en este trabajo coincide con la observada por Fabrezi *et al.*, (2022), quienes utilizaron el índice de aridez para su categorización, similar al empleado en este estudio. Estos autores muestran que, en general, las regiones hídricas E y D se ubican en las zonas occidental y oriental de ambas provincias, mientras que las regiones subhúmedas predominan en el norte. En cuanto a la distribución de las regiones térmicas, ésta podría explicarse por el patrón de temperatura en ambas provincias, dado que la evapotranspiración de Thornthwaite, depende en parte de la temperatura (Murphy & Hurtado, 2011; Pérez-Briceño *et al.*, 2017). La presencia de la región Megatérmica o Cálida en el norte de la región oriental de Salta podría explicarse por las altas temperaturas promedio. Al estar a menor altitud, la presión atmosférica es mayor, lo que provoca la compresión del aire. Como resultado, las moléculas atmosféricas se agrupan con mayor fuerza y colisionan con mayor frecuencia, generando un aumento de la temperatura (Bianchi *et al.*, 2005).

La distribución de los tipos climáticos en ambas provincias configura el comportamiento y la adaptación de las especies vegetales. En la región de los Andes ubicada al oeste de las provincias de Jujuy y Salta (Bianchi *et al.*, 2005), los ecosistemas montañosos se caracterizan por pronunciados gradientes ambientales. Los cambios de altitud generan variaciones climáticas significativas en distancias cortas, exponiendo a las especies montañosas a condiciones ambientales contrastantes (Marcora *et al.*, 2021). En las regiones hídricas Áridas (E) y Semiaridas (D), los caracteres estructurales de la vegetación natural serían rasgos adaptativos frente a los factores ecológicos del ecosistema (Rojo, 2016). El crecimiento de la vegetación en la Puna al estar condicionado principalmente por la disponibilidad de agua y las bajas temperaturas, presenta adaptaciones como raíces profundas, almacenamiento hídrico, reducción foliar, pérdida de hojas, fotosíntesis cortical, menor altura y mayor densidad del follaje (Rojo, 2016; Marcora *et al.*, 2021).

La clasificación climática de Thornthwaite, basada en el índice hídrico, podría utilizarse para caracterizar la distribución de la vegetación, ya que establece zonas en las que los diferentes elementos del clima varían dentro de ciertos márgenes (Méndez *et al.*, 2021). Si bien este no es el objetivo de este estudio, se destaca el potencial de contar con una clasificación climática a nivel provincial. Por ejemplo, si se necesita conocer el clima en el cual se desarrolla una especie nativa (o un cultivo agrícola) sería necesario conocer la distribución potencial de las especies (por ejemplo: *Polylepis australis*), sitios donde potencialmente se encuentran, o bien la distribución observada de las especies (por ejemplo:

Saccharum officinarum), y superponer estas distribuciones con la clasificación climática de Thornthwaite para conocer los tipos climáticos donde se desarrollan. Comprender la distribución potencial y observada de las especies y relacionarlas con la clasificación climática de Thornthwaite nos permite entender mejor su ecología, identificando los tipos de climas que favorecen su desarrollo. Esta información es esencial para predecir posibles cambios en su distribución ante la variabilidad o el cambio climático. Asimismo, permite optimizar el uso agrícola o forestal al ubicar las especies en zonas con condiciones climáticas compatibles con sus necesidades.

BIBLIOGRAFÍA

- Bernabé, A. C. (2006). Clasificación climática de Thornthwaite para España obtenida mediante técnicas SIG. En: Echarte, J., Balcina Angulo, Y., Cardoza Gonzáles, F., Ormazabal Jordana, J., Rodríguez Camino, E. & Carvalho, R. (Ed). Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española, (29). Pamplona, España. Editorial no venal. 4 pp. Recuperado de: <https://pub.ame-web.org/index.php/JRD/article/view/2229>
- Bianchi, A. Yañes, C. E. & Acuña, L. R. (2005). Base de datos mensuales de precipitaciones del Noroeste Argentino. Recuperado de: <https://bibliotecavirtualaserena.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/05/precipitaciones-del-noa-bianchi.pdf>
- Buitrago, G. (2004). El clima de la Provincia de Jujuy. Recuperado de: <https://dipec.jujuy.gob.ar/aspectos-generales/datos-climaticos/>
- Fabrezi, M., Camardelli, C., Hongn, F., Aramayo, A., Cruz, J. C., Montero López, C., Córdoba, G. & Guevara, A. (2022). Provincias geológicas, provincias fitogeográficas y ecorregiones del NOA. Geología, fitogeografía y ecorregiones, Vol 12(2), 4-19.
- Hernández Cerda, M. E., Ordoñez Díaz, M. J. & Giménez de Azcárate, J. (2018). Análisis comparativo de dos sistemas de clasificación bioclimática aplicados en México. Investigaciones Geográficas. Vol (95), 14 pp. Recuperado de: <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n95/2448-7279-igeo-95-00004.pdf>
- Hurtado, R., Portal, M. R., Valdiviezo Corte, M., Riquelme Guzmán, A., Moreno, C., Alabar, F. & Mayo, H. (2014). Caracterización Agroclimática de los Valles Templados de Jujuy. Informe. 34 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina (INDEC). 2022. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. Estadística-Población. Recuperado de: <https://www.indec.gob.ar/>
- Llanos Tarifa M., Rodríguez F. A., Lamas M. J., Alabar F. D., Valdiviezo Corte M. & Hurtado R. (2024). Comparación de la precipitación para las provincias de Jujuy y Salta, Argentina. Gallardo, C & Giulianotti, C (Eds). Libro de Resúmenes de XIV Jornadas Científico- Técnicas de la Facultad de Ciencias Agrarias – UNJu. San Salvador de Jujuy, Jujuy, Argentina. pp 64. Recuperado de: <https://www.fca.unju.edu.ar/static/files/investigacion/XIV%20Jornadas%20Cientifico%20Tecnicas%20Facultad%20de%20Ciencias%20Agrarias%20-%20Universidad%20Nacional%20de%20Jujuy.pdf>
- Lohmann, U., Sausen, R., Bengtsson, L., Cubasch, U., Perwitz, J. & Roeckner, E. (1993). The Koppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. Climate Research, 3, (3), 17 pp. Recuperado de: <https://www.int-res.com /articles/cr/3/c003p177.pdf>
- Marcora, P. I., Tecco, P. A., Ferrero, M. C., Ferreras, A. E., Zeballos, S. R., Funes, G., Gurvich, D. E., Arias, G., Cáseres, Y. & Hensen, I. (2021). Are populations of *Polylepis australis* locally adapted along their elevation gradient?. Neotropical Biodiversity, 7(1), 246-256.

- Méndez, M., Vergara, G., Casagrande, G. & Bongianino, S. (2021). Clasificación climática de la región agrícola de la provincia de la Pampa, Argentina. SEMIÁRIDA Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam Vol 31(2), 12 pp. Recuperado de: [http://dx.doi.org/10.19137/semiarida.2021\(02\).09-20](http://dx.doi.org/10.19137/semiarida.2021(02).09-20)
- Murphy, G. & Hurtado, R. (2011). Agrometeorología. Buenos Aires, Argentina. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Pérez-Briceño, P. M, Amador Astúa, J. A. & Alfaro, E. (2017). Dos propuestas de clasificación climática para la vertiente Caribe costarricense según el sistema de Thornthwaite. Revista de Climatología. Vol (17), 16 pp. Recuperado de: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/0ae53ea8-c47b-4a9e-9d2d-60bc8cecd0fe>
- QGIS Development Team. (2023). QGIS Geographic Information System (versión 3.3) [Software]. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org/>
- R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing (versión 4.2.2) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Rodríguez, F. A., Llanos Tarifa, M., Lamas, M. J., Alabar, F. D., Valdiviezo Corte, M. & Hurtado, R. (2024). Evaluación de la evapotranspiración en la provincia de Jujuy y Salta a través de un mapa detallado. Gallardo, C & Giulianotti, C (Eds). Libro de Resúmenes de XIV Jornadas Científico- Técnicas de la Facultad de Ciencias Agrarias – UNJu. San Salvador de Jujuy, Jujuy, Argentina. pp 64. Recuperado de: <https://www.fca.unju.edu.ar/static/files/investigacion/XIV%20Jornadas%20Cientifico%20Tecnicas%20Facultad%20de%20Ciencias%20Agrarias%20-%20Universidad%20Nacional%20de%20Jujuy.pdf>
- Rojo, V. (2016). Análisis de la dinámica de la vegetación de la Puna jujeña en relación con los ungulados domésticos y silvestres y su impacto sobre la desertificación. (Tesis doctoral). Universidad Nacional de La Plata. Argentina.
- Specha, L & Hurtado, R. (2011). El Ciclo del agua-El balance de agua del suelo. Murphy, G & Hurtado, R (Eds.). Agrometeorología, Tomo 1 (1er edición). pp 105-130. Buenos Aires, Argentina. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Turek, M. E., Poggio, L., Batjes, N. H., Armindo, R. A., van Lier, Q. D. J., de Sousa, L., & Heuvelink, G. B. (2023). Global mapping of volumetric water retention at 100, 330 and 15 000 cm suction using the WoSIS database. International Soil and Water Conservation Research, Vol 11(2), 225-239. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.08.001>
- Vich, H., Antelo, M, Hurtado, R. (2010). XIII Reunión Argentina y VI Latinoamericana de Agrometeorología. Clasificación climática de Thornthwaite para la Región Oriental de la República Argentina. Recuperado de: http://www.siaj.fca.unju.edu.ar/media/publicaciones/2010-AADA-CLASIFICACION_TH.pdf