



# Caracterización Bioclimática de la Provincia de Buenos Aires (Argentina) para el cultivo de vid (*Vitis vinifera* L.)

Gabriela Hernández<sup>1(\*)</sup> y Damian Rodríguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Núcleo de Estudio en Actividades Agropecuarias y Cambio Climático NAACCE, Facultad de Agronomía - UNCPBA. República de Italia 780, B7300 Azul, BA. E-mails: gabrielahernandez@azul.faa.unicen.edu.ar y lrodriguez@azul.faa.unicen.edu.ar

(\*)Autor correspondiente.

## INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

### Historial del artículo:

Recibido el 20 de octubre de 2025

Aceptado el 2 de junio de 2026

### Palabras clave

índices bioclimáticos  
zonas vitícolas  
análisis multivariado  
clasificación climática  
aptitud agroclimática

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue caracterizar bioclimáticamente la provincia de Buenos Aires, Argentina, para evaluar su aptitud para el cultivo de vid (*Vitis vinifera* L.). Se utilizaron datos diarios de temperatura, precipitación, evapotranspiración y horas de luz del período 1981–2023, provenientes de 22 estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se calcularon cinco índices bioclimáticos clave: índice heliotérmico, índice de frío nocturno, índice de sequía, producto heliotérmico y duración del período activo. Además, se aplicó el sistema de clasificación climática geovitícola (CCM) y un análisis de componentes principales para evaluar la zonificación vitícola. Los resultados muestran una amplia variabilidad espacial de condiciones climáticas en la provincia y tendencias significativas que podrían asociarse al cambio climático. Se identificaron zonas con potencial creciente para variedades de vid tardías, especialmente en el norte y centro de la provincia. El análisis multivariado permitió delimitar diez regiones vitícolas con características bioclimáticas diferenciadas. Estos hallazgos aportan información útil para la planificación vitivinícola y la adaptación al cambio climático.

© 2026 SBAgro. All rights reserved.

## Introducción

La vitivinicultura es una actividad agrícola de alcance global que se desarrolla en una amplia diversidad de climas y suelos. No obstante, la producción de vinos de calidad suele concentrarse en regiones con condiciones edafoclimáticas específicas, que favorecen un adecuado equilibrio entre azúcares y acidez, generalmente asociado con niveles intermedios de acidez titulable y valores de pH dentro del rango enológico óptimo (Ferreira et al., 2004). Para obtener uvas de calidad es necesario un ciclo estacional definido, con inviernos fríos, primaveras templadas y veranos cálidos y secos, condiciones que

aseguran una maduración equilibrada de la fruta (Santos et al., 2011).

Diversos autores han destacado el rol del clima en la producción vitivinícola. Huglin (1978) subrayó su influencia directa sobre el crecimiento de la vid y la calidad del vino, mientras que Gladstones (1992) incorporó este factor en la definición del terroir. La temperatura, la precipitación y la radiación solar son determinantes en el desarrollo del viñedo, ya que valores extremos de temperatura pueden alterar la composición de la uva, afectar la maduración y reducir los rendimientos (Coombe, 1987; Fregoni y Pezzutto, 2000; Lebon, 2002; Tonietto y Carbonneau, 2004; Duchêne y Schneider, 2005). Asimismo, la precipitación

excesiva puede deteriorar las características enológicas (Ojeda et al., 2002; Barbero et al., 2008) y la radiación solar resulta esencial para la fotosíntesis y la acumulación de azúcares y ácidos (Jones y Davis, 2000). En especies perennes como la vid, las condiciones de un año dado repercuten en los ciclos posteriores al incidir sobre la acumulación de reservas y la inducción de yemas (Champagnol, 1984; Etchebarne, 2008).

El ciclo vegetativo de la vid puede extenderse hasta unos 230 días y depende, en primer lugar, de una adecuada acumulación de horas de frío (HF) durante el invierno, necesaria para asegurar la brotación y la fructificación. Estas exigencias varían según la variedad, con un rango estimado entre 400 y 1200 HF (Westwood, 1982; Sozzi et al., 2007). Posteriormente, el crecimiento y el desarrollo se inician cuando las temperaturas superan la temperatura base de 10 °C (Moriondo y Bindi, 2007), alcanzando un rango óptimo entre 25 y 30 °C. A valores superiores, los procesos se restringen y cesan alrededor de 38 °C (Prescott, 1964; Reynier, 2005). La comprensión de estos umbrales térmicos resulta fundamental para anticipar cómo variaciones en el clima pueden alterar la fenología del cultivo y, en consecuencia, la calidad de la producción. La agroclimatología, disciplina orientada a evaluar la aptitud climática de las regiones para distintos cultivos, ofrece marcos de análisis adecuados para la viticultura (Pascale y Damario, 2004). La adaptación varietal está fuertemente condicionada por el clima (Schultz, 2000) y, en consecuencia, los cambios observados en las últimas décadas han modificado la geografía del viñedo en diversas regiones (Schultz y Jones, 2010). Ejemplos recientes muestran desplazamientos potenciales de áreas productoras en Australia hacia zonas más frescas debido al aumento de la temperatura y a la disminución de la disponibilidad hídrica (Puga et al., 2022). En Europa, Ramos y Martínez de Toda (2022) evidenciaron que en La Rioja la variedad Macabeo pierde acidez en años más cálidos y secos, mientras que Nistor et al. (2018) reportaron efectos similares en Sauvignon Blanc y Pinot Gris en Rumania. Estos antecedentes refuerzan la necesidad de adaptar las prácticas de manejo frente al cambio climático.

En Argentina, la Pampa Húmeda, que abarca, entre otras, la provincia de Buenos Aires, se caracteriza por un clima templado húmedo, con precipitaciones anuales que oscilan entre 800 y 1200 mm, moduladas por sistemas de baja presión y por la temperatura superficial del mar (Rusticucci y Barrucand, 2004). En la provincia de Buenos Aires, la viticultura se distribuye de manera heterogénea, con mayor concentración en el sudeste, donde la influencia marítima parece ofrecer condiciones favorables, y con focos dispersos en el centro y norte provincial (INV, 2023). Entre 2010 y 2023, la superficie cultivada se expandió de 54 a 167 hectáreas, lo que representa un incremento del

211 %, situando a la provincia en el décimo lugar a nivel nacional (INV, 2023).

Para evaluar la aptitud vitícola de una región se utilizan índices climáticos y bioclimáticos que integran variables meteorológicas con la capacidad de la vid para completar su ciclo fenológico y producir uvas de calidad (Carbonneau, 1994; Tonietto, 2001). Entre los índices más empleados se encuentran el de frío nocturno (IF), el de sequía (IS), el heliotérmico (IH), el producto heliotérmico (PH) y la duración del período activo. Tres de ellos, IS, IH e IF, se integran en el Sistema de Clasificación Climática Multicriterio Geovitícola (CCM), que permite zonificar regiones vitícolas con un enfoque holístico, particularmente valioso en el contexto actual de cambio climático (Tonietto y Carbonneau, 2004). Su aplicación en distintas regiones, como México y Cuba (Valenzuela-Solano y Tonietto, 2012; Aranguren González, 2015), ha demostrado ser una herramienta eficaz para planificar el desarrollo vitivinícola.

En las últimas décadas, diversos estudios documentaron cambios significativos en los índices bioclimáticos como consecuencia del calentamiento global (Comte et al., 2022, 2023; Banjanin et al., 2024). El incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico puede estimular la fotosíntesis y aumentar la biomasa, aunque también se asocia con mayores concentraciones de azúcar en la uva y, por ende, de alcohol en los vinos (Seguin, 2007, 2010). Al mismo tiempo, se proyecta una mejora en la eficiencia en el uso del agua, condicionada, no obstante, por el aumento térmico y la mayor frecuencia de eventos extremos (Schultz, 2000). Informes recientes del IPCC (2022) advierten sobre la intensificación de las olas de calor, las precipitaciones extremas y las sequías, con impactos ya observados en el sudeste de Sudamérica (Rusticucci, 2012; Cavalcanti et al., 2015; Carril et al., 2016; Lovino et al., 2018). Estas tendencias resaltan la necesidad de incorporar la variabilidad y el cambio climático en la planificación vitivinícola, considerando su efecto sobre la idoneidad de las regiones productoras.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar bioclimáticamente la provincia de Buenos Aires mediante el análisis de los principales índices empleados en viticultura y examinar su evolución en los últimos 40 años con el fin de evaluar en qué medida el cambio climático podría estar afectando el potencial vitícola de la región.

## Metodología

### Datos climáticos y estaciones meteorológicas

El análisis se basó en series diarias del SMN de Argentina, correspondientes al período 1981–2023. Se consideraron las variables: temperatura media, máxima y

mínima del aire, precipitación pluvial, evapotranspiración potencial y horas de luz. La base de datos incluyó 22 estaciones meteorológicas de superficie distribuidas en la provincia de Buenos Aires, cuya localización (nombre, latitud, longitud y altitud) se resume en la Tabla 1 y se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. Ubicación de las localidades analizadas.

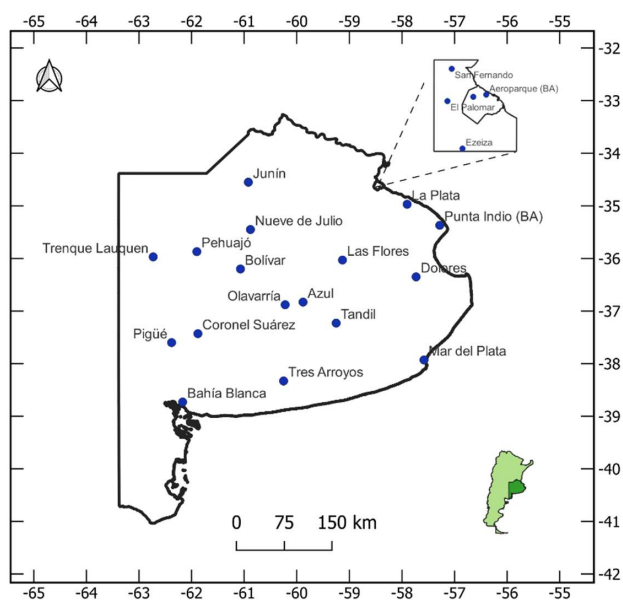


Tabla 1. Latitud, longitud y altitud de las localidades analizadas.

Localidad	Longitud	Latitud	Altitud
Aeroparque (Arp)	-58.42	-34.57	6
Azul (Az)	-59.88	-36.83	147
Bahía Blanca (Ba Bl)	-62.17	-38.73	83
Bolívar (Bo)	-61.07	-36.2	94
Buenos Aires (Bs As)	-58.48	-34.58	25
Coronel Suárez (CS)	-61.88	-37.43	233
Dolores (Dol)	-57.73	-36.35	9
El Palomar (EP)	-58.6	-34.6	12
Ezeiza (Ez)	-58.53	-34.82	20
Junín (J)	-60.92	-34.55	81
La Plata (LP)	-57.9	-34.97	19
Las Flores (LF)	-59.13	-36.03	36
Mar del Plata (MdP)	-57.58	-37.93	21
Nueve de Julio (NdJ)	-60.88	-35.45	76
Olavarría (O)	-60.22	-36.88	166
Pehuajó (Pe)	-61.9	-35.87	87
Pigüé (Pi)	-62.38	-37.6	304
Punta Indio (PI)	-57.28	-35.37	22
San Fernando (SF)	-58.58	-34.45	3
Tandil (T)	-59.25	-37.23	175
Trenque Lauquen (TL)	-62.73	-35.97	95
Tres Arroyos (TA)	-60.25	-38.33	115

### Cálculo de índices bioclimáticos

Con el fin de evaluar la aptitud climática de la provincia de Buenos Aires para el cultivo de *Vitis vinifera L.*, se calcularon cinco índices bioclimáticos de uso extendido en viticultura:

- Índice heliotérmico (IH)
- Índice de frío nocturno (IF)
- Índice de sequía (IS)
- Producto heliotérmico (PH)
- Duración del período activo

Las fórmulas de cálculo y sus referencias se presentan en la Tabla 2. Se siguieron las definiciones originales de Huglin (1978), Tonietto (1999), Branas (1974) y Reynier (2005), con las adaptaciones correspondientes al hemisferio sur.

El IH se estimó para el período octubre-marzo, adoptando un coeficiente  $k = 1$ , correspondiente a la latitud media de Buenos Aires, lo que permitió caracterizar la disponibilidad térmica para la fotosíntesis y la acumulación de azúcares en las uvas.

El IF se calculó como el promedio de las temperaturas mínimas del mes de maduración (marzo). Este índice es clave para evaluar el potencial enológico, ya que noches más frescas favorecen la preservación de la acidez y la síntesis de compuestos aromáticos.

El IS integró la precipitación pluvial mensual, la evapotranspiración potencial y una reserva hídrica del suelo inicial estimada en 200 mm, permitiendo identificar situaciones de déficit hídrico o balance positivo en el suelo durante el período vegetativo.

El PH se calculó a partir de la interacción entre temperatura efectiva y horas de luz, como medida de la energía disponible para el crecimiento y maduración de la vid.

Finalmente, la duración del período activo se definió como el número de días en los que la temperatura media superó el umbral de 10 °C, considerado el cero vegetativo de la vid.

### Sistema CCM Geovitícola

El Sistema de Clasificación Climática Multicriterio Geovitícola (CCM) desarrollado por Tonietto y Carbonneau (2004) combina los tres índices IH, IF e IS para asignar a cada localidad un perfil climático vitícola. Cada índice se clasifica en categorías discretas (Tabla 2) y la combinación de las tres clases define el tipo climático de la región. El sistema admite hasta 96 combinaciones teóricas, aunque en la práctica solo se observa un subconjunto de ellas en cada territorio analizado.

Análisis estadístico y preprocesamiento de datos

**Tabla 2.** Índices bioclimáticos para el cultivo de vid.

Índice	Clase de clima vitícola	Sigla	Intervalo de clase		
Índice Heliotérmico $IH = \sum(T_{med} - 10 + T_{max} - 10) / 2k$	Muy cálido	IH +3	> 3000		
	Cálido	IH +2	> 2400 ≤ 3000		
	Templado cálido	IH +1	> 2100 ≤ 2400		
	Templado	IH -1	> 1800 ≤ 2100		
	Frío	IH -2	> 1500 ≤ 1800		
	Muy frío	IH -3	≤ 1500		
Índice de frío nocturno (°C) $IF = T_{min}$ promedio Marzo	Noches muy frías	IF +2	≤ 12		
	Noches frías	IF +1	> 12 ≤ 14		
	Noches templadas	IF -1	> 14 ≤ 18		
	Noches cálidas	IF -2	> 18		
Índice de sequía (mm) $IS = W_o + P - T_v - E_s$	Sequía fuerte	IS +2	≤ -100		
	Sequía moderada	IS +1	≤ 50 > -100		
	Sub-húmedo	IS -1	≤ 150 > 50		
	Húmedo	IS -2	> 150		
Duración del período activo N° Días $T_{med} > 10^{\circ}C$					
Producto Heliotérmico $PH = \sum(T_{ef} * H) * 10^{-6}$	1° Época	Variedades	Épocas	Maduración	I
			Tempranas	-5 días	2,8
			Medias	Chasselas Doré	2,95
	2° Época		Tardías	+5 días	3,1
			Tempranas	+10 días	3,25
			Medias	+15 días	3,4
	3° Época		Tardías	+20 días	3,55
			Tempranas	+25 días	3,71
			Medias	+30 días	3,86
	4° Época		Tardías	+35 días	4,02
			Tempranas	+40 días	4,18
			Medias	+45 días	4,33
	Tardías	>45 días	4,5		

Para evaluar la evolución temporal de los índices bioclimáticos se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), con un nivel de significancia del 5 %. Además, se utilizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre los promedios de IH, IF e IS, siguiendo el procedimiento descrito por Jolliffe (2002), con el objetivo de identificar patrones regionales y agrupar localidades según su similitud climática en el contexto vitivinícola.

El preprocesamiento de datos incluyó la verificación de la consistencia temporal y espacial de las series, el control de valores atípicos (outliers) mediante la comparación con registros de estaciones cercanas y la interpolación lineal de datos faltantes, que representaron menos del 5 % del total (OMM, 2017). El cálculo de índices bioclimáticos y pruebas estadísticas se realizó en Python 3.11 empleando las librerías *pandas*, *numpy*, *scipy* y *scikit-learn*, mientras que la representación cartográfica de los resultados se elaboró en QGIS 3.28.

## Resultados

### Índices bioclimáticos

#### Período activo de la vid

La duración del período activo de la vid (temperaturas medias  $\geq 10^{\circ}C$ ) mostró variaciones significativas entre las localidades de la provincia de Buenos Aires (Tabla 3, Figura 2). En el área metropolitana, Aeroparque (256 días) y Buenos Aires (253 días) registraron los valores más prolongados, con máximos de hasta 318 días y tendencias positivas significativas ( $p < 0,01$ ). San Fernando (247 días) y Punta Indio (231 días) también presentaron temporadas de crecimiento extendidas, con tendencias ascendentes ( $p < 0,05$ ), mientras que Ezeiza (222 días) mostró un comportamiento similar.

En el interior, la duración se redujo progresivamente: Bolívar (206 días), Bahía Blanca (201 días) y Las Flores (197 días) reflejaron ciclos intermedios, mientras que Coronel Suárez (161 días), Pigié (157 días) y Tandil (164 días)

registraron los valores más bajos. Algunas localidades, como Bolívar y Coronel Suárez, evidenciaron tendencias positivas ( $p \leq 0,05$ ), lo que indica un gradual alargamiento del ciclo vegetativo.

En conjunto, estos resultados sugieren que el norte y el área metropolitana ofrecen condiciones para el cultivo de variedades tardías, mientras que el sur de la provincia enfrenta limitaciones debido a temporadas activas más cortas, lo que requiere un manejo varietal más cuidadoso y posiblemente restrictivo.

### Índice heliotérmico (IH)

El IH evidenció predominio de categorías cálidas en gran parte del territorio (Tabla 4, Figura 3). En el área metropolitana, Buenos Aires (2695, IH +2), San Fernando (2548, IH +2) y Aeroparque (2528, IH +2) se clasificaron como *Caluroso*, lo que indica un elevado potencial para la maduración de variedades tardías, aunque con riesgo de estrés térmico. Ambas localidades mostraron tendencias positivas significativas ( $p < 0,01$ ).

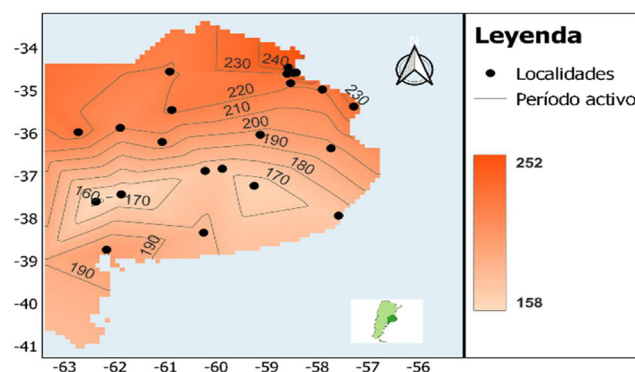
En el interior, Nueve de Julio (2583, IH +2), Ezeiza (2566,

**Tabla 3.** Valores medios, máximos, mínimos y tendencia ( $\tau$  MK) de la duración del período activo (en días) en las localidades analizadas de la provincia de Buenos Aires durante el período 1981–2023.

Localidad	Duración periodo activo			$\tau$ MK
	Media	Max	Min	
Aeroparque (BA)	256	318	206	0,0
Buenos Aires	253	318	206	0,0
San Fernando	247	315	206	0,04
Punta Indio (BA)	231	339	165	0,02
El Palomar	229	325	150	
Trenque Lauquen	226	266	180	
Ezeiza	222	274	149	0,02
Nueve de Julio	222	271	172	
Junín	219	262	149	
La Plata	219	336	159	
Pehuajó	210	324	109	
Bolívar	206	372	153	
Bahía Blanca	201	336	149	
Dolores	197	282	148	
Las Flores	197	276	148	0,05
Tres Arroyos	183	221	139	
Azul	173	210	108	
Mar del Plata	173	233	120	
Olavarría	173	208	139	
Tandil	164	198	121	
Coronel Suárez	161	203	70	0,05
Pigüé	157	191	97	

$\tau$  MK: estadístico tau de Mann-Kendall. Se informan únicamente los valores de tendencia estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ). Valores positivos indican tendencia creciente y valores negativos, tendencia decreciente.

**Figura 2.** Mapa de isolíneas que muestra la distribución espacial de la duración del período activo (en días) en la provincia de Buenos Aires. Los puntos indican las localidades analizadas.



IH +2), Junín (2548, IH +2), Bahía Blanca (2515, IH +2) y Pehuajó (2439, IH +2) se clasificaron también como *Caluroso*. Regiones intermedias, como La Plata (2382, IH +1), Bolívar (2369, IH +1), Las Flores (2349, IH +1) y Azul (2240, IH +1), correspondieron a la clase *Templado caluroso*, con menor riesgo térmico y aptas para cultivares de ciclo medio y tardío. En contraste, las zonas más frías, como Tandil (2074, IH -1), Pigüé (2043, IH -1) y Mar del Plata (1943, IH -1), se ubicaron en la clase *Templado*. No obstante, las tendencias crecientes observadas en estas localidades ( $p < 0,05$ ) sugieren un aumento gradual del potencial vitícola en el sur de la provincia, lo que amplía la posibilidad de cultivar variedades que requieren una mayor acumulación térmica.

### Índice de frío nocturno (IF)

El IF mostró marcados contrastes entre el norte y el sur (Tabla 5, Figura 4). Aeroparque (18,7 °C, IF -2) se clasificó en *Noches cálidas*, mientras que Buenos Aires (17,6 °C, IF -1) y San Fernando (16,7 °C, IF -1) en *Noches templadas*. Estas condiciones favorecen la acumulación de azúcares, aunque pueden comprometer la acidez, especialmente en años cálidos.

En el interior, Junín (13,9 °C, IF +1), Pehuajó (13,4 °C, IF +1) y Bahía Blanca (13,2 °C, IF +1) se ubicaron en la categoría *Noches frías*, que preserva mejor la acidez y los aromas. Las localidades más frías, como Olavarría (11,8 °C, IF +2), Azul (11,7 °C, IF +2), Pigüé (11,6 °C, IF +2) y Tandil (11,2 °C, IF +2), alcanzaron la categoría *Noches muy frías*. Combinado con IH > 1800, este entorno es favorable para variedades de ciclo medio (ej. Merlot, Chardonnay, Pinot Noir), equilibrando acidez y potencial aromático.

### Índice de sequía (IS)

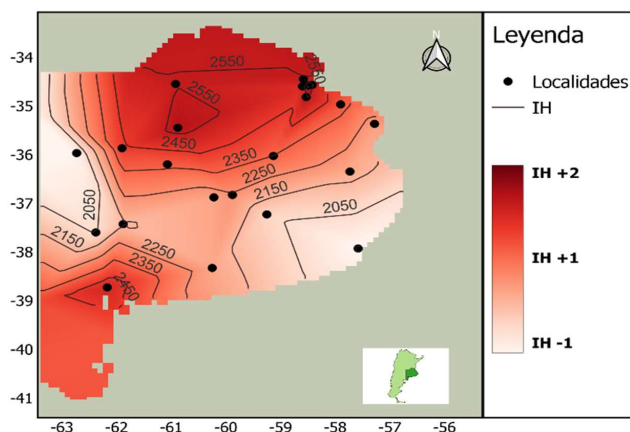
El IS mostró heterogeneidad en la disponibilidad hídrica estival (Tabla 6, Figura 5). En el área metropolitana, Aeroparque (176, IS -2) y Buenos Aires (157, IS -2) se clasificaron como *Húmedos*, lo que garantiza disponibilidad

**Tabla 4.** Valores medios, máximos, mínimos y tendencia ( $\tau$  MK) de la duración del IH en las localidades analizadas de la provincia de Buenos Aires durante el período 1981–2023.

Localidad	Índice Heliotérmico				
	Media	Max	Min	$\tau$ MK	
Buenos Aires	2695	IH +2	3048	2401	0
Nueve de Julio	2583	IH +2	3137	2150	0
Ezeiza	2566	IH+2	3058	2114	0
Junín	2548	IH +2	3058	2216	0
San Fernando	2548	IH +2	2948	1691	0
Aeroparque (BA)	2528	IH+2	2835	2257	0,01
Bahía Blanca	2515	IH+2	2912	1715	0,03
El Palomar	2491	IH +2	3011	1147	
Pehuajó	2439	IH+2	3054	1366	0
La Plata	2382	IH +1	2806	1712	0,03
Bolívar	2369	IH +1	2892	1766	0,03
Las Flores	2349	IH +1	2828	1310	0
Azul	2240	IH +1	2523	1913	
Punta Indio (BA)	2209	IH +1	2607	1652	0,03
Olavarría	2196	IH +1	2623	1646	0
Tres Arroyos	2190	IH +1	2694	1459	0,01
Dolores	2183	IH +1	2586	1078	0
Coronel Suárez	2142	IH +1	2704	1496	0,02
Tandil	2074	IH -1	2424	1284	0,01
Pigüé	2043	IH -1	2628	1210	0
Trenque Lauquen	1956	IH -1	2819	1398	
Mar del Plata	1943	IH -1	2169	1358	

$\tau$ MK: estadístico tau de Mann-Kendall. Se informan únicamente los valores de tendencia estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ). Valores positivos indican tendencia creciente y valores negativos, tendencia decreciente.

**Figura 3.** Mapa de isolíneas que muestra la distribución espacial del IH en la provincia de Buenos Aires. Los puntos indican las localidades analizadas.



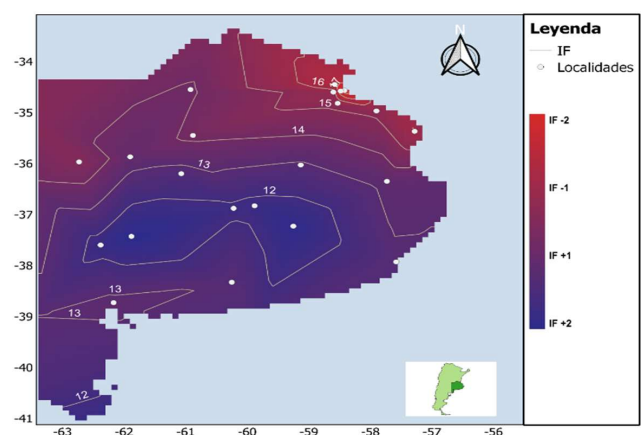
de agua suficiente para sostener el crecimiento vegetativo.

En localidades con condiciones intermedias, como Mar del Plata (147, IS -1) y Bahía Blanca (54, IS -1), el IS correspondió a la clase *Sub-húmedo*. En este grupo, algunas localidades mostraron tendencias descendentes

**Tabla 5.** Valores medios, máximos y mínimos del IF en las localidades analizadas de la provincia de Buenos Aires durante el período 1981–2023.

Localidad	Índice de frío (IF)			
	Media	Max	Min	
Aeroparque (BA)	18,7	IF-2	22,4	16,5
Buenos Aires	17,6	IF-1	22,5	15
San Fernando	16,7	IF-1	21,1	14,7
Punta Indio (BA)	16	IF-1	19,5	13,3
El Palomar	15,6	IF-1	20,9	13
Ezeiza	15,3	IF-1	20,5	12,4
La Plata	15,2	IF-1	19,9	12
Trenque Lauquen	14,8	IF+1	18,6	11,8
Nueve de Julio	14,2	IF-1	18,1	11,4
Junín	13,9	IF+1	17,9	10,9
Pehuajó	13,4	IF+1	16,8	11,1
Bahía Blanca	13,2	IF+1	16	10,3
Dolores	13,2	IF+1	16,5	9,7
Las Flores	12,9	IF+1	17	10,2
Mar del Plata	12,9	IF+1	15,9	8,6
Tres Arroyos	12,9	IF+1	15,5	10,7
Bolívar	12,6	IF+1	16,1	9,5
Olavarría	11,8	IF+2	15,1	8,6
Azul	11,7	IF+2	15	7,9
Pigüé	11,6	IF+2	14,6	8,7
Tandil	11,2	IF+2	14,2	7,4
Coronel Suárez	11	IF+2	14,5	7,9

**Figura 4.** Mapa de isolíneas que muestra la distribución espacial del IF en la provincia de Buenos Aires. Los puntos indican las localidades analizadas.



significativas, como Bolívar (115), Tandil (102) y Azul (100) ( $p < 0,05$ ), lo que sugiere una transición hacia escenarios con mayor déficit hídrico. Ezeiza (97, IS -1) y San Fernando (88, IS -1) se ubicaron en el límite inferior de la categoría, aunque San Fernando mostró tendencia positiva significativa ( $p < 0,01$ ), indicando recuperación hídrica reciente.

En síntesis, el norte y el sudeste presentan humedad

favorable, mientras que el centro y el sur enfrentan un déficit hídrico progresivo, lo que plantea desafíos de manejo hídrico.

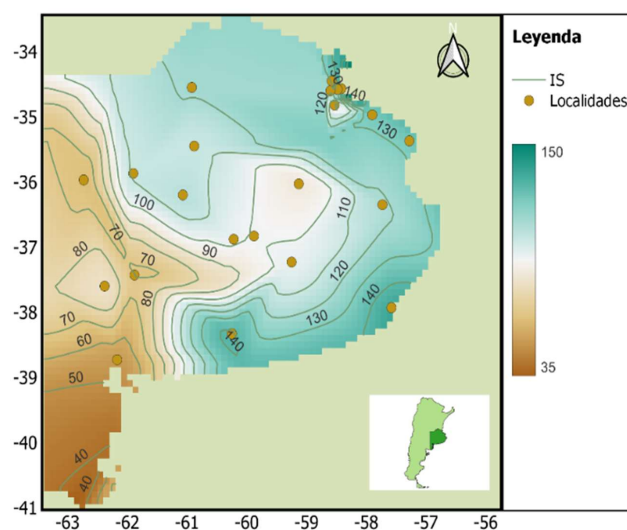
### Producto heliotérmico (PH)

El PH mostró tendencia creciente en la mayoría de las localidades analizadas (Tabla 7, Figura 6). En el área metropolitana, Aeroparque (6,0), Buenos Aires (6,1) y San Fernando (5,7) registraron los valores más elevados, con alta significancia estadística ( $p < 0,01$ ), lo que favorece variedades de maduración media y tardía.

En localidades del interior, Bahía Blanca (5,1), Junín (5,2) y La Plata (5,1) registraron valores intermedios-altos de PH, adecuados para cultivares exigentes que requieren buena disponibilidad de energía para su crecimiento y maduración. En el sur, Coronel Suárez (4,0), Pigüé (4,1) y Tandil (3,9) registraron valores más bajos, aunque con tendencias crecientes, lo que sugiere un incremento sostenido del potencial heliotérmico en estas zonas.

De manera general, el aumento del PH en casi toda la provincia podría estar relacionado con el cambio climático,

**Figura 5.** Mapa de isolíneas que muestra la distribución espacial del IS en la provincia de Buenos Aires. Los puntos indican las localidades analizadas.



al incrementar la energía disponible para el desarrollo de la vid, ampliando así las oportunidades de cultivo incluso en áreas tradicionalmente marginales.

**Tabla 6.** Valores medios, mínimos y tendencia ( $\tau$  MK) del IS en las localidades analizadas de la provincia de Buenos Aires durante el período 1981–2023.

Localidad	Índice de sequía (IS)			$\tau$ MK
	Media	Min		
Aeroparque (BA)	176	IS-2	-0,1	
Buenos Aires	157	IS-2	-12,7	
Mar del Plata	147	IS-1	-32,2	
Tres Arroyos	141	IS-1	22,7	
Punta Indio (BA)	134	IS-1	-55,9	
La Plata	133	IS-1	-104,1	
El Palomar	123	IS-1	-123	
Junín	121	IS-1	-121,3	
Dolores	119	IS-1	-76,3	
Bolívar	115	IS-1	-46,9	-0,04
Nueve de Julio	111	IS-1	-112,2	
Pehuajó	111	IS-1	-94,5	
Olavarría	102	IS-1	-33,1	
Tandil	102	IS-1	-101,5	-0,03
Azul	100	IS-1	-40,6	-0,01
Ezeiza	97	IS-1	-149,7	
Las Flores	93	IS-1	-88,8	
San Fernando	88	IS-1	-93,4	0,0
Pigüé	87	IS-1	-62,2	
Coronel Suárez	70	IS-1	-99,8	
Trenque Lauquen	66	IS-1	-99,7	
Bahía Blanca	54	IS-1	-32	

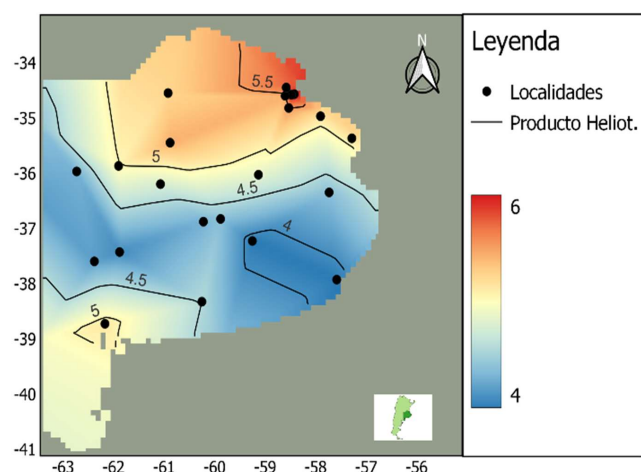
$\tau$  MK: estadístico tau de Mann-Kendall. Se informan únicamente los valores de tendencia estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ). Valores positivos indican tendencia creciente y valores negativos, tendencia decreciente.

**Tabla 7.** Valores medios, máximos, mínimos y tendencia ( $\tau$  MK) del PH en las localidades analizadas de la provincia de Buenos Aires durante el período 1981–2023.

Localidad	Producto Heliotérmico			
	Media	Max	Min	$\tau$ MK
Buenos Aires	6,1	6,9	5,5	0
Aeroparque (BA)	6	6,5	5,4	0,01
San Fernando	5,7	6,5	4,6	0
Ezeiza	5,5	6,5	4,7	0
El Palomar	5,4	6,5	3,9	
Nueve de Julio	5,4	6,9	4,6	0
Junín	5,2	6,1	4,6	0,02
Bahía Blanca	5,1	6,1	4,1	
La Plata	5,1	5,9	3,1	0,01
Punta Indio (BA)	5,1	5,9	3,4	0
Pehuajó	5	6,7	3	0
Las Flores	4,8	6,1	3,4	0
Bolívar	4,7	6,2	2,6	
Tres Arroyos	4,5	5,7	3,1	0
Azul	4,3	4,8	3,6	
Dolores	4,3	5,2	2,2	0
Olavarría	4,2	5,5	3,5	0
Trenque Lauquen	4,2	6,8	3,1	
Pigüé	4,1	5,6	2,8	0
Coronel Suárez	4	5,7	2,8	0,02
Mar del Plata	3,9	4,5	3,4	
Tandil	3,9	4,6	3,2	

$\tau$  MK: estadístico tau de Mann-Kendall. Se informan únicamente los valores de tendencia estadísticamente significativos ( $p < 0,05$ ). Valores positivos indican tendencia creciente y valores negativos, tendencia decreciente.

**Figura 6.** Mapa de isolíneas que muestra la distribución espacial del PH en la provincia de Buenos Aires. Los puntos indican las localidades analizadas.



**Sistema CCM Geovitícola  
Clasificación climática**

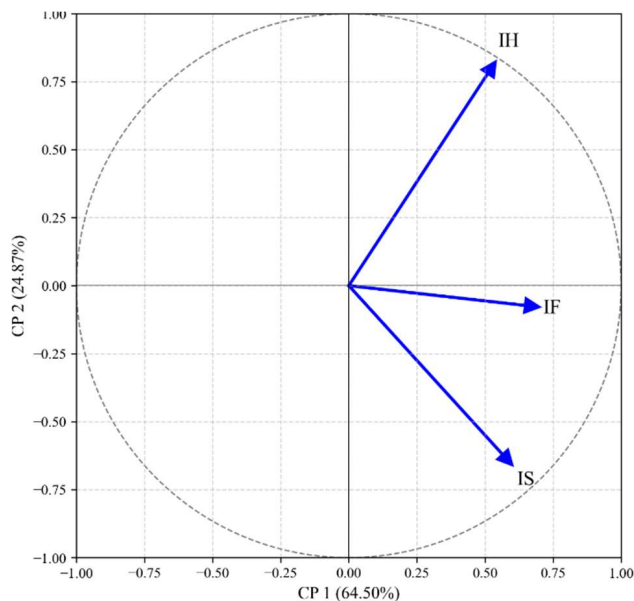
La aplicación del Sistema CCM (Tonietto y Carbonneau, 2004) combinó los índices IH, IF e IS para clasificar cada estación o localidad en tipos climáticos específicos (Tabla 8). Aunque el modelo admite hasta 96 combinaciones teóricas, en este estudio se identificaron únicamente 10, lo que refleja la heterogeneidad agroclimática de Buenos Aires. Esta diversidad de perfiles o tipos climáticos proporciona información valiosa para la selección varietal y la planificación de estrategias de manejo adaptadas a las condiciones locales.

**Análisis multivariado de los índices**

El ACP sobre IH, IF e IS explicó el 89,37% de la variabilidad total con los dos primeros componentes (Figura 7). CP1 (64,50%) se asoció principalmente con IS e IF, representando un gradiente hídrico-térmico nocturno; CP2 (24,87%) reflejó el gradiente térmico vinculado al IH.

El análisis de componentes principales mostró que las estaciones del norte y del área metropolitana se agrupan con valores altos de CP1 y CP2, caracterizadas por noches más

**Figura 7.** Círculo de correlaciones obtenido mediante el Análisis de Componentes Principales (ACP) que muestra la contribución de los índices bioclimáticos IH, IF e IS a los dos primeros componentes (CP1 y CP2).



cálidas y menor disponibilidad hídrica. Estas condiciones favorecen la acumulación de azúcares, aunque pueden comprometer la acidez. En contraste, el sur provincial se ubicó en valores bajos de CP1 y CP2, con noches frías y mayor disponibilidad hídrica, lo que preserva la acidez y la complejidad aromática, aunque limita el potencial térmico para variedades tardías (Figuras 8 y 9).

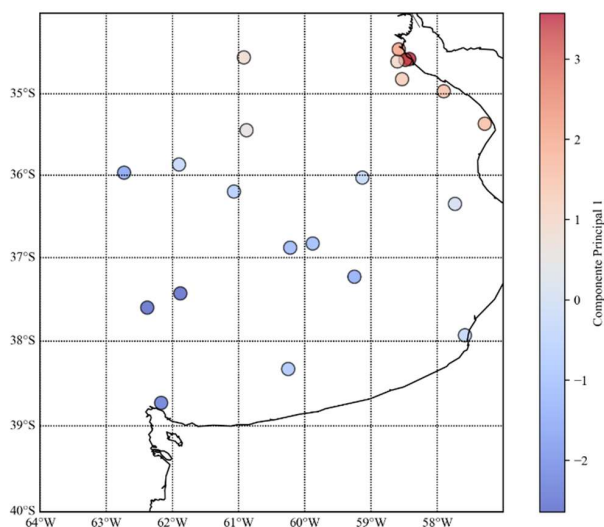
**Discusión**

Los resultados evidencian la marcada heterogeneidad agroclimática de la provincia de Buenos Aires, reflejada en la identificación de diez combinaciones de índices mediante el Sistema CCM. Este número concuerda con lo reportado en otras regiones vitícolas emergentes: Chile Central donde Montes et al. (2012) identificaron aproximadamente diez combinaciones, frente a las 36

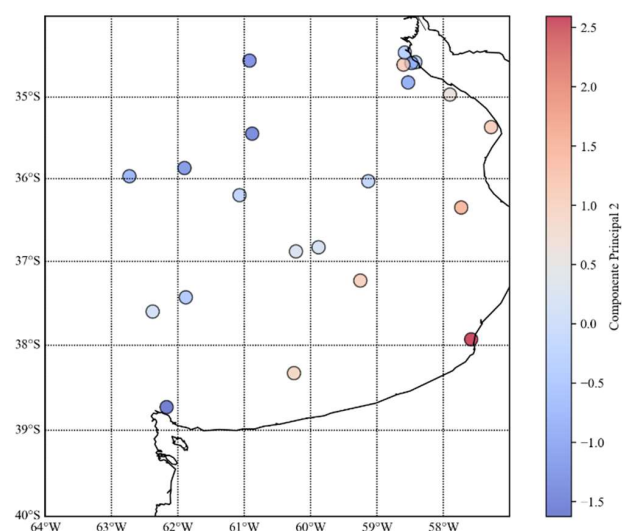
**Tabla 8.** Clasificación climática de las localidades de la provincia de Buenos Aires según el Sistema CCM Geovitícola, a partir de la combinación de los índices IH, IF e IS. Se identificaron diez tipos climáticos vitícolas del total de 96 combinaciones teóricas posibles.

Índice de sequía (IS)	Índice Heliotermico (IH)													
	IH -1			IH +1			IH +2			Índice de Frío (IF)				
	IF+2	IF+1	IF-1	IF-2	IF+2	IF+1	IF-1	IF-2	IF+2	IF+1	IF-1	IF-2		
IS -2												Bs	As	Arp
IS -1	Pi -T	MdP	TL		O -	TA-				J -		Pe -	SF -	
					Az-	LF-	PI -			Ba		EP - Ez-		
					CS	Bo	LP			Bl		NdJ		

**Figura 8.** Distribución geográfica de las localidades de la provincia de Buenos Aires según los valores del primer componente principal (CP1) del Análisis de Componentes Principales (ACP).



**Figura 9.** Distribución geográfica de las localidades de la provincia de Buenos Aires según los valores del segundo componente principal (CP2) del Análisis de Componentes Principales (ACP).



combinaciones efectivas documentadas a escala global por Tonietto y Carbonneau (2004) y los 31 grupos climáticos delimitados en Iberoamérica por Tonietto et al. (2012). La coherencia con estos estudios valida la utilidad del CCM para delinear subzonas vitícolas en territorios no tradicionales y en expansión.

En el norte y área metropolitana predominan perfiles cálidos ( $IH +2$ ), con noches templadas a cálidas e índices hídricos de sub-húmedos a moderadamente secos. Estas condiciones favorecen variedades tintas de maduración media a tardía (Cabernet Sauvignon, Malbec, Syrah, Tempranillo), aunque con riesgo de pérdida de acidez y desequilibrio organoléptico (Jones et al., 2005; Schultz y Jones, 2010). Situaciones similares se han registrado en

regiones cálidas en expansión, como Entre Ríos (Cicinelli et al., 2020), aunque allí la diversidad climática es menor.

En contraste, el centro y sur bonaerense presentan perfiles más frescos ( $IH$  templado a templado caluroso e  $IF$  muy frío), con mayor capacidad de preservación de acidez y desarrollo aromático. Estas condiciones son idóneas para variedades blancas (Chardonnay, Sauvignon Blanc, Riesling) y tintas delicadas (Merlot, Pinot Noir, Cabernet Franc), coincidiendo con lo señalado por Godoy y Gancedo (2022) en la región Mar y Sierras. La similitud climática con regiones como Burdeos sugiere un potencial diferencial para vinos de mayor fineza enológica.

No obstante, la mayor disponibilidad hídrica del norte y del área metropolitana, expresada en valores de IS húmedo a sub-húmedo, representa también un factor de riesgo fitosanitario que no debe soslayarse en la planificación vitivinícola. Las precipitaciones elevadas, la alta humedad relativa y la mayor duración del mojado foliar durante el período vegetativo favorecen el desarrollo de enfermedades fúngicas de alto impacto económico, particularmente la podredumbre gris (*Botrytis cinerea*) y el mildiu de la vid (*Plasmopara viticola*), cuyas epidemias se encuentran estrechamente asociadas con condiciones de humedad persistente y temperaturas comprendidas entre 18 y 25 °C (Kennelly et al., 2007; Caffi et al., 2010; Brischetto et al., 2021). En consecuencia, estas subregiones podrían requerir estrategias de manejo fitosanitario más intensivas y una cuidadosa selección varietal, particularmente en cultivares de racimos compactos, cuya menor aireación y mayor retención de humedad entre las bayas pueden incrementar la susceptibilidad a podredumbres del racimo. Por el contrario, ambientes con déficit hídrico moderado durante la maduración pueden contribuir a reducir la presión de enfermedades criptogámicas y resultar más favorables para variedades sensibles como Pinot Noir, además de promover la acumulación de antocianinas y otros compuestos fenólicos de interés enológico (Ojeda et al., 2002). Estas consideraciones refuerzan la necesidad de incorporar el riesgo fitosanitario, la susceptibilidad varietal y el microclima de parcela como criterios complementarios en la zonificación vitícola de las distintas subregiones de la provincia.

La variabilidad hídrica observada, con tendencias descendentes significativas en Bolívar, Azul y Tandil, resalta la necesidad de estrategias de adaptación frente al aumento del estrés hídrico, en línea con lo proyectado por Alonso et al. (2024). Prácticas como el riego deficitario, la elección de portainjertos tolerantes y el uso de coberturas vegetales adquieren relevancia bajo escenarios más variables (Straffelini et al., 2023).

El incremento sostenido del Producto Heliotérmico en la mayor parte de las estaciones indica un aumento del potencial de maduración, ampliando la gama de variedades

cultivables en Buenos Aires, tal como anticipaban los umbrales de Branas (1974). No obstante, este efecto positivo debe evaluarse junto con los riesgos de pérdida de acidez y cambios fenológicos acelerados (Gaiotti et al., 2018; Arrizabalaga et al., 2018).

El ACP aplicado a los índices sintetizó eficazmente la complejidad climática regional, distinguiendo un eje hídrico-nocturno (CP1) y otro térmico (CP2). Esta estructura coincide con estudios regionales como el de Aliaga et al. (2017) en la Pampa Húmeda y con aplicaciones del CCM en Galicia (Blanco-Ward et al., 2007), sugiriendo que Buenos Aires posee la diferenciación climática suficiente para justificar una zonificación vitícola estratégica, con implicancias en la diversificación productiva y la mitigación de riesgos climáticos.

### Conclusiones

La caracterización bioclimática de la provincia de Buenos Aires, basada en los índices IH, IF, IS, PH y en la duración del período activo, evidenció una marcada heterogeneidad agroclimática, expresada en diez combinaciones distintas de clases climáticas. Esta diversidad confirma que el territorio ofrece condiciones contrastantes: mientras las zonas del norte y el área metropolitana presentan un alto potencial para variedades tintas de maduración tardía, el centro-sur y sudeste resultan más propicios para variedades blancas frescas y tintas delicadas.

El incremento del Producto Heliotérmico y la extensión del período activo observados en varias estaciones sugieren una posible ampliación del rango varietal cultivable. Sin embargo, la tendencia a la reducción de la disponibilidad hídrica en algunas localidades impone limitaciones que deberán abordarse mediante estrategias de manejo adaptativo, como el uso de portainjertos resistentes, técnicas de riego más eficientes y coberturas vegetales. En particular, el sudeste bonaerense, donde la influencia marítima modera las temperaturas nocturnas, emerge como una subregión con condiciones diferenciales para la producción de vinos de mayor fineza enológica, lo que respalda la consolidación de áreas como Mar y Sierras como zona vitícola de referencia a nivel provincial.

En conjunto, los resultados confirman el potencial vitícola diverso de Buenos Aires y proporcionan información de base para la planificación territorial, la selección varietal y el diseño de prácticas sostenibles en un contexto de cambio climático.

### Contribución de los autores

G. HERNÁNDEZ: concepción del trabajo, diseño metodológico, adquisición y análisis de datos, análisis estadístico y redacción del artículo. D. RODRÍGUEZ: revisión crítica y redacción de la discusión.

### Referencias

- ALIAGA, V. S.; FERRELLI, F.; PICCOLO, M. C. Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. S1, p. 1237–1247, 2017. DOI: 10.1002/joc.5079.
- ALONSO, J. C.; FELICIANO, D. E. F.; TREZZA, J. F.; MONTEIRO, H. S. A.; BRITO, S. N. S.; MANIERO, C. R.; BRONZE, A. B. da S.; TECCHIO, M. A. Desafios e oportunidades na produção de uvas de mesa e suas perspectivas de mercado da região Sudeste do Brasil: uma revisão narrativa. *Editora Científica Digital*, v. 1, 2024. DOI: 10.37885/240416268.
- ARANGUREN GONZÁLEZ, M. Determinación de los índices bioclimáticos y tipo de clima para la vid en las condiciones de Jagüey Grande, Matanzas, Cuba. *Centro Agrícola*, v. 42, n. 4, p. 75–83, oct.–dic. 2015.
- ARRIZABALAGA, M.; MORALES, F.; OYARZUN, M.; DELROT, S.; GOMÈS, E.; IRIGOYEN, J. J.; HILBERT, G.; PASCUAL, I. Tempranillo clones differ in the response of berry sugar and anthocyanin accumulation to elevated temperature. *Plant Science*, v. 267, p. 74–83, 2018. DOI: 10.1016/j.plantsci.2017.11.009.
- BANJANIN, T.; RANKOVIĆ-VASIĆ, Z.; GLIŠIĆ, M.; PRŽIĆ, Z. The observed changes in climate characteristics in the Trebinje vineyard area (Bosnia and Herzegovina). *Atmosphere*, v. 15, n. 4, p. 514, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15040514>
- BARBERO, N.; RÖSSLER, C.; CANZIANI, P. Cambio climático y viticultura: variabilidad climática presente y futura y aptitud vitícola en 3 localidades de la Patagonia. *Revista Enología*, v. 5, n. 2, 2008.
- BLANCO-WARD, D.; GARCÍA QUEIJEIRO, J. M.; JONES, G. V. Spatial climate variability and viticulture in the Miño River Valley of Spain. *Vitis*, v. 46, n. 2, p. 63–70, 2007. DOI: 10.5073/vitis.2007.46.63-70.
- BRANAS, J. *Viticulture générale*. Montpellier: Dehan, 1974. 990 p.
- BRISCHETTO, Chiara; BOVE, Federica; FEDELE, Giorgia; ROSSI, Vittorio. A weather-driven model for predicting infections of grapevines by sporangia of *Plasmopara viticola*. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v. 12, art. 636607, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.636607.
- CAFFI, T.; ROSSI, V.; BUGIANI, R. Evaluation of a warning system for controlling primary infections of grapevine downy mildew. *Plant Disease*, v. 94, n. 6, p. 709–716, 2010. DOI: 10.1094/PDIS-94-6-0709
- CARBONNEAU, A. Le zonage des potentialités viticoles à l'échelle de l'Union Européenne. *Progrès Agricole et Viticole*, v. 22, p. 505–514, 1994.
- CARRIL, A. F.; CAVALCANTI, I. F. A.; MENÉNDEZ, C. G.; SÖRENSSON, A.; LÓPEZ-FRANCA, N.; RIVERA, J. A.; ROBLEDO, F.; ZANINELLI, P. G.; AMBRIZZI, T.; PENALBA, O. C.; DA ROCHA, R. P.; SÁNCHEZ, E.; BETTOLLI, M. L.; PESSACG, N.; RENOM, M.; RUSCICA, R.; SOLMAN, S.; TENCER, B.; GRIMM, A. M.; RUSTICUCCI, M.; CHERCHI, A.; TEDESCHI, R.; ZAMBONI, L. Extreme events in the La Plata basin: a retrospective analysis of what we have learned during CLARIS-LPB project. *Climate Research*, v. 68, n. 2–3, p. 95–116, 2016. DOI: 10.3354/cr01374.
- CAVALCANTI, I. F. A.; CARRIL, A. F.; PENALBA, O. C.; GRIMM, A. M.; MENÉNDEZ, C. G.; SÁNCHEZ, E.; CHERCHI, A.; SÖRENSSON, A.; ROBLEDO, F.; RIVERA, J.; PÁNTANO, V.; BETTOLLI, M. L.; ZANINELLI, P.; ZAMBONI, L.; TEDESCHI, R. G.; DOMÍNGUEZ, M.; RUSCICA, R.; FLACH, R. Precipitation extremes over La Plata Basin – Review and new results from observations and climate simulations. *Journal of Hydrology*, v. 523, p. 211–230, 2015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.028
- CHAMPAGNOL, F. *Éléments de physiologie de la vigne et viticulture générale*. Montpellier: Imprimerie Dehan, 1984. 351 p.
- CICINELLI, M. L.; GIMÉNEZ, D. A.; SILVA, L.; VAIMAN, N. Índices bioclimáticos para la vid en el centro este de Entre Ríos, Argentina. In: XVIII REUNIÓN ARGENTINA Y IX LATINOAMERICANA DE AGROMETEOROLOGÍA – RALDA 2020, 25 nov. 2020. *Actas* [s.l.]: RALDA, 2020.
- COMTE, V.; SCHNEIDER, L.; CALANCA, P.; REBETEZ, M. Effects of climate change on bioclimatic indices in vineyards along Lake Neuchâtel, Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 147, p. 423–436, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03836-1>
- COMTE, V.; SCHNEIDER, L.; CALANCA, P.; ZUFFEREY, V.; REBETEZ, M. Future climatic conditions may threaten adaptation capacities for vineyards along Lake Neuchâtel, Switzerland. *OENO One*, v. 57, n. 2, p. 85–100, 2023. DOI: 10.20870/oeno-one.2023.57.2.7194

- COOMBE, B. G. Influence of temperature on composition and quality of grapes. In: *Acta Horticulturae*, n. 206, p. 23–33, 1987.
- DUCHÊNE, E.; SCHNEIDER, C. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 25, p. 93–99, 2005.
- ETCHEBARNE, F. **Influence du régime hydrique de la vigne et du rapport feuilles-fruits sur la composition minérale, et sur le bilan en sucres et en eau de la baie cv. Grenache noir (Vitis vinifera L.)**. 2008. 163 p. Thèse (Doctorat en Viticulture) – ENSA Montpellier, Montpellier, France.
- FERREIRA, V.; ORTÍN, N.; ESCUDERO, A.; LÓPEZ, R.; CACHO, J. Chemical characterization of the aroma of Grenache rosé wines: aroma extract dilution analysis, quantitative determination, and sensory reconstitution studies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 52, p. 6622–6631, 2004.
- FREGONI, M.; PEZZUTTO, S. Impacts of climate change on viticulture. In: HESTER, R. E.; HARRISON, R. M. (Eds.). *Climate change and agriculture*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2000. p. 105–122.
- GAIOTTI, F.; PASTORE, C.; FILIPPETTI, I.; LAVY, M.; LORENZIS, G. de; CARGNIELLO, G.; TOMASI, D. Low night temperature at veraison enhances the accumulation of anthocyanins in *Corvina* grapes (*Vitis vinifera* L.). *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 8719, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-27011-x
- GLADSTONES, J. S. Viticulture and environment. Adelaide: Winetitles, 1992.
- GODOY, C. A.; GANCEDO DESGENS, E. Aptitud vitícola del sudeste bonaerense en base a índices bioclimáticos. *Revista de la Facultad de Agronomía UBA*, v. 42, n. 2, p. 7–12, 2022. Disponible en: <https://ri.agro.uba.ar/files/download/revista/agronomiayambiente/2022godoybadiuinocarlosalberto.pdf>
- HARRIS, C. R.; MILLMAN, K. J.; VAN DER WALT, S. J.; GOMMERS, R.; VIRTANEN, P.; COURNAPEAU, D.; WIESER, E.; TAYLOR, J.; BERG, S.; SMITH, N. J.; KERN, R.; PICUS, M.; HOYER, S.; VAN KERKWIJK, M. H.; BRETT, M.; HALDANE, A.; FERNÁNDEZ DEL RÍO, J.; WIEBE, M.; PETERSON, P.; GÉRARD-MARCHANT, P.; SHEPPARD, K.; REDDY, T.; WECKESSER, W.; ABBASI, H.; GOHLKE, C. OLIPHANT, T. E. Array programming with NumPy. *Nature*, v. 585, n. 7825, p. 357–362, 2020. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2
- HUGLIN, P. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, v. 64, p. 853–861, 1978.
- INSTITUTO NACIONAL DE VITIVINICULTURA (INV). Informe anual 2023: superficie cultivada y producción vitivinícola por departamento. Mendoza: INV, 2023. Disponible en: [https://www.argentina.gov.ar/sites/default/files/2018/10/informe\\_anual\\_de\\_superficie\\_2023.pdf](https://www.argentina.gov.ar/sites/default/files/2018/10/informe_anual_de_superficie_2023.pdf)
- IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3.056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.
- JOLLIFFE, I. T. Principal component analysis. 2. ed. New York: Springer, 2002.
- JONES, G. V.; DAVIS, R. E. Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture*, v. 51, p. 249–261, 2000.
- JONES, G. V.; DUCHÊNE, E.; TOMASI, D.; YUSTE, J.; BRASLAVSKA, O.; SCHULTZ, H.; MARTINEZ, C.; BOSO, S.; LANGELLIER, F.; PERRUCHOT, C.; GUIMBERTEAU, G. Changes in European winegrape phenology and relationships with climate. In: *GESCO 2005, Alemanha*, 2005. *Actas*. Alemanha: GESCO, 2005. v. 1, p. 55–62.
- KENDALL, M. G. Rank correlation methods. London: Charles Griffin, 1975.
- KENNELLY, M. M.; GADOURY, D. M.; WILCOX, W. F.; MAGAREY, P. A.; SEEM, R. C. Primary infection, lesion productivity, and survival of sporangia in the grapevine downy mildew pathogen *Plasmopara viticola*. *Phytopathology*, v. 97, n. 4, p. 512–522, 2007. DOI: 10.1094/PHYTO-97-4-0512
- LEBON, E. Changements climatiques: quelles conséquences prévisibles sur la viticulture? In: 6es Rencontres Rhodaniennes, 2002, Orange, France. *Actas*. Orange: Institut Rhodanien, 2002. p. 31–36.
- LOVINO, M. A.; MÜLLER, O.; BERBERY, E. H.; MÜLLER, G. How have daily climate extremes changed in the recent past over northeastern Argentina? *Global and Planetary Change*, v. 168, p. 78–97, 2018. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2018.06.008
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.
- MCKINNEY, W. Data structures for statistical computing in Python. In: Proceedings of the 9th Python in Science Conference. Austin: SciPy, 2010. p. 51–56.
- MONTES, C.; MARTÍN ULIARTE, E.; ANTELO BRUNO, L.; PÉREZ ACEVEDO, Y.; HATTA SAKODA, B. Zonificación vitícola en Iberoamérica. In: TONIETTO, J.; SOTÉS RUIZ, V.; GÓMEZ-MIGUEL, V. D. (eds.). *Clima, zonificación y tipicidad del vino en regiones vitivinícolas iberoamericanas*. Madrid: CYTED, 2012. p. 141–150. Disponible en: [https://oa.upm.es/13203/1/Zonificacion\\_viticola\\_Iberoamerica\\_CYTED.pdf](https://oa.upm.es/13203/1/Zonificacion_viticola_Iberoamerica_CYTED.pdf)
- MORIONDO, M.; BINDI, M. Impact of climate change on the phenology of typical Mediterranean crops. *Italian Journal of Agrometeorology*, v. 3, p. 5–12, 2007.
- NISTOR, E.; DOBREI, A. G.; DOBREI, A.; CAMEN, D. Growing season climate variability and its influence on Sauvignon Blanc and Pinot Gris berries and wine quality: case study in Romania (20052015). *South African Journal of Enology and Viticulture*, Stellenbosch, v. 39, n. 2, p. 196–207, 2018. DOI: 10.21548/39-2-3065.
- OJEDA, H.; ANDARY, C.; KRAEVA, E.; CARBONNEAU, A.; DELOIRE, A. Influence of pre- and post-veraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *American Journal of Enology and Viticulture*, v. 53, n. 4, p. 261–267, 2002. DOI: 10.5344/ajev.2002.53.4.261.
- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). Directrices para el control de la calidad y el aseguramiento de la calidad de los datos de estaciones de observación en superficie para aplicaciones climáticas (OMM No. 1269). Ginebra: OMM, 2017. Disponible en: <https://library.wmo.int/viewer/28302>.
- PASCALE, A. J.; DAMARIO, E. M. Agroclimatología de cultivos: los factores climáticos y sus efectos en la producción agrícola. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2004.
- PEDREGOSA, F.; VAROQUAUX, G.; GRAMFORT, A.; MICHEL, V.; THIRION, B.; GRISEL, O.; BLONDEL, M.; PRETTENHOFER, P.; WEISS, R.; DUBOURG, V.; VANDERPLAS, J.; PASSOS, A.; COURNAPEAU, D.; BRUCHER, M.; PERROT, M.; DUCHESNAY, E. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, v. 12, p. 2825–2830, 2011.
- PRESCOTT, J. A. The climatology of the vine *Vitis vinifera* and the cool limits of cultivation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, v. 89, p. 5–23, 1964.
- PUGA, G.; ANDERSON, K.; JONES, G.; DOKO TCHATOKA, F.; UMBERGER, W. A climatic classification of the world's wine regions. *OENO One*, [S.l.], v. 56, p. 165–177, 2022. DOI: 10.20870/oeno-one.2022.56.2.4627.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2023. Disponible en: <https://qgis.org>
- RAMOS, M. C.; MARTÍNEZ DE TODA, F. Macabeo (Viura) grape response to climate variability in areas located at different elevations in the Rioja Designation of Origin. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 102, p. 5670–5679, 2022. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11914>
- REYNIER, A. Climate and grapevine growth cycles. In: JACKSON, D. I.; LOMBARD, P. B. (Eds.). *Environmental and Viticultural Systems*. Dordrecht: Springer, 2005. p. 75–106.
- RUSTICUCCI, M.; BARRUCAND, M. Trends in extreme high temperatures in northern Argentina: Relationships with the Southern Hemisphere circulation. *Journal of Climate*, v. 17, n. 10, p. 1836–1843, 2004.
- RUSTICUCCI, M. Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. *Atmospheric Research*, v. 106, p. 1–17, 2012. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.11.001.
- SANTOS, M.; VIEIRA, H.; SILVESTRE, J.; FERREIRA, A. C. Physiological behavior of Syrah and Castelão Nacional grapevine varieties in two wine regions of Portugal. *Acta Horticulturae*, n. 905, p. 29–34, 2011.
- SCHULTZ, H. R. Climate change and viticulture: European perspective climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, v. 1, p. 8–12, 2000.

- SCHULTZ, H. R.; JONES, G. V. Climate-induced historic and future changes in viticulture. **Journal of Wine Research**, v. 21, n. 2, p. 137–145, 2010.
- SEGUIN, B. Les conséquences pour l'agriculture. **Responsabilité & Environnement**, n. 47, p. 35–42, juil. 2007.
- SEGUIN, B. Le changement climatique: conséquences pour l'agriculture et la forêt. **Rayonnement du CNRS**, n. 54, p. 36–47, 2010.
- SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (SMN). Base de datos meteorológicos. Buenos Aires: SMN, 2023. Disponible en: <https://www.smn.gob.ar>.
- SOZZI, G. O.; FRIONI, T.; ABARCA, M. R.; PONCE, M. T. Chill unit accumulation in temperate fruit trees as a response to global warming: a case study in Argentina. **Acta Horticulturae**, n. 748, p. 237–242, 2007.
- STRAFFELINI, E.; CARRILLO, N.; SCHILARDI, C.; AGUILERA, R.; ESTRELLA ORREGO, M. J.; TAROLLI, P. Viticultura en Argentina bajo escenarios climáticos extremos: desafíos actuales, perspectivas futuras. **Geografía y Sostenibilidad**, v. 4, n. 2, p. 161–169, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.03.003>
- TONIETTO, J. **Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France: méthodologie de caractérisation**. 1999. 233 p. Thèse (Doctorat) – École Nationale Supérieure Agronomique, Montpellier.
- TONIETTO, J. Valorização do ecossistema: importância da regionalização vitivinícola na produção de vinhos de qualidade. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE VITICULTURA E ENOLOGIA, 2001, Montevideo. **Actas**. Montevideo: Asociación de Enólogos del Uruguay, 2001. p. 1–9.
- TONIETTO, J.; CARBONNEAU, A. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, p. 81–97, 2004.
- TONIETTO, J.; SOTÉS RUIZ, V. y GÓMEZ-MIGUEL, V. D. (eds.). **Clima, zonificación y tipicidad del vino en regiones vitivinícolas iberoamericanas**. Madrid: CYTED, 2012. 1ra ed.
- VALENZUELA-SOLANO, C.; TONIETTO, J. El clima vitícola de regiones productoras de uvas para vinos en Baja California, México. In: TONIETTO, J.; SOTÉS RUIZ, V.; GÓMEZ-MIGUEL, V. D. (eds.). **Clima, zonificación y tipicidad del vino en regiones vitivinícolas iberoamericanas**. Madrid: CYTED, 2012. p. 287–297.
- VAN ROSSUM, G.; DRAKE, F. L. **Python 3 Reference Manual**. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009.
- VIRTANEN, P.; GOMMERS, R.; OLIPHANT, T. E.; HABERLAND, M.; REDDY, T.; COURNAPEAU, D.; BUROVSKI, E.; PETERSON, P.; WECKESSER, W.; BRIGHT, J.; VAN DER WALT, S. J.; BRETT, M.; WILSON, J.; MILLMAN, K. J.; MAYOROV, N.; NELSON, A. R. J.; JONES, E.; KERN, R.; LARSON, E.; CAREY, C. J.; POLAT, İ.; FENG, Y.; MOORE, E. W.; VANDERPLAS, J.; LAXALDE, D.; PERKTOLD, J.; CIMRMAN, R.; HENRIKSEN, I.; QUINTERO, E. A.; HARRIS, C. R.; ARCHIBALD, A. M.; RIBEIRO, A. H.; PEDREGOSA, F.; VAN MULBREGT, P. **SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python**. **Nature Methods**, v. 17, n. 3, p. 261–272, 2020. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2
- WESTWOOD, M. N. **Temperate-Zone Pomology: Physiology and Culture**. 3. ed. Portland: Timber Press, 1982.

#### CITACIÓN

HERNÁNDEZ, G.; RODRÍGUEZ, D. Caracterización Bioclimática de la Provincia de Buenos Aires (Argentina) para el cultivo de vid (*Vitis vinifera* L.). **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.33-34.e028131, 2026.



# Bioclimatic characterization of the Province of Buenos Aires (Argentina) for the cultivation of grapevines (*Vitis vinifera* L.)

Gabriela Hernández<sup>1(\*)</sup> and Damian Rodríguez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Núcleo de Estudio en Actividades Agropecuarias y Cambio Climático NAACCE, Facultad de Agronomía - UNCPBA. República de Italia 780, B7300 Azul, BA, Argentina. E-mails: [gabrielahernandez@azul.faa.unicen.edu.ar](mailto:gabrielahernandez@azul.faa.unicen.edu.ar) and [lrodriguez@azul.faa.unicen.edu.ar](mailto:lrodriguez@azul.faa.unicen.edu.ar)

(\*)Corresponding author.

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 20 October 2025

Accepted 2nd June 2026

### Index terms:

bioclimatic indices  
viticultural zoning  
multivariate analysis  
climatic classification  
agroclimatic suitability

## ABSTRACT

The objective of this study was to characterize the bioclimate of the province of Buenos Aires, Argentina, in order to evaluate its suitability for grapevine cultivation (*Vitis vinifera* L.). Daily data on temperature, precipitation, evapotranspiration, and hours of sunlight for the period 1981–2023 were used, obtained from 22 stations of the National Meteorological Service (SMN). Five key bioclimatic indices were calculated: the heliothermal index, the nighttime cold index, the drought index, the heliothermal product, and the length of the active period. In addition, the geoviticultural climate classification system (CCM) and principal component analysis were applied to evaluate viticultural zoning. The results show wide spatial variability in climatic conditions in the province and significant trends that could be associated with climate change. Areas with increasing potential for late-ripening grape varieties were identified, especially in the north and center of the province. Multivariate analysis allowed for the delimitation of ten viticultural regions with distinct bioclimatic characteristics. These findings provide useful information for viticultural planning and adaptation to climate change.

© 2026 SBAgro. Todos os direitos reservados.

## CITATION

HERNÁNDEZ, G.; RODRÍGUEZ, D. Caracterización Bioclimática de la Provincia de Buenos Aires (Argentina) para el cultivo de vid (*Vitis vinifera* L.). **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.33-34.e028131, 2026.