

Fortalezas y limitantes de BioΣTERM[®], un programa para calcular tiempo térmico

NICOLÁS BERTRAM^{1,✉}; MARIANO BAEZ²; CARLOS NAVARRO¹ & MARÍA B. CONDE¹

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), EEA Marcos Juárez. Córdoba, Argentina. ²It-Up S.R.L. empresa privada de soluciones tecnológicas.

RESUMEN. La temperatura es uno de los principales factores que determinan el crecimiento y el desarrollo de las plantas. Los modelos de simulación de crecimiento a partir de las temperaturas bases (T_b) y los requerimientos de acumulaciones térmicas para cada especie o cultivo son muy utilizados para modelar el comportamiento de los mismos en diferentes latitudes. Sin embargo, el calcular el tiempo térmico necesario para cumplir determinadas fases de crecimiento requiere como insumos las temperaturas medias diarias del período a calcular y la temperatura base de la especie, una información que suele ser difícil de conseguir. El programa BioΣTERM[®] fue pensado para facilitar la conversión de unidades de tiempo calendario a tiempo térmico y viceversa en toda la Argentina. Para ello, cuenta con dos bases de datos: una, de 50 años de temperaturas medias diarias de todo el país; y otra, de temperaturas bases de diferentes especies y cultivares. Ambas permiten transformar rápida y sencillamente los tiempos calendarios en térmicos para un amplio conjunto de especies, incluso para aquellas que no están incorporadas, pero para las que se conoce su T_b; también permite transformar un tiempo térmico conocido a tiempo calendario. El programa mostró ser muy preciso cuando se compararon datos reales vs. calculados para diferentes series temporales de temperaturas medias, y presentó un grado alto de ajuste cuando no se cuenta con datos reales. BioΣTERM[®] intenta ser una herramienta potente y, a la vez, brindar una solución simple para los investigadores que deseen transmitir conocimientos que en tiempo calendario son complejos de aplicar, y para los asesores y productores que quieran usar dicho conocimiento de una manera más amigable.

[Palabras clave: crecimiento, temperaturas medias, temperatura base, modelar]

ABSTRACT. Strengths and limitations of BioΣTERM[®], a thermal time calculator program. Temperature is one of the main determinants of plant growth. Growth simulation models based on base temperatures and thermal accumulation requirements for each species or crop are widely used to model their behavior at different latitudes. But the calculation of the thermal time necessary to complete certain growth phases requires as input the average daily temperatures of the period to be calculated and the base temperature (T_b) of the species, information that is sometimes difficult to obtain. The BioΣTERM[®] program was designed with the objective of facilitating and simplifying the conversion of units from calendar time to thermal time and vice versa in Argentina. For this, it has two databases, one with average daily temperatures for the entire country for 50 years and another with base temperatures of different species and cultivars. Both databases allow quick and simple calculation, transforming calendar times in thermals for a wide set of species, and even for those that are not incorporated into it and the user knows their T_b, or transform a known thermal time into a calendar. The program proved to be very accurate, when real vs. calculated data were compared, for different time series of average temperatures, showing a high degree of adjustment when real data are not available. The BioΣTERM[®] program tries to be a powerful tool and at the same time provide a simple solution both for researchers who wish to transmit or disseminate knowledge that is very difficult to apply in calendar time, as well as for advisors and producers who want to use said knowledge in a more friendly way.

[Keywords: growth, mean temperatures, base temperature, modeling]

INTRODUCCIÓN

Los procesos biológicos están influenciados en mayor o menor medida por factores abióticos, entre los que se destaca la temperatura (Żróbek-Sokolnik 2012; Hatfield and Prueger 2015). La temperatura es una de las principales fuerzas impulsoras del crecimiento y desarrollo de los cultivos, e incide en la duración de cada período fenológico (Christian 1977; Fick et al. 1988; Porter and Delecolle 1988; Sadras et al. 2002). Así, por ejemplo, para describir el crecimiento de las plantas y la acumulación de biomasa, el tiempo calendario no resulta demasiado explicativo, ya que estos fenómenos se asocian mejor con la temperatura.

Las plantas presentan temperaturas que modelan su crecimiento; conocerlas puede ayudar a comprender mejor su funcionamiento. Estas temperaturas se denominan base (T_b), óptima (T_o) y máxima (T_m). Las tres afectan la velocidad del crecimiento vegetal, presentando en la primera y última tasas de desarrollo cercanas a cero (Ritchie and Nesmith 1991), mientras que entre los valores de T_b y T_o se suele hallar un incremento lineal de la tasa de desarrollo (Blacklow 1972; Vincent 1989; Addae and Pearson 1992; Hatfield and Prueger 2015).

Una de las formas de utilizar la temperatura para explicar el crecimiento de las plantas es a partir de la acumulación de temperatura media diaria por encima de una T_b , lo cual se conoce como tiempo térmico (T_t), grados día de crecimiento o desarrollo (GDC) o grados día de crecimiento acumulado (GDA), y se define como la cantidad de grados día necesarios para finalizar un determinado proceso de desarrollo o fase fenológica (Arnold and Monteith 1974; Monteith 1977). Cada planta tiene una T_b por encima de la cual crece, como también pueden presentar requisitos específicos de temperaturas para que ciertos estados fenológicos se alcancen.

Hay varios métodos para calcular T_t , GDC o GDA, pero el más común es la sumatoria de las diferencias entre la temperatura media diaria (T_{med}) y la T_b , con la temperatura media calculada como la media de las temperaturas mínimas y máximas diarias (Ritchie and Nesmith 1991). El método de T_t , GDC o GDA es más apropiado para describir el desarrollo, ya que es independiente del ambiente o del año. Un requisito básico para este enfoque es la determinación de la temperatura T_b por debajo de la cual el desarrollo fenológico

cesa o las plantas detienen sus procesos metabólicos. El modelo de cálculo para T_t se representa como:

$$\text{Tiempo térmico } (T_t) = \sum(T_{med} - T_b) \quad \text{Ecuación 1}$$

Por ejemplo, si el cultivo de alfalfa tiene una temperatura base de 0 °C y debe alcanzar 500 °Cd para terminar su ciclo de crecimiento y ser cortada o pastoreada, y la temperatura media diaria es 20 °C, en 25 días alcanzaría dicha acumulación térmica. Por el contrario, si la temperatura media diaria fuese 10 °C (por estar en una mayor latitud o en otro momento del año), el tiempo en alcanzar ese T_t sería 50 días.

El T_t es una herramienta que brinda la posibilidad de comparar estudios realizados en un sitio y en un momento específico con mayor precisión de lo que puede hacerlo el tiempo calendario. En este sentido, el programa BioΣTERM® fue pensado para facilitar la conversión de unidades de tiempo calendario a tiempo térmico y viceversa en un amplio rango de latitudes dentro del país, sin necesidad de contar con las temperaturas medias diarias del período a calcular, y poder realizar cálculos a futuro. Fue desarrollado por investigadores de INTA y hospedado en un sitio web perteneciente a la UNRC; combina una gran base de datos de temperaturas medias diarias históricas que abarca todos los puntos del país, sumado a una base de datos de T_b de diferentes especies vegetales validadas en trabajos y publicaciones científicas, que posibilitan hacer una transformación rápida y sencilla del tiempo calendario a tiempo térmico y viceversa.

El objetivo de este trabajo es cuantificar el ajuste de los tiempos térmicos calculados por el programa en comparación con los tiempos térmicos reales, con la finalidad de determinar la precisión de la herramienta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Base de datos de temperaturas medias diarias

En el caso de la información asociada a la de temperatura media diaria, se utilizó una base de datos de 50 años de información de temperaturas medias de puntos geográficos cada 45 km de datos observados y simulados de la República Argentina (3cn.cima.fcen.uba.ar). La base de datos está distribuida en 1130 archivos Excel® que

referencian a los puntos geográficos con sus respectivas coordenadas. Cada punto dispone de registros diarios de temperaturas de 1961 a 2010, con un total de 18262 registros. Estos registros se promediaron y se obtuvieron 365 valores finales por cada uno de los puntos geográficos. Para procesar esta base de datos, se desarrolló una herramienta que tomó los 20807100 registros, que al ser promediados generaron 412450 registros finales de todo el territorio argentino.

Base de datos de temperaturas base por especie

La información asociada a la Tb cuenta con información de más de 100 especies vegetales diferentes y más de 200 datos de Tb, validadas en trabajos y publicaciones científicas. En el caso de no contar con la Tb de la especie de interés o no coincidir con las Tb dadas por los autores, existe la posibilidad de cambiar por la Tb deseada por el usuario. Además, esta base de datos puede seguir creciendo con más trabajos científicos que se publiquen validando Tb para las especies que ya están cargadas, así como para nuevas especies o cultivares.

Validación

Para validar el programa se realizó una comparación entre los valores de temperaturas medias diarias observados y los esperados a partir del programa, para cuantificar y analizar las diferencias entre ellos. En la búsqueda de cubrir diferentes latitudes y fechas (espacio y tiempo) e intentando aleatorizar los datos reales utilizados para la comparación, se seleccionaron 22 estaciones meteorológicas de INTA (Anguil, Balcarce, Bariloche, Concepción del Uruguay, El Colorado, General Roca, La Rioja, Las Breñas, Manfredi, Marcos Juárez, Mendoza, Mercedes, Paraná, Pergamino, Rafaela, Rama Caída, Rawson, Reconquista, Salta, San Luis, Santiago del Estero y Viedma) (Figura 1). La medición se realizó en cada localidad en un mes y un año determinado con una $T_b=0$. De esta manera se determinó el tiempo térmico acumulado, para luego realizar la comparación con el programa Bio Σ TERM[®]. En dichos sitios se compararon situaciones reales vs. calculadas del 2000 al 2010 (para enero y julio de 2000, marzo y agosto de 2003, abril y septiembre de 2006, y mayo y octubre de 2009), períodos que se encuentran dentro de la base de datos utilizados para el Bio Σ TERM[®], desconociendo si los datos de la estaciones meteorológicas seleccionadas están dentro de la base de

datos, como también de los años 2012 al 2022, período posterior a la base de datos utilizada (para los meses de noviembre de 2012, julio de 2013, enero de 2014, marzo de 2015, mayo de 2016, diciembre de 2017, abril de 2018, agosto de 2019, septiembre de 2020, junio de 2021 y octubre de 2022), a excepción de aquellos casos en que la estación meteorológica no contara con algún mes de algún año en particular.

Análisis estadístico

Para comprobar el ajuste del modelo se realizó un conjunto de análisis estadísticos que incluyeron el R^2 ajustado, el RMSE (root mean square error), el NRMSE (normalized root mean squared error), el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) y el índice de Willmott (d). El R^2 ajustado es una medida estadística que se utiliza para evaluar el ajuste de un modelo de regresión lineal. Es una versión modificada del R cuadrado (R^2) que tiene en cuenta el número de variables independientes en el modelo. Cuanto el R^2 ajustado es más cercano a 1, mejor es el ajuste del modelo. El RMSE es una medida estadística utilizada para evaluar la precisión de un modelo de predicción o estimación en relación a los datos reales. Se calcula como la raíz cuadrada de la media de los errores al cuadrado entre las predicciones del modelo y los valores reales de los datos. Dicho valor es relativo a los datos analizados; por ello, cuanto menor sea dicho valor con relación a los analizados, mejor es el ajuste del modelo. El NRMSE es una medida estadística que se usa para evaluar la precisión de un modelo de predicción o estimación, y se calcula como el RMSE dividido por el rango de los datos. El NRMSE es útil para comparar la precisión de diferentes modelos o diferentes conjuntos de datos, ya que normaliza la medida del error en función del rango de los datos. Por lo tanto, es una medida adimensional que permite comparar modelos o conjuntos de datos con diferentes unidades y escalas. Cuando el NRMSE es menor a un 10%, el ajuste del modelo es considerado excelente. El NSE es una medida estadística utilizada para evaluar la calidad del ajuste de un modelo de simulación o predicción. El NSE es una medida de la proporción de la varianza total de los datos que es explicada por el modelo. Cuanto más cercano a 1, mejor es el ajuste del modelo. El índice de Willmott (d) es una medida estadística utilizada para evaluar la calidad del ajuste de un modelo de simulación o predicción a los datos observados. El índice

de Willmott se calcula como 1 menos la razón entre la suma de los errores cuadráticos del modelo y la suma de los errores cuadráticos de un modelo de referencia. Cuando el índice de Willmott da valores cercanos a 1, mejor es el ajuste del modelo.

RESULTADOS

Como se mencionó, una de las bases de datos que el programa utiliza para el cálculo del tiempo térmico contiene temperaturas medias diarias de más de 50 años integrando datos del todo el país. Uno de los factores que pueden hacer que el programa no sea funcional, es que el valor calculado diste mucho de las temperaturas reales y ello lleve



Figura 1. Localidades donde se realizaron las comparaciones de datos reales de las estaciones meteorológicas vs. los calculados a partir del programa BioΣTERM® para los periodos 2000-2010 y 2012-2022.

Figure 1. Locations where the comparisons of real data from the meteorological stations were made vs. those calculated from the BioΣTERM® program for the period 2000-2010 and for 2012-2022.

a una mala estimación de los tiempos térmicos necesarios para que una especie cumpla una fase determinada de su ciclo de vida.

Para determinar la precisión del programa, se realizó una comparación con dos conjuntos de datos aleatorios reales vs. los calculados por BioΣTERM®. Un conjunto de datos reales abarcó desde el 2000 a 2010, y el otro fue del 2012 al 2022. Para ambos periodos se compararon el tiempo térmico acumulado en un mes y año determinado de 22 sitios ubicados en diferentes latitudes (Figura 1). Se pudo observar que ambos conjuntos de datos reales (2000-2010 y 2012-2022) presentaron un muy buen ajuste respecto del promedio de la base de datos utilizada en el programa, con valores de pendientes y R² muy cercados a 1 (Tabla 1), no presentando diferencias significativas entre ellos (Figura 2). El análisis de RMSE también arrojó valores bajos, de forma similar el NRMSE presentó valores inferiores a un 10%; ambos análisis describen un buen ajuste (Tabla 1). De igual forma, los análisis de NSE y el índice de Willmott

Tabla 1. Análisis estadístico de R² ajustado, el RMSE, el NRMSE, el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) y el índice de Willmott (d) para dos conjuntos de datos (2000-2010 y 2012-2022).

Table 1. Statistical analysis of adjusted R², RMSE, NRMSE, Nash-Sutcliffe efficiency ratio (NSE) and Willmott index (d) for two sets of data (2000-2010 and 2012-2022).

	Datos 2000-2010	Datos 2012-2022
R ² Aj	0.965	0.966
RMSE	34.48	38.79
NRMSE	0.067	0.076
Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE)	0.964	0.959
Índice de Willmott (d)	0.991	0.989

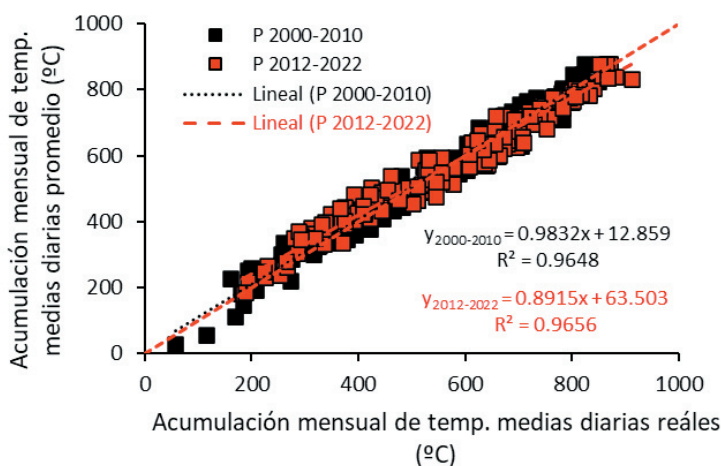


Figura 2. Acumulación de temperaturas medias diarias mensuales calculadas con el programa BioΣTERM®, en función de la acumulación de temperaturas medias diarias mensuales reales para dos conjuntos de datos (periodo 2000 a 2010 y ' periodo 2012 a 2022).

Figure 2. Accumulation of average daily monthly temperatures calculated with the BioΣTERM® program, based on the accumulation of average daily monthly temperatures for two data sets (period 2000 to 2010 and □ period 2012 to 2022).

presentaron valores cercanos a 1 para ambos períodos de evaluación, lo cual muestra un excelente ajuste del modelo.

Además, dentro de cada período se compararon meses y años aleatorizados para las 22 localidades, con la finalidad de analizar si el programa modificaba su grado de ajuste en algún mes o año determinado, encontrando ajustes muy buenos entre los datos reales y los calculados (Figuras 3 y 4). Se pudo observar que el programa tiene una muy buena predicción del tiempo térmico real, tanto para situaciones que incluyan temperaturas que pudiesen estar dentro de la base de datos del programa (2000-2010), como para aquellas que no están incluidas (2012-2022), para un amplio rango de latitudes del país, si se tiene en cuenta el análisis de un mes y año determinado para una serie de 10 años.

DISCUSIÓN

El ajuste de las fases de desarrollo de una planta o cultivo pueden asociarse con bastante exactitud al tiempo térmico. Sin embargo, este índice puede tener algunas imprecisiones relacionadas principalmente con a) otros factores ambientales que estén limitando el crecimiento y desarrollo; b) con la forma de medir la temperatura, o c) con las simplificaciones en la determinación de temperaturas bases para las diferentes especies o cultivares (Figura 5).

Otros factores ambientales limitantes

Si bien, la temperatura es una de las principales fuerzas impulsoras del crecimiento de las plantas, no es la única, por lo cual, en algunos momentos o situaciones, otros

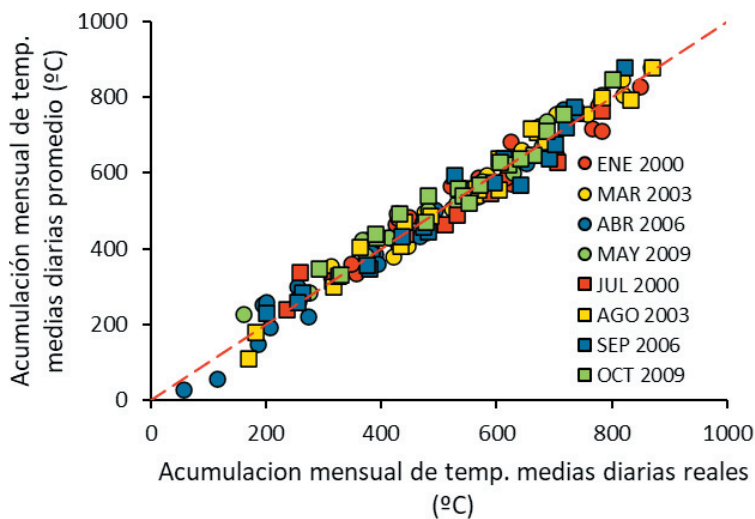


Figura 3. Acumulación de temperaturas medias diarias mensuales calculadas con el programa BioTERM®, en función de la acumulación de temperaturas medias diarias mensuales reales para diferentes meses del período 2000 a 2010 (enero y julio 2000; marzo y agosto 2003; abril y septiembre de 2006, y mayo y octubre de 2009).

Figure 3. Accumulation of average daily monthly temperatures calculated with the BioTERM® program, based on the accumulation of average daily monthly temperatures for different months of the period 2000 to 2010 (January and July 2000; March and August 2003; April and September 2006, and May and October 2009).

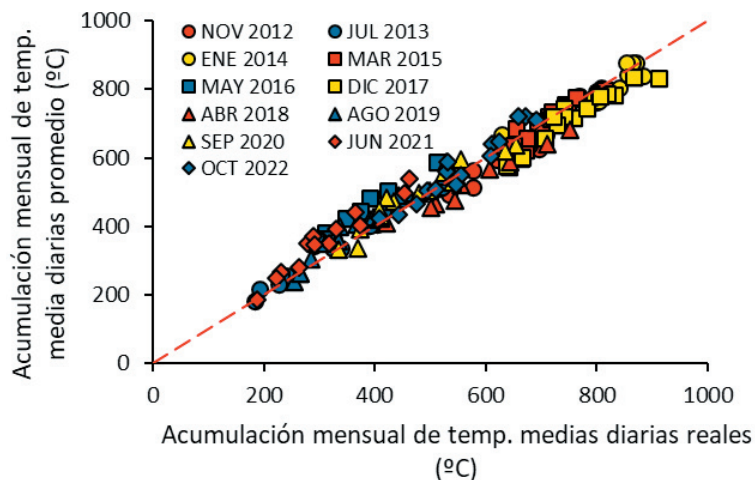


Figura 4. Acumulación de temperaturas medias diarias mensuales calculadas con el programa BioTERM®, en función de la acumulación de temperaturas medias diarias mensuales reales para diferentes meses del período 2012 a 2022 (noviembre 2012, julio 2013, enero 2014, marzo 2015, mayo 2016, diciembre 2017, abril 2018, agosto 2019, septiembre 2020, junio 2021 y octubre 2022).

Figure 4. Accumulation of average daily monthly temperatures calculated with the BioTERM® program, based on the accumulation of average daily monthly temperatures for different months from 2012 to 2022 (November 2012, July 2013, January 2014, March 2015, May 2016, December 2017, April 2018, August 2019, September 2020, June 2021 and October 2022).

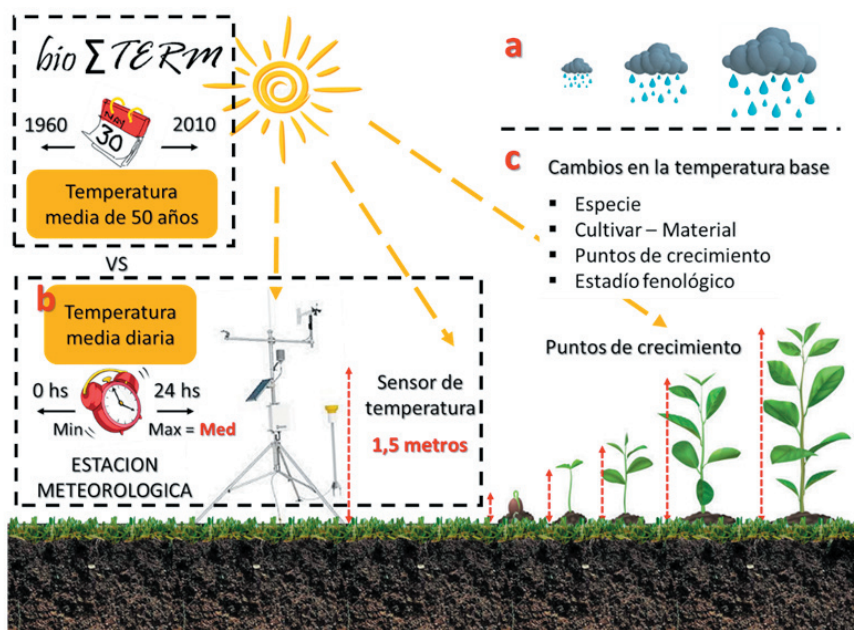


Figura 5. Limitantes de la forma de calcular el tiempo térmico (a: ambientales; b: en la medición de temperaturas medias diarias; c: en la determinación de la temperatura base) y el aporte del programa BioΣTERM®.

Figure 5. Limitations of the way of calculating the thermal time (a: environmental; b: in the measurement of average daily temperatures; c: in the determination of the base temperature) and the contribution of the BioΣTERM® program.

factores determinantes del crecimiento pueden ser limitantes (e.g., el agua o el fotoperíodo) (Kiniry et al. 1983; Warrington and Kanemasu 1983; Raper and Kramer 1987; Porter and Delecolle 1988; Connor and Sadras 1992; Grimm et al. 1994; Andrade et al. 1996; Sadras et al. 2002; Miralles et al. 2003). De esta manera, es probable que frente a períodos de sequía prolongada o inundación, entre otras situaciones, el tiempo térmico pierda precisión con respecto de aquellos períodos en los que no existen limitantes para el crecimiento de las plantas.

Medición de la temperatura

Dentro de las limitantes que se pueden hallar en las mediciones de temperatura están las asociadas a cómo y dónde se mide la temperatura y dónde está censando la planta. Otro de los factores que pueden disociar el comportamiento de las plantas en situaciones reales respecto de las calculadas a partir del tiempo térmico, es el cálculo de las temperaturas medias diarias. Por lo general, estas se calculan a partir de la suma de la máxima y la mínima diaria dividido dos, estando estas temperaturas muchas veces por debajo de la mínima y por encima de la máxima temperatura de crecimiento (períodos de inactividad para la planta). Esto llevaría a sobreestimar el tiempo de crecimiento de las plantas a lo largo del día. Además, los valores de temperaturas medias diarias por lo general se toman en estaciones meteorológicas

en donde los termómetros están colocados a una altura aproximada de 1.5 m. Siendo la temperatura una variable que se modifica con la altura y la cobertura del suelo, este dato no siempre coincide con la temperatura dada a la altura de los puntos de crecimiento de las plantas.

Determinación de la T_b

Por parte de los cultivos, muchas veces se generaliza una temperatura base para el crecimiento de una especie, pudiendo esta modificarse entre cultivares o materiales dentro de la especie, así como durante etapas fenológicas de la planta, lo cual llevaría a afectar la situación calculada, respecto de la real. Más allá de todas las limitantes mencionadas en el cálculo de tiempo térmico, es importante aclarar que este índice sigue siendo una herramienta que describe mejor que el tiempo calendario el crecimiento y el desarrollo de las plantas (Christian 1977; Fick et al. 1988; Porter and Delecolle 1988; Sadras et al. 2002) y que permite extrapolar información generada en un sitio específico a diferentes latitudes, o entre años manteniendo su verosimilitud.

La temperatura es uno de los reguladores principales del desarrollo de las plantas y determina la duración de los períodos fenológicos. Con este conocimiento y con el uso del tiempo térmico se puede ubicar las fases fenológicas en escenarios ambientales de

menor riesgo de estrés y planificar estrategias para alcanzar rendimientos mayores y más estables (Sadras et al. 2002).

Por otro lado, y teniendo en cuenta las limitantes mencionadas anteriormente (Figura 2), el programa Bio Σ TERM[®] facilitaría la búsqueda de los datos de temperatura (b), sumado a tener una alta precisión respecto de los datos observados vs. los esperados o calculados (Tabla 1), y aportaría información de la Tb (c), el que puede seguir fortaleciéndose a partir de la mejora continua de la base de datos de Tb. Sin embargo, por el momento, no puede corregir las inexactitudes asociadas a cambios ambientales, por ejemplo, a partir de sequías e inundaciones (a) o aquellas asociadas a la distancia en donde se toma el dato de Tmed y la altura de los puntos de crecimientos de las plantas.

A partir de lo analizado en las Figuras 2, 3 y 4 se puede observar que el programa Bio Σ TERM[®] presenta una alta correlación, tanto con conjuntos de datos que temporalmente podrían estar dentro de la base de datos utilizada para su confección (Figuras 2 y 3) como con conjuntos de datos que temporalmente están fuera del período que se utilizó para realizar el programa (Figura 2 y 4).

Si se considera al tiempo térmico como una herramienta potente y de gran utilidad a la hora de realizar cálculos para determinar fases fenológicas de diferentes cultivos, y poder hacerlo en años diferentes o en distintas latitudes, extrapolar información y conocimiento, Bio Σ TERM[®] resulta una herramienta sencilla y eficaz para realizar dichos cálculos y conversiones. El programa también puede utilizarse para determinar manejos agroecológicos a futuro, utilizando

información bibliográfica de la duración de etapas fenológicas en Tt para transformarlo en tiempo calendario, o a partir de conocimiento pretérito de duraciones de etapas en tiempo calendario para diferentes especies realizar conversiones a Tt con la finalidad de entender e interpretar manejos ya realizados o comportamiento de cultivares o variedades.

CONCLUSIONES

El programa Bio Σ TERM[®] permite hacer un cálculo rápido y sencillo, transformando tiempos calendarios en térmicos para un amplio conjunto de especies, incluso para aquellas que no están aún incorporadas y de las cuales se conozca su Tb, o también para transformar un tiempo térmico conocido a tiempo calendario. El programa mostró no perder precisión en dicho cálculo, sobre todo debido a su robusta base de datos de temperaturas medias diarias, como también a la base de datos de Tb de diferentes especies y cultivares generada a partir de estudios científicos citados. De esta manera, el programa intenta ser una herramienta potente y brindar una solución sencilla tanto para investigadores que deseen transmitir o divulgar conocimientos que en tiempo calendario resultan muy difíciles de aplicar, como para asesores y productores que quieran utilizar dicho conocimiento de una manera más amigable.

AGRADECIMIENTOS. A la UNRC y a la Cátedra de Forrajes por prestar su página web para hospedar el programa y a la empresa It-Up por el acompañamiento en el desarrollo del Bio Σ TERM[®], sin el apoyo de todos ellos tanto la generación del programa como su disponibilidad para los usuarios hubiese sido imposible.

REFERENCIAS

- Addae, P. C., and C. J. Pearson. 1992. Thermal requirement for germination and seedling growth of wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* 43(3):585-594. <https://doi.org/10.1071/ar9920585>.
- Andrade, F. H., A. G. Cirilo, S. A. Uhart, and M. E. Otegui. 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. Dekalb Press. Pp. 292.
- Arnold, S. M., and J. L. Monteith. 1974. Plant development and mean temperature in a Teesdale habitat. *The Journal of Ecology* 62(3):711-720. <https://doi.org/10.2307/2258951>.
- Blacklow, W. M. 1972. Influence of Temperature on Germination and Elongation of the Radicle and Shoot of Corn (*Zea mays* L.). *Crop Science* 12(5):647-650. <https://doi.org/10.2135/cropsci1972.0011183x001200050028x>.
- Christian, K. R. 1977. Effects of the environment of the growth of alfalfa. *Advances in Agronomy* 29:183-227. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60219-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60219-9).
- Connor, D. J., and V. O. Sadras. 1992. Physiology of yield expression in sunflower. *Field Crops Research* 30(3-4):333-389. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90006-u](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90006-u).
- Hatfield, J. L., and J. H. Prueger. 2015. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and climate extremes* 10:4-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>.
- Fick, G. W., D. A. Holt, and D. G. Lugg. 1988. Environmental physiology and crop growth. Pp. 163-194 *en* A. A. Hanson,

- D. K. Barnes and R. R. Hill Jr. (eds.). *Alfalfa and Alfalfa Improvement*. Agronomy Monograph 29. American Society of Agronomy, Madison, EUA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr29.c5>.
- Grimm, S. S., J. W. Jones, K. J. Boote, and D. C. Herzog. 1994. Modeling the occurrence of reproductive stages after flowering for four soybean cultivars. *Agronomy Journal* 86(1):31-38. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600010007x>.
- Kiniry, J. R., J. T. Ritchie, R. L. Musser, E. P. Flint, and W. C. Iwig. 1983. The photoperiod sensitive interval in maize 1. *Agronomy Journal* 75(4):687-690. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500040026x>.
- Miralles, D. J., L. B. Windauer, and N. V. Gómez. 2003. Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de granos (Capítulo 5). Pp. 61-74 *en* E. H. Satorre, R. L. A. Benech, G. A. Slafer, E. B. De la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui and R. Savin (eds.). *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo*. Facultad de Agronomía, UBA.
- Monteith, J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 281(980):277-294. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>.
- Porter, J. R., and R. Delecolle. 1988. Interaction of temperature with other environmental factors in controlling the development of plants. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 42:133-156.
- Raper Jr., D. C., and P. J. Kramer. 1987. Stress physiology. Pp. 590-605 *en* J. R. Wilcox (ed.). *Soybeans: improvement production and uses*. Agronomy Series 16.
- Ritchie, J. T., and D. S. Nesmith. 1991. Temperature and crop development. *Modeling Plant and Soil Systems* 31:5-29. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr31.c2>.
- Sadras, V. O., M. Ferreiro, F. Gutheim, and A. G. Kantolic. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo (Capítulo 2). *En* F. H. Andrade and V. O. Sadras (eds.). *Bases Para el Manejo del Maíz, el Girasol y la Soja*. Estación Experimental Agropecuaria, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Balcarce - Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata Buenos Aires, Argentina.
- Vincent, C. D. 1989. Recent advances in modelling crop response to temperature. *Outlook on Agriculture* 18(2):54-57. <https://doi.org/10.1177/003072708901800202>.
- Warrington, I. J., and E. T. Kanemasu. 1983. Corn growth response to temperature and photoperiod I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. *Agronomy Journal* 75(5):749-754. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500050008x>.
- Żróbek-Sokolnik, A. 2012. Temperature Stress and Responses of Plants. Pp. 113-134 *en* P. Ahmad and M. Prasad (eds.). *Environmental Adaptations and Stress Tolerance of Plants in the Era of Climate Change*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0815-4_5.