

Artículo original

Evaluación fenológica de *Ilex paraguariensis* como base para un modelo predictivo de hoja verde

Andrés Gustavo-Batalla^{1*} 

Maria Raquel Rybak² 

Laura Giménez³ 

¹Escuela de Formación Profesional, Posadas 460, Curuzú Cuatiá, Corrientes, Argentina. CP 3460

²Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Departamento Ecofisiología Vegetal, Ruta Nacional 14, km 1026, Misiones Argentina. CP 3313

³Facultad de Ciencias Agrarias, UNNE, Sargento Cabral 2131, Corrientes, Argentina. CP: 3400

*Autor para correspondencia: andres-bata@hotmail.com

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue describir la fenología vegetativa de la yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) y la correlación con las variables ambientales: precipitación, humedad relativa, radiación PAR, agua gravimétrica, fotoperíodo, temperaturas media, mínima y máxima. El trabajo se llevó a cabo en un huerto comercial ubicado en Gobernador Virasoro, Corrientes, Argentina (28° 02,48" S y 56° 00' 34" W, elevación 151 msnm). Se calcularon los requerimientos térmicos (grados días) y la relación entre una fenofase y cada variable ambiental individual mediante el coeficiente de correlación de Spearman (rs). A partir del año 2015 y durante 36 meses consecutivos fueron identificadas cinco fases vegetativas, yema hinchada, hojas incipientes, hojas pegadas por el ápice, hojas desplegadas y hojas maduras. Se corrobora la presencia de diferentes ritmos de brotación, con diferentes intensidades en primavera, verano y otoño. Los resultados concluyen que los tiempos térmicos varían de acuerdo a los ritmos presentados y etapas de desarrollo del cultivo.

Palabras clave: etapas de desarrollo, grados días, clima

Recibido: 23/08/2020

Aceptado: 20/08/2021

INTRODUCCIÓN

La planta yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil) pertenece a la familia Aquifoliaceae. Es representada, aproximadamente, por 660 especies la mayoría del género *Ilex*, reconociéndose en América del Sur alrededor de 60 especies. Posee hojas coriáceas, simples y alternas, de tronco recto y corteza lisa. Sus raíces son axonomorfas, con raíces secundarias que se localizan en los primeros centímetros del suelo y permiten la absorción de nutrientes ⁽¹⁾.

Con las hojas y tallos finos de yerba mate, se prepara una bebida estimulante conocida como mate, chimarrao o terere. La ingesta de esta tiene importantes propiedades biológicas, como la actividad antioxidante, los efectos protectores contra el daño al ADN y la vasodilatación ⁽²⁾. En la actualidad, de acuerdo al Instituto Nacional de la Yerba Mate ⁽³⁾, existen más de 174 820 ha⁻¹ cultivadas en la Argentina, distribuidas en la provincia de Misiones y norte de Corrientes. Es considerado un cultivo de interés cultural y económico para miles de familias que viven de su producción, además es cultivada en Brasil, Paraguay y Uruguay.

Dado que el producto final del cultivo es la consecuencia de un proceso derivado de las intervenciones agrícolas realizadas durante todo el ciclo, para los investigadores y productores es necesario el conocimiento de la fenología agrícola y la duración de las diferentes etapas fenológicas. A pesar de ello, la investigación en este campo y para esta especie es escasa. Conocer los cambios visibles que se suceden a lo largo del ciclo de una especie vegetal, considerando el efecto de los factores meteorológicos, permitiría a los agricultores un manejo eficiente de las labores culturales del cultivo. La fenofase es definida como un evento distinto en el ciclo de vida anual de una planta o animal en relación con los cambios en las estaciones y el clima ⁽⁴⁾.

Del comportamiento de la planta en relación a factores ambientales surge la necesidad de evaluar la fenología de la planta de yerba mate como base para un modelo predictivo de hoja verde. Por tal motivo, el objetivo de este trabajo fue describir la fenología vegetativa de *Ilex paraguariensis* St. Hill. y correlacionar las variables ambientales, temperatura, humedad relativa, fotoperíodo, radiación PAR, precipitación y agua gravimétrica, con las fenofases vegetativas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las evaluaciones se realizaron en un lote comercial situado en la localidad de Gobernador Virasoro, (28° 02,48" S y 56° 00'34" W, elevación 151 m s.n.m.), Corrientes, Argentina. Estos suelos presentan buenas condiciones físicas para la penetración de raíces y el agua; el horizonte superficial presenta altos contenidos de materia orgánica. Son medianamente fértiles, con baja capacidad de intercambio catiónico, por el tipo de arcillas de baja actividad (caolinitas), aunque con buena capacidad de retención de humedad. Los suelos más fértiles para el cultivo están representados por Alfisoles y Ultisoles, con pendientes menores al 5 % con buena fertilidad y bajos tenores de Aluminio ⁽⁵⁾. El clima de la región,

en el sistema de clasificación de Köppen, es considerado subtropical húmedo (Cf w'a), que expresa un clima mesotermal, cálido templado, sin estación seca, con lluvias distribuidas regularmente durante el año y temperaturas medias anuales de 25°C. Las precipitaciones son abundantes con un promedio anual de 1923 mm en los últimos diez años. Los meses de mayor y menor precipitación son los de abril y octubre y los de julio y agosto, respectivamente.

Las precipitaciones se midieron con un recolector de lluvia tipo Balancín y el fotoperíodo se calculó mediante tablas (Heliofanía teórica astronómica). Para la obtención de los datos micrometeorológicos se utilizó un datalogger, de ocho canales, ubicado en el sitio de estudio, con sensores de temperatura, radiación PAR y humedad relativa, en dos estratos de la copa, por encima de la canopia y en el estrato medio. Se obtuvieron los promedios para cada quincena ⁽⁶⁾ y mes evaluado (Tabla 1). Se tomaron muestras de suelo de los primeros 30 cm semanalmente, para determinar el agua gravimétrica, se sometió a una temperatura de 105 °C, hasta masa constante, expresada como porcentaje de agua por masa de suelo seco.

Observaciones: con el fin de caracterizar las fases fenológicas de la especie se utilizó una adaptación de la escala semicuantitativa de Fournier 1974, la cual establece observar cinco a diez individuos para plantas en estado silvestre. Considerando que son plantas cultivadas se tomaron 20 plantas para el estudio. Dicha escala establece arbitrariamente cuatro intervalos (0-4) de intensidad de 25 %, donde 0= ausencia de la fenofase, 1=25 %, 2=50 %; 3=75 % y 4 = más del 75 % de la copa.

La duración de cada fenofase se expresó mediante grados día de crecimiento acumulados (GDC), para lo cual se considera una temperatura base de 5 °C ⁽⁷⁾. Dentro de un cuadro homogéneo, en cuanto a procedencia, edad (cuatro años) y estado general de la planta (corte de rama madura); tipo y ubicación de suelo y manejo del cultivo, se establecieron cuatro bloques experimentales. En cada bloque cinco plantas adultas distanciadas a 1 x 2,5 m fueron seleccionadas al azar para realizar las observaciones fenológicas. Las evaluaciones se realizaron desde septiembre del año 2015 hasta julio del año 2018, cada dos semanas en los ritmos de brotación y mensualmente durante las pausas de crecimiento. Considerándose año 1, la campaña 2015-2016 (septiembre-julio), año 2, 2016-2017 (agosto-julio) y año 3, 2017-2018 (agosto-julio). Para la diferenciación de los diferentes ritmos de brotación que se sucedieron a lo largo del período evaluado, se realizaron observaciones del largo de entrenudo.

Debido a la falta de antecedentes en estudios de fenología en yerba mate y considerando que los ciclos fenológicos de las plantas tropicales son complejos, durante los primeros meses se realizó la calibración del método fenológico. Esta metodología permitió familiarizarse con el comportamiento de la planta para identificar las diferentes fases fenológicas. Las plantas se cosecharon en el mes de agosto de cada año evaluado, según el plan anual de cosecha, corte mesa. Este tipo de cosecha consistió en cortar las ramas de 3 cm de diámetro, a una misma altura, 10 cm por encima del corte anterior, dejando las ramas

jóvenes (banderillas) sin cortar y otras cortadas en el ápice unos 10 centímetros por encima de la bifurcación.

Estados fenológicos: la escala fenológica de evaluación que se utilizó se basó en la observación macroscópica de la morfología externa de la planta. Se estudiaron cinco eventos fenológicos (fenofases) vegetativos desde inicio de brotación hasta cosecha. Las fenofases vegetativas estudiadas fueron diferenciadas en los ritmos de brotación presentados a lo largo del año. Para cada una de los estadios de desarrollo se utilizaron características externas claramente reconocibles.

Fenofases vegetativas: hinchazón de yemas (V1): se establecieron en cada ritmo de brotación el estado fenológico V1, considerado como hinchazón de yemas. Hojas incipientes (V2): tamaño incipiente, de 1,5 a 2 cm de longitud, de las primeras hojas en desarrollarse, después de hinchazón de yemas y antes de que se plieguen. Hojas pegadas por el ápice. (V3): considera el comportamiento que presentan las hojas cercanas al ápice, las cuales permanecen pegadas. Hojas desplegadas totalmente (V4): esta etapa permitió destacar una etapa previa a la maduración. Hojas maduras (V5): esta fase da comienzo a la etapa de maduración de la planta y fin de un ritmo de brotación. Las hojas comienzan a tornarse de un color verde oscuro.

Análisis estadístico: la relación entre una fenofase y cada variable ambiental individual, se analizó utilizando el coeficiente de correlación de Spearman (r_s), utilizando el software estadístico InfoStat⁽⁸⁾. Las variables evaluadas, radiación PAR, humedad relativa, temperaturas medias, mínima y máximas, fueron calculadas como una media de los sensores ubicados en el cultivo, por encima y por debajo de la canopia. Fueron correlacionadas las variables ambientales con las fenológicas a lo largo del periodo de estudio (36 meses). Para analizar la frecuencia relativa mensual de la especie en cada fenofase se utilizó el test de Rayleigh (Z) para distribución circular y se graficaron los resultados mediante histogramas de frecuencia circulares⁽⁹⁾. Para realizar dichos gráficos se utilizó el software ORIANA 3⁽¹⁰⁾, en el cual los meses fueron convertidos en ángulos, con intervalos de 15° para cada observación (0° primera quincena de agosto, 15° segunda quincena de agosto, 345° segunda quincena de diciembre). Las flechas representan ángulos promedio significativos (Rayleigh test $p < 0,001$), mientras que la longitud del vector r (0-1), indica la concentración alrededor del ángulo medio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de precipitación acumulados para el año 1, 2 y 3 mostraron grandes diferencias, 1606,4 mm, 2324 mm y 2147 mm, respectivamente. Mediante la serie de tiempo evaluada, se puede observar que se registraron valores de precipitación diferentes a otros años, febrero 2016 (12 mm), abril y mayo (509 mm, 479 mm), abril 2018 (31 mm). La humedad relativa evaluada en las plantaciones de yerba mate, mostró una variación anual. Probablemente el sistema de manejo que lleva la empresa,

principalmente poda y cosecha, modifique en parte los valores registrados. Los valores muestran una variación en un rango del 75 % (julio 2017) al 95 % (julio 2018).

Es probable que el volumen de copa, a lo largo del período de crecimiento, retenga el vapor de agua en el interior del cultivo y se obtengan valores superiores en el interior que en el exterior, así como antes de la cosecha y posterior a esta. Se han obtenido valores similares de la influencia del desarrollo en las condiciones microclimáticas del cultivo ⁽¹¹⁾. En cuanto a la humedad gravimétrica para el período de estudio, muestran un mínimo de 18,7 % (agosto 2017) y un máximo de 30 % (mayo 2016). Estudios realizados en la región productora demuestran valores promedios de 28,59 % y 22,58 % ⁽¹²⁾ (Figura 1).

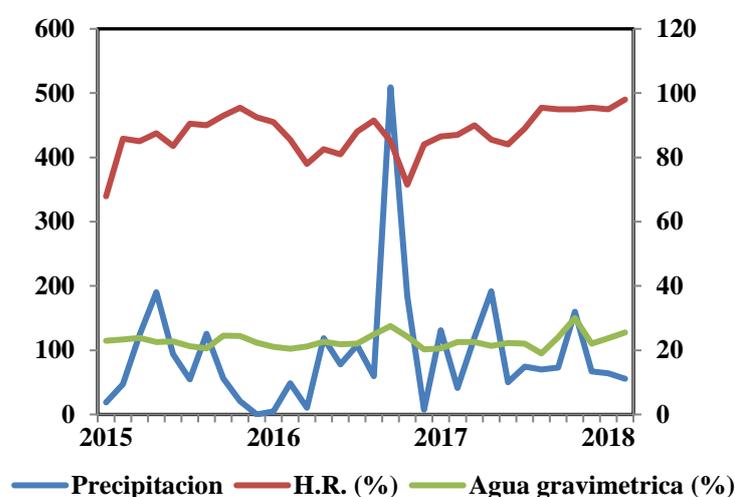


Figura 1. Valores de precipitación registrados para el período de estudio (2015-2018)

Es necesario considerar que el contenido de agua gravimétrica se vea influenciado por el plan anual de labores culturales que la empresa realiza, específicamente por la incorporación de compost. En tal sentido diferentes autores encontraron que la incorporación de compost modifica las propiedades físico-químicas del suelo, asociadas al aumento del contenido del carbono y capacidad de retención de agua ⁽¹³⁾.

Al analizar la radiación fotosintéticamente activa (PAR) que llega al estrato de yerba mate, se registran grandes diferencias durante el año y entre los años evaluados. Los mayores valores de radiación media se encontraron durante los meses de noviembre, diciembre y enero, para los dos primeros años evaluados y octubre, noviembre y diciembre para el año 3 (2017-2018). En un sistema cultivado, la radiación PAR, está determinada por factores geográficos, temporales y estructurales, como son: latitud, especie, densidad del rodal, índice de área foliar, biomasa y estructura de la copa, tanto vertical como horizontal ⁽¹⁴⁾ (Figura 2).

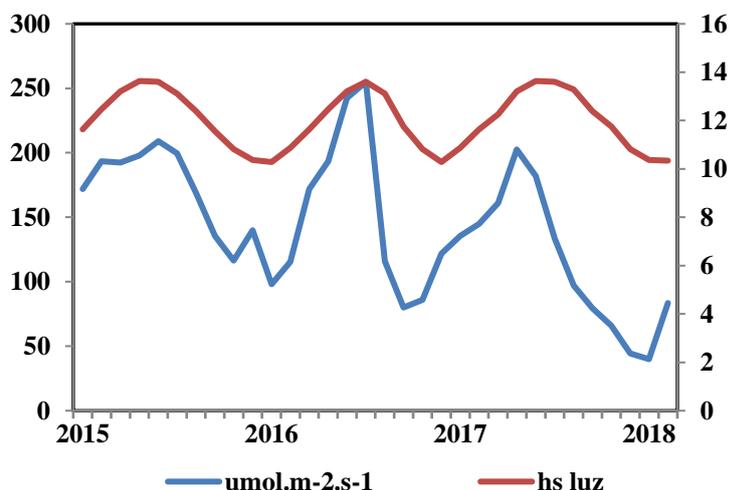


Figura 2. Valores de fotoperíodo (hs) y radiación fotosintéticamente activa para el período de estudio 2015-2018

Los registros de temperatura media, máximas y mínimas mensuales se muestran en la Figura 3. Las temperaturas medias tuvieron una variación entre 0,5 a 3 °C. Las mínimas fueron registradas para el mes de junio 2016 (5,4 °C) y julio 2017 (4,8 °C) y las máximas para el mes de enero 2015 (29,9 °C), febrero 2016 (29,5 °C) y diciembre 2017 (29,09 °C).

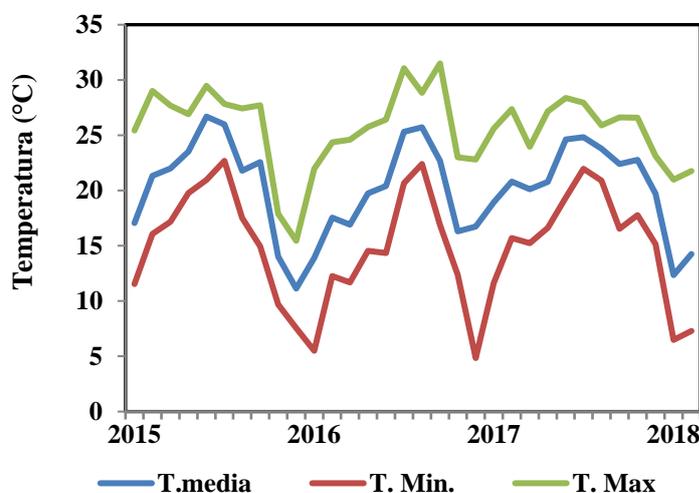


Figura 3. Valores de temperaturas °C (máxima, media y mínima) para el período de estudio 2015-2018

Fenofases Vegetativas

Hinchazón de yemas (V1)

Durante los períodos evaluados, el primer ritmo de brotación comenzó luego de un período de inactividad biológica y después de la cosecha.

La Figura 4 muestra que para los años uno y dos, el inicio de la brotación se registró en septiembre, con una duración aproximada de 13 y 25 días, respectivamente. Sin embargo, para el año tres el inicio

de la brotación se registró el 12 de agosto del 2017, para finalizar el 31 de agosto del mismo año, con una duración aproximada de 19 días. Esta diferencia puede ser atribuida a la mayor precipitación ocurrida en el mes de agosto, 2017-2018 (262 mm) en comparación con los anteriores años evaluados (69 mm y 97 mm).

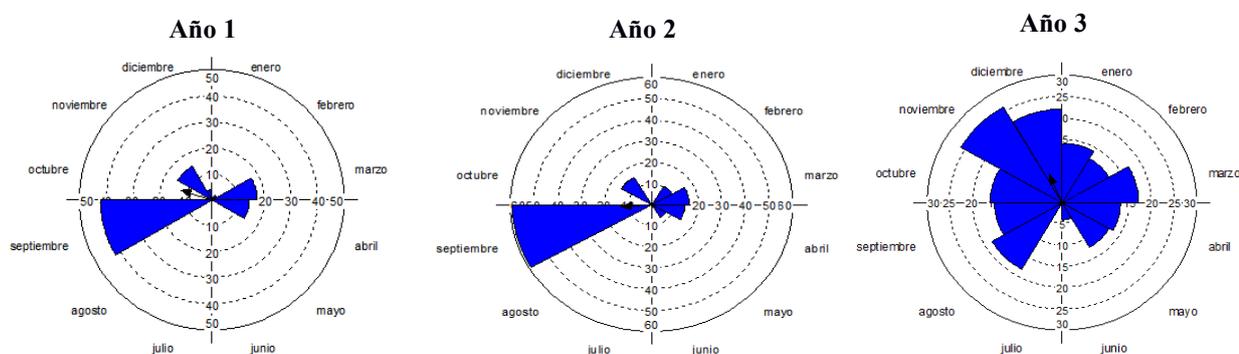


Figura 4. Histogramas circulares de frecuencia mensual para fenofase vegetativa V1 (hinchazón de yema) de *Ilex paraguariensis* para los años, uno (2015-2016), dos (2016-2017) y tres (2017-2018)

En los años evaluados se pudieron identificar tres ritmos de esta fenofase. Resultados similares fueron encontrados por otros autores, quienes definieron que existen períodos alternados de crecimiento de la yerba mate, en tres épocas distintas: durante la primavera, el verano y el otoño ⁽¹⁵⁾. Si bien durante el tiempo de observación se apreciaron tres ritmos, con la metodología de observación descrita, se destaca el cambio en la frecuencia de intensidad y duración de la fenofase hinchazón de yema, para los años de mayores precipitaciones.

Durante el año uno, donde las precipitaciones fueron inferiores en comparación con el año dos y tres, tanto la intensidad como la duración en los tres ritmos se reducen considerablemente, presentando la menor duración de esta fenofase en los tres años evaluados.

El patrón de crecimiento de la especie, fue caracterizado utilizando modelos de segmentación durante dos años de evaluación, en este estudio se verifican que existe una fase de reposo sistemática correspondiente a un período con temperaturas relativamente frías, mientras que las fases de reposo en el medio del año fueron frecuentes, pero no obligatorios ⁽¹⁶⁾. Dependiendo en qué momento suceda, al final o al principio de una fenofase, la falta de agua puede acelerar el desarrollo del cultivo al elevar la temperatura de las plantas y, por ello, reducir el número de días requeridos para alcanzar una determinada integral térmica ⁽¹⁷⁾.

El requerimiento en TT5 calculado para iniciar el primer ritmo de brotación, considerado luego del estado de reposo invernal (dormición) y después de la poda, fue de 951,30 (GD). Una vez iniciada la fenofase, la duración fue de 149 GD (año 1), 351,25 GD (año 2) y 259,65 GD (año 3). Estos resultados sugieren, que además de la temperatura, existen otras variables que influyen en la duración de cada

fenofase que no han sido considerados en este estudio. El segundo flujo de brotación se registró para el año uno y dos en noviembre, con una duración de 19 días (27 %) y 22 días (18 %), aproximadamente. El año tres la segunda brotación, se destacó, tanto por la intensidad, como por la duración, inició en septiembre hasta fines de diciembre totalizando 124 días. El TT5 requerido para iniciar el segundo ritmo fue de 441,6 GD. La tercera aparición de la fenofase se dio en marzo para el año 1 con, 66 días y febrero para los años dos y tres, con 88 días y 102 días, respectivamente. El TT5 requerido para iniciar el tercer ritmo de brotación fue de 317 GD.

En base a la evaluación y registro de los datos, se podría considerar que para disparar el inicio de la fenofase, y para el primer ritmo, se requieren de 951,3 GD; para el segundo ritmo 441 GD; y para el tercer ritmo 317 GD). Cuando se analizan los tres años observados, se obtienen correlaciones positivas con precipitación (Tabla 1). Para el año uno y dos no se detectaron correlaciones (Tablas 2 y 3). Para el año 3 (2017-2018) se registró una correlación positiva con la variable radiación y temperatura máxima y una correlación negativa con humedad relativa (Tabla 4).

Tabla 1. Correlaciones de Spearman (rs) para las fenofases vegetativas de plantas de *Ilex paraguariensis* y las variables temperatura, fotoperíodo, humedad relativa, radiación PAR, precipitación y agua gravimétrica

Variables ambientales	V1		V2		V3		V4		V5	
	rs	p	rs	p	rs	p	rs	p	rs	p
Temperatura Media	0,22	0,1876	0,21	0,2119	0,61	0,0001	0,43	0,0087	-0,31	0,0659
Temperatura Mínima	0,28	0,1014	0,26	0,1286	0,55	0,0005	0,48	0,0028	-0,34	0,0431
Temperatura Máxima	0,25	0,1489	0,14	0,4163	0,31	0,0669	0,24	0,1617	-0,33	0,0471
Radiación PAR	0,21	0,2225	0,31	0,0615	0,42	0,0101	0,14	0,4012	-0,45	0,0061
Precipitación	0,37	0,0275	0,14	0,4226	0,32	0,0598	0,36	0,0292	-0,2	0,2331
H.R. (%)	-0,1	0,5577	-0,09	0,5916	0,06	0,7442	0,11	0,5332	0,22	0,1938
Fotoperíodo	0,28	0,096	0,29	0,0872	0,65	<0,0001	0,4	0,0149	-0,36	0,0325
Agua gravimétrica (%)	0,08	0,6473	-0,08	0,637	-0,21	0,2191	0,12	0,4817	-0,02	0,8999

Evaluación 2015-2018. Valores significativos: p<0,05; p: valores significativos<0,05. rs: correlaciones de Spearman

Tabla 2. Correlaciones de Spearman (rs) para las fenofases vegetativas de plantas de *Ilex paraguariensis* y las variables temperatura, fotoperíodo, humedad relativa, radiación PAR, precipitación y agua gravimétrica

Variables ambientales	V1		V2		V3		V4		V5	
	rs	p	rs	p	rs	p	rs	p	rs	p
año 1 (2015-2016)										
Temperatura Media	0,4	0,2011	0,18	0,578	0,69	0,0123	0,37	0,2384	-0,43	0,1653
Temperatura Mínima	0,19	0,5573	0,05	0,87	0,78	0,0027	0,65	0,0232	-0,33	0,2888
Temperatura Máxima	0,36	0,2487	0,28	0,373	0,19	0,5488	-0,09	0,7822	-0,51	0,0897
Radiación PAR	0,47	0,125	0,43	0,1617	0,75	0,0046	0,5	0,0951	-0,86	0,0003
Precipitación	0,51	0,093	0,35	0,272	0,41	0,19	0,13	0,6951	-0,2	0,5405
H.R. (%)	-0,27	0,3908	-0,29	0,356	-0,08	0,8021	0,03	0,9217	0,5	0,0992
Fotoperíodo	0,47	0,1258	0,29	0,365	0,82	0,0011	0,52	0,0854	-0,59	0,0437
Agua gravimétrica (%)	0,01	0,981	0,1	0,747	-0,58	0,0474	-0,37	0,2422	0,02	0,9416

Evaluación interanual 2015-2016. Valores significativos: p<0,05; p: valores significativos<0,05. rs: correlaciones de Spearman

Tabla 3. Correlaciones de Spearman (rs) para las fenofases vegetativas de plantas de *Ilex paraguariensis* con las variables temperatura, fotoperíodo, humedad relativa, radiación PAR, precipitación y agua gravimétrica

Variables ambientales	V1		V2		V3		V4		V5	
	rs	p	rs	p	rs	p	rs	p	rs	p
año 2 (2016-2017)										
Temperatura Media	0,08	0,7987	0,24	0,4585	0,58	0,0503	0,41	0,1853	-0,47	0,1265
Temperatura Mínima	0,29	0,3545	0,36	0,2459	0,46	0,13	0,49	0,1048	-0,43	0,1656
Temperatura Máxima	0,2	0,5316	-0,03	0,9194	0,3	0,3356	0,41	0,1895	-0,35	0,258
Radiación PAR	-0,07	0,8177	0,3	0,348	0,39	0,2164	-0,19	0,556	-0,58	0,0471
Precipitación	0,24	0,4474	-0,05	0,8755	0,2	0,5264	0,46	0,1302	-0,25	0,4257
H.R. (%)	0,06	0,867	0,14	0,6766	0,34	0,3009	0,24	0,482	0,07	0,84
Fotoperíodo	0,14	0,6602	0,38	0,2174	0,76	0,0042	0,43	0,1583	-0,68	0,0155
Agua gravimétrica (%)	0,21	0,5145	0,11	0,7319	0,23	0,4639	0,19	0,5451	-0,02	0,9426

Evaluación interanual 2016-2017. Valores significativos: p<0,05; p: valores significativos<0,05. rs: correlaciones de Spearman

Tabla 4. Correlaciones de Spearman (rs) para las fenofases vegetativas de plantas de *Ilex paraguariensis* con las variables temperatura, fotoperíodo, humedad relativa, radiación PAR, precipitación y agua gravimétrica

Variables ambientales	V1		V2		V3		V4		V5	
	r	p	r	p	r	p	r	P	r	p
año 3 (2017-2018)										
Temperatura Media	0,39	0,2113	0,34	0,2763	0,52	0,0854	0,33	0,2879	-0,18	0,5772
Temperatura Mínima	0,43	0,1598	0,32	0,3128	0,43	0,1664	0,34	0,2861	-0,17	0,5911
Temperatura Máxima	0,64	0,025	0,38	0,2269	0,53	0,0789	0,47	0,1202	-0,41	0,188
Radiación PAR	0,91	<0,0001	0,55	0,0614	0,52	0,0861	0,36	0,2444	-0,33	0,2757
Precipitación	0,47	0,1269	0,24	0,4484	0,32	0,286	0,38	0,2207	-0,02	0,9445
H.R. (%)	-0,7	0,0116	-0,42	0,1792	-0,37	0,2338	-0,08	0,8154	0,4	0,1933
Fotoperíodo	0,5	0,0999	0,37	0,2338	0,48	0,1095	0,37	0,2395	-0,08	0,7808
Agua gravimétrica (%)	0,09	0,7787	-0,4	0,202	-0,39	0,2127	0,4	0,1919	-0,06	0,8518

Evaluación interanual 2017-2018. Valores significativos: p<0,05; p: valores significativos<0,05. rs: correlaciones de Spearman

La ausencia de correlaciones en el año dos y con las demás variables sugiere que la fenofase, considerada como hinchazón de yema, fue regulada por factores intrínsecos de la especie y por otros factores no considerados y su interacción.

Hojas incipientes (V2)

Esta fenofase (Figura 5), mostró un comportamiento similar al estado hinchazón de yema, mostrando tres ritmos durante los dos primeros años y un cuarto en el tercer año de evaluación. Durante el año uno, se registraron el primer ritmo en septiembre con aproximadamente 13 días cronológicos (DC), otro que inicia en octubre con una duración de 20 días y el último inicia en marzo con 18 días. El segundo año se registraron en septiembre, con 16 días, diciembre, 20 días, y febrero, 41 días.

El tercer año inició en agosto con una duración de 34 días, octubre con 17 días, noviembre 69 días y un cuarto ritmo identificado en febrero con 39 días.

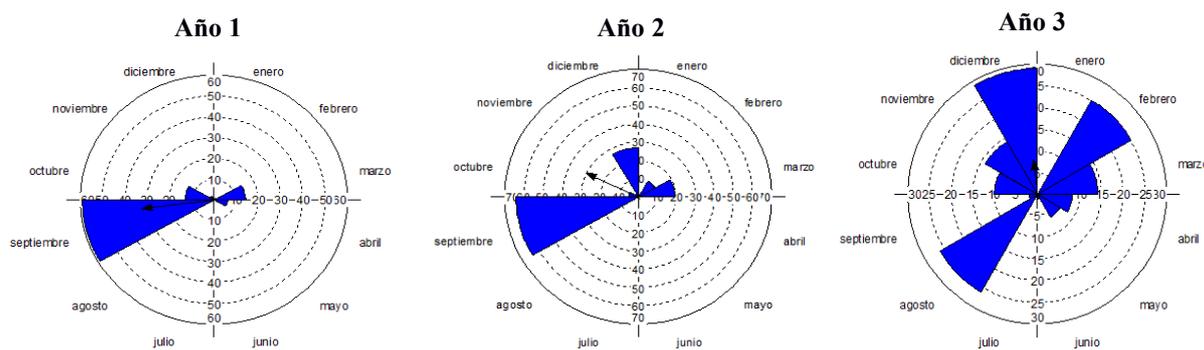


Figura 5. Histogramas circulares de frecuencia mensual para fenofase vegetativa V2 (Hojas incipientes) de *Ilex paraguariensis* para los años, uno (2015-2016), dos (2016-2017) y tres (2017-2018)

El tiempo térmico calculado, para el primero, segundo y tercer ritmo fue de 297, 416 y 540 GD. El cuarto ritmo excepcionalmente registrado para el tercer año fue de 766 GD. La fenofase de hojas incipientes no mostró correlaciones ni dentro de cada año ni entre años con ninguna de las variables ambientales evaluadas (Tablas 1, 2, 3, 4). Esto sugiere que, en particular esta fenofase, estaría fuertemente regulada por factores intrínsecos de la planta, o por factores no considerados en este trabajo.

Hojas pegadas por el ápice (V3)

Esta fenofase representó marcadas diferencias de comportamiento durante el período evaluado. Para el año uno, el inicio de la fenofase ocurrió en septiembre y finalizó en noviembre, con una duración aproximada de 37 días y un segundo ritmo, desde diciembre hasta mayo, con una duración de 174 días, con las mayores intensidades en enero. Durante el año dos el primer ritmo se registró en septiembre finalizando a mediados de noviembre, 53 días, y un segundo ritmo que inicia a fines de noviembre y finaliza en marzo totalizando 134 días, con las mayores intensidades en diciembre (Figura 6).

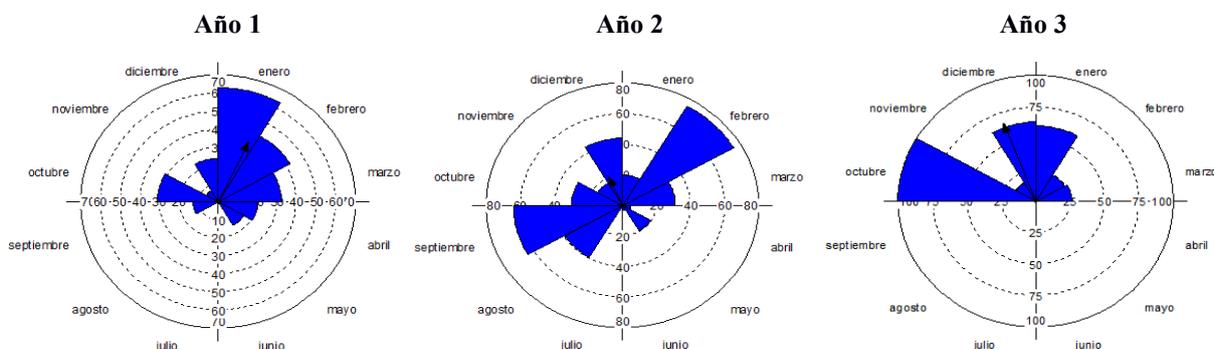


Figura 6. Histogramas circulares de frecuencia mensual para fenofase vegetativa V3 (Hojas pegadas por el ápice) de *Ilex paraguariensis* para los años, uno (2015-2016), dos (2016-2017) y tres (2017-2018)

El año tres se comportó notablemente diferente, las mayores desigualdades se presentaron, tanto en el inicio, como en la duración de la fenofase. Se registró el primer ritmo en agosto y finalizó en la primera quincena de septiembre con una duración de 34 días, un segundo ritmo a fines de septiembre hasta mediados de noviembre con 41 días, un tercer ritmo con inicio a fines de noviembre y fin de mayo, 154 días, un tercer ritmo con inicio a fines de noviembre y fin en mayo, 154 días, y un cuarto ritmo con inicio en mayo y con fin en junio, 30 días. Los menores valores se registraron en noviembre. Esto podría indicar que durante el mes de noviembre y para los tres años evaluados se registran los menores valores de intensidad o la ausencia de la fenofase (año 1 y 2) del estado de hojas pegadas por el ápice. Con respecto a los grados días, se acumularon 980, 197,67, 241 y 273 GD para el primer, segundo, tercer y cuarto ritmo observado, respectivamente. Cuando se observaron los valores de correlación obtenidos dentro de cada año, en el año uno se verificó una correlación positiva con las temperaturas mínimas; media, radiación, fotoperíodo y una correlación negativa para agua gravimétrica. Para el año dos se obtuvieron correlaciones positivas para temperatura media y fotoperíodo (Tabla 1). El año tres los resultados mostraron una correlación positiva para la variable fotoperíodo (Tabla 3). Las correlaciones de Spearman para los tres años de estudio mostraron una correlación positiva para temperaturas mínimas; temperatura media, radiación, y fotoperíodo (Tabla 4). En climas templados, la regulación y ritmicidad de los árboles está regulada principalmente por la temperatura y el fotoperíodo. Algunos autores, observaron que los meristemas de yerba mate se mantenían en estado de reposo cuando las temperaturas del invierno eran inferiores a 10° C y fotoperíodo corto (alrededor de 10 hs) ⁽¹⁸⁾. Durante los meses evaluados se registraron temperaturas mínimas de 7° y 1 °C (agosto, septiembre del 2015), entre 9 y 5 °C (abril, mayo, junio y julio 2016), 7 y 5 °C, durante los meses de junio y julio 2017 y 2018. Estos meses coinciden con los mayores valores de presencia de la fenofase hoja madura, con una disminución marcada de la fenofase hojas pegadas por el ápice.

Hojas desplegadas (V4)

Para los tres años evaluados se muestran diferencias, tanto para el inicio, como para el fin de la fenofase. Para el año uno, los mayores episodios de hojas desplegadas, considerándose plena brotación, se registraron en octubre, noviembre y febrero, con ausencia o fin de la fenofase desde julio a agosto (Figura 7) (año uno). El año dos, los meses de octubre, segunda quincena, noviembre, enero, abril y mayo se destacaron por su frecuencia. En el año tres, se registró en septiembre, con las mayores intensidades en octubre, enero y marzo, la fenofase estuvo ausente desde mayo hasta julio. Para el año uno, los resultados mostraron una correlación positiva con las variables temperatura mínima, radiación y fotoperíodo. El año dos y tres no mostraron correlación con ninguna de las variables evaluadas.

Cuando se analizan los tres años evaluados las correlaciones de Spearman se muestran positivas con las variables temperatura mínima, temperatura media, fotoperíodo y precipitación.

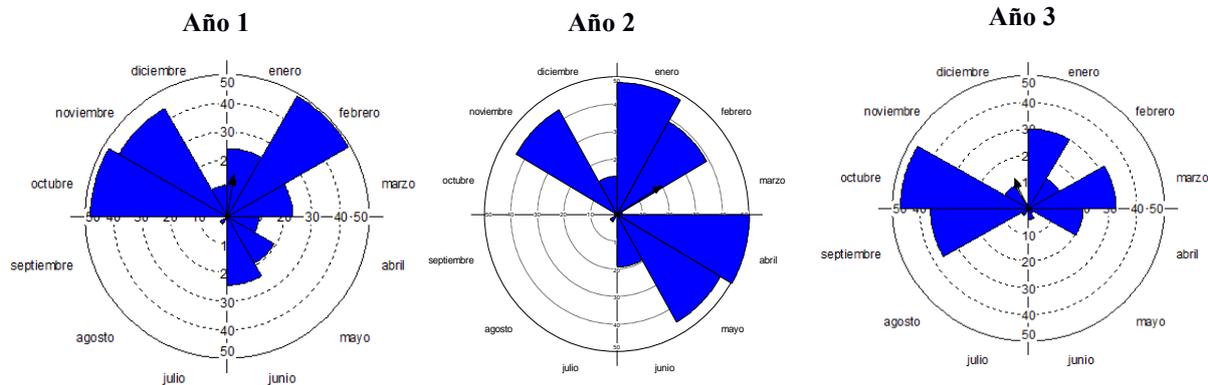


Figura 7. Histogramas circulares de frecuencia mensual para fenofase vegetativa V4 (Hojas desplegadas) de *Ilex paraguariensis* para los años uno (2015-2016), dos (2016-2017) y tres (2017-2018)

Las correlaciones encontradas muestran que la especie está condicionada principalmente por el fotoperíodo y las temperaturas mínimas (Tablas 1, 2). Es importante destacar como el ácido absísico está involucrado en la respuesta a la sequía de *I. paraguariensis* ⁽¹⁹⁾. Estos y otros mecanismos propios de las especies perennes subtropicales podrían explicar las correlaciones encontradas en algunos años, con la variable precipitación. Cabe mencionar que la respuesta de la planta puede ser en función de la duración de dicho estrés hídrico ⁽²⁰⁾.

La evaluación de la fenofase en el período observado, tuvieron una duración de 41 a 127 días cronológicos. El inicio de la fenofase ocurrió luego de acumular 1073, 409 y 197 GD para el primer, segundo y tercer ritmo, respectivamente.

Hojas maduras V5

El registro de la fenofase V5 o de hojas maduras, aunque irregular, mostró una continuidad del evento en el período comprendido entre octubre-julio (año uno), noviembre-agosto (año dos) y octubre-agosto (año tres). Esta fenofase (Figura 8), es caracterizada por el aumento en tamaño de la hoja, cambio de coloración y textura, demostrando un aspecto coriáceo y de coloración verde oscura. Si se analizan las correlaciones dentro de cada año, para el año 1 se obtuvieron resultados similares, correlaciones negativas para fotoperíodo y radiación al igual que el año 2, radiación y fotoperíodo (Tabla 1). Para el año 3 no se encontraron correlaciones (Tabla 3). El análisis de la fenofase entre los años evaluados demuestra una correlación negativa de la fenofase con temperaturas mínima, temperatura máxima, radiación; y fotoperíodo (Tabla 4). Lo antes planteado, refleja la importancia de la luz, en términos de radiación, fotoperíodo y temperatura mínima y máxima en el desarrollo de las plantas.

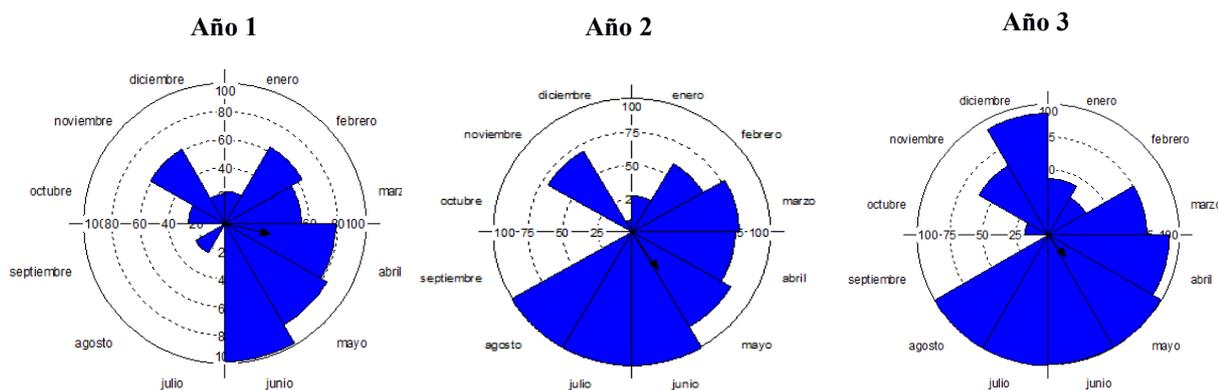


Figura 8. Histogramas circulares de frecuencia mensual para fenofase vegetativa V5 (Hojas maduras) de *Ilex paraguariensis* para los años, uno (2015-2016), dos (2016-2017) y tres (2017-2018)

Un estudio realizado para verificar la influencia de la luminosidad sobre los tenores de macronutrientes y taninos en hojas de yerba mate, formulan la hipótesis que en ambientes más sombreados, la yerba mate tiene actividad metabólica más constante, presentando menores variaciones en los contenidos de N, entre las estaciones del año ⁽²¹⁾.

La mayor eficiencia de uso de radiación PAR en yerba mate, bajo cultivo intercalado con pino, revela la importancia de la sombra para el cultivo ⁽²²⁾. Esto podría explicar, en parte, las correlaciones encontradas con la radiación para la fenofase V5 o de hojas maduras, ya que para las condiciones de altas densidades, las hojas dependen más de fotosíntesis actual, que de removilización de nutrientes, de esta manera lograrían mantener una actividad metabólica más constante a lo largo de las estaciones. Asimismo se conoce que las respuestas fotomorfogénicas de plantas jóvenes de yerba mate, muestran que estas tienen una respuesta de “shade-avoiding” o gradiente de sombra, estrategia del aumento del área foliar individual ⁽²³⁾. El tiempo térmico requerido para el inicio de la fenofase fue de 938,31; 641,49 y 842 GD para el primero, segundo y tercer ritmo, respectivamente.

CONCLUSIONES

- Los análisis realizados permiten concluir que la metodología de observación fitofenológica en el cultivo de yerba mate, permite conocer el comportamiento de la planta a lo largo del año.
- La yerba mate presenta cinco fenofases vegetativas: hinchazón de yema (V1), hojas incipientes (V2), hojas pegadas por el ápice (V3), hojas desplegadas (V4) y hojas maduras (V5).
- Se identificaron 3 ritmos de brotación para las fenofases vegetativas.
- Cuando las precipitaciones se suceden de manera abundante, se verifican cuatro ritmos para la fenofase hojas incipientes (V2) y hojas pegadas por el ápice (V3).

- Las temperaturas, fotoperíodo, precipitación y radiación PAR condicionan la presencia e intensidad de cada fenofase a lo largo del ciclo del cultivo.
- Los GD calculados permiten conocer los requerimientos térmicos para cada ritmo y fenofase identificada.

RECOMENDACIONES

Se deben realizar observaciones fenológicas a largo plazo, para lograr mejorar las interpretaciones que en este trabajo se plantean con carácter preliminar. Estos primeros aportes al estudio de la fenología, comprenden un paso inicial para conocer la dinámica de la especie y, a largo plazo, contribuirá a generar modelos que permitirán simular el comportamiento del cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Burgos AM, Medina RD. Sistemática y morfología: de su identidad, sus aspectos externos y algunos más íntimos. 2017; Available from:https://repositorio.unne.edu.ar/bitstream/handle/123456789/27893/RIUNNE_FCA_CL_Burgos-Medina-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y
2. Fuentes NA, Sposetti G, Mackinnon I, Lawrinowicz A. Asociación entre el consumo de yerba mate (YM) y riesgo de diabetes y otros factores de riesgo cardiovascular. Investigación, Ciencia y Universidad, Vol. 2 Núm. 3 (2018) [Internet]. 2018 [cited 19/10/2021]; Available from:<http://repositorio.umaza.edu.ar//handle/00261/1452>
3. www.innovavista.net. Instituto Nacional de la Yerba Mate [Internet]. [cited 19/10/2021]. Available from:<https://inym.org.ar/>
4. Johnson KA. Real life science with dandelions and project BudBurst. Journal of microbiology & biology education [Internet]. 2016;17(1):115-6. Available from:<https://journals.asm.org/doi/pdf/10.1128/jmbe.v17i1.1064>
5. Dalurzo HC. Labranza. Influencia sobre parámetros del suelo y la compactación : la sustentabilidad del nicho de la yerba mate [Internet]. Consejo Federal de Inversiones; 2017 [cited 19/10/2021]. Available from:<http://repositorio.unne.edu.ar/xmlui/handle/123456789/27898>
6. Recio M, Silva P. Estudio fenológico de angiospermas leñosas mediterráneas del Jardín Botánico de la Universidad de Málaga. Acta Botanica Malacitana [Internet]. 2018;(43):5-20. Available from:<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6708467>
7. Rakocevic M, Martim SF. Time series in analysis of yerba-mate biennial growth modified by environment. International journal of biometeorology [Internet]. 2011;55(2):161-71. Available from:<https://www.researchgate.net/profile/Miroslava->

Rakocevic/publication/44647173_Time_series_in_analysis_of_yerba-mate_biennial_growth_modified_by_environment/links/554cf3370cf21ed2135f5a8f/Time-series-in-analysis-of-yerba-mate-biennial-growth-modified-by-environment.pdf

8. Infostat - Software estadístico [Internet]. [cited 19/10/2021]. Available from:<https://www.infostat.com.ar/>
9. Oriana - circular statistics, circular data, rose diagrams [Internet]. [cited 19/10/2021]. Available from:<https://www.kovcomp.co.uk/oriana/index.html>
10. Müller A, Schmitt JL. Phenology of *Guarea macrophylla* Vahl (Meliaceae) in subtropical riparian forest in southern Brazil. *Brazilian Journal of Biology* [Internet]. 2017;78:187-94. Available from:<https://www.scielo.br/j/bjb/a/cTsDPMZQ54shy4zYBC4KVLr/?stop=previous&lang=en&format=html>
11. Herrera Moratta MA. Interacción planta ambiente en la vegetación de la Puna Austral de la Argentina. 2019; Available from:https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/81224/CONICET_Digital_Nro.e6b6dec8-2dd7-4691-bf4b-2ff3a56564db_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
12. Barbaro SE, Sosa DA. Caracterización de las constantes hídricas de suelos bajo cultivo de yerba mate [*Ilex paraguariensis* St. Hil. 1822]. In: Congreso Sudamericano de la Yerba Mate. 5. 2011 05 05-06, 5-6 de mayo de 2011. Posadas, Misiones. AR. [Internet]. 2011. Available from:<https://www.fansdelmate.com/estudios-e-investigacion/congreso-sudamericano-de-la-yerba-mate-el-5-y-6-de-mayo-de-2011-en-posadas-misiones-noticias-estudios-e-investigacion.html>
13. Weber J, Karczewska A, Drozd J, Licznar M, Licznar S, Jamroz E, et al. Agricultural and ecological aspects of a sandy soil as affected by the application of municipal solid waste composts. *Soil biology and biochemistry* [Internet]. 2007;39(6):1294-302. Available from:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071706004974>
14. Sampson DA, Allen HL. Light attenuation in a 14-year-old loblolly pine stand as influenced by fertilization and irrigation. *Trees* [Internet]. 1998;13(2):80-7. Available from:https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja_sampson001.pdf
15. Sansberro PA, Mroginski LA, Masciarelli OA, Bottini R. Shoot growth in *Ilex paraguariensis* plants grown under varying photosynthetically active radiation is affected through gibberellin levels. *Plant growth regulation* [Internet]. 2002;38(3):231-6. Available from:<https://link.springer.com/article/10.1023/A:1021567614741>
16. Guédon Y, Costes E, Rakocevic M. Modulation of the yerba-mate metamer production phenology by the cultivation system and the climatic factors. *Ecological Modelling* [Internet]. 2018;384:188-97. Available from:<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380018302254>

17. Chaves-Barrantes NF, Gutiérrez-Soto MV. Respuestas al estrés por calor en los cultivos. I. Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana* [Internet]. 2017 [cited 19/10/2021];28(1):237-53. doi:10.15517/am.v28i1.21903
18. Rakocevic M, Costes E, Assad ED. Structural and physiological sexual dimorphism estimated from three-dimensional virtual trees of yerba-mate (*Ilex paraguariensis*) is modified by cultivation environment. *Annals of Applied Biology* [Internet]. 2011;159(2):178-91. Available from:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1744-7348.2011.00484.x>
19. Acevedo RM, Avico EH, González S, Salvador AR, Rivarola M, Paniego N, et al. Transcript and metabolic adjustments triggered by drought in *Ilex paraguariensis* leaves. *Planta* [Internet]. 2019;250(2):445-62. Available from:https://repositorio.unne.edu.ar/bitstream/handle/123456789/9142/RIUNNE_AR_Acevedo-Avico-Gonz%C3%A1lez.pdf?sequence=1&isAllowed=y
20. Blum A. Stress, strain, signaling, and adaptation—not just a matter of definition. *Journal of experimental botany* [Internet]. 2016;67(3):562-5. Available from:<https://academic.oup.com/jxb/article/67/3/562/2893348?login=true>
21. Rachwal MFG, Nietschek K, Radomski MI, Curcio GR, Dedecek RA. INFLUÊNCIA DA LUMINOSIDADE SOBRE A PRODUTIVIDADE DA ERVA-MATE AOS QUATRO ANOS E QUATRO MESES DE IDADE SOBRE LATOSSOLO VERMELHO- AMARELO DISTRÓFICO EM SÃO MATEUS DO SUL – PR. Embrapa Florestas. Pesquisa em andamento [Internet]. no. 92:2. Available from:<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/44328/1/pesq-andam-92.PDF>
22. Caron BO, Schmidt D, Balbinot R, Behling A, Eloy E, Elli EF. Efficiency of the use of yerba mate solar radiation in intercropping or monocropping for the accumulation of carbon. *Revista Árvore* [Internet]. 2016;40:983-90. Available from:<https://www.scielo.br/j/rarv/a/F8MyPvGSPjdRRYzzW9PVBpt/?lang=en>
23. Rakocevic M, Medrado MJ, Takaki M. Aspectos fotomorfogénicos de plantas jóvenes de yerba-mate. Tercer Congreso Sul-Americano da Erva-Mate [Internet]. 2002;1-15. Available from:<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/308769/1/aspectos.pdf>