



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Análisis de productividad, estabilidad y resiliencia de cultivares de alfalfa en Uruguay y Argentina

Juan Errandonea

Maestría en Ciencias Agrarias

Octubre 2023

**Análisis de productividad, estabilidad y
resiliencia de cultivares de alfalfa en
Uruguay y Argentina**

Juan Errandonea

Maestría en Ciencias Agrarias

Octubre 2023

Tesis aprobada por el tribunal integrado por el Ing. Agr. Dr. Pablo Boggiano, el Ing. Agr. PhD Rafael Reyno y la Ing. Agr. PhD. Laura Astigarraga el 24 de octubre de 2023. Autor: Ing. Agr. Juan Errandonea. Director: Ing. Agr. PhD. Valentín Picasso. Codirectora: Ing. Agr. PhD. Marina Castro.

AGRADECIMIENTOS

A Valentín Picasso, por su apoyo y solidaridad, por la disposición, conocimientos y apertura a incluirme en múltiples instancias formativas y por su participación en mi formación como persona de ciencia, incluso por fuera del alcance de este trabajo.

A Marina Castro, por su permanente disposición, solidaridad y nivel de discusión, así como por poner siempre a disposición a su equipo y colegas del INIA para discutir diversos conceptos planteados a lo largo del trabajo.

A Laura Astigarraga, por apoyarme también en los aspectos más diversos en este proceso y por ser uno de los motores generadores de mi maestría.

A todos ellos, por su profunda calidad profesional y humana.

A Valeria Arolfo de INTA, Argentina, por facilitar parte de los datos utilizados en este trabajo.

A Pablo Speranza, Gabriela Cruz, Virgina Pravia y Silvana Noel, por sus invaluable aportes al trabajo durante su participación en los seminarios 1 y 2. A Pablo Boggiano como director del GD de Producción de Pasturas que me permitió la participación en el grupo aportando a mi formación durante transcurso de este proceso.

A la ANII, por el apoyo económico a través su programa de becas para maestría. A la Universidad de la Republica y, en particular, a Facultad de Agronomía tanto por su apoyo formativo como económico. Al Departamento de Agronomía de la Universidad de Wisconsin (Madison) y todos los integrantes del Laboratorio de Forrajeras y Cultivos Perennes, por recibirme durante dos pasantías que fueron de enorme valor.

A mi familia, papá, mamá, Inés y María, fuente de interminable y permanente apoyo, incluso más allá de lo demandado y merecido, siempre y de forma incondicional. Por aguantar los altibajos que en todo largo proceso se presentan.

A Ximena, por estar, por aguantarme, por las largas tardes y noches de trabajo juntos.

A mis amigos y amigas y todos quienes a lo largo de este tiempo fueron en mayor o menor medida parte de mi vida.

A todos ellos, enormes gracias por ser parte y por estar.

TABLA DE CONTENIDO

PAGINA DE APROBACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	VII
SUMMARY.....	VIII
 <u>1. INTRODUCCIÓN</u>	 1
1.1. VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y ADAPTACIÓN.....	1
1.2. SUSTENTABILIDAD: PRODUCTIVIDAD, RESILIENCIA Y ESTABILIDAD	2
1.3. ALFALFA (<i>MEDICAGO SATIVA</i> L.)	4
<u>1.3.1. Relevancia de la especie</u>	4
<u>1.3.2. Resistencia a enfermedades</u>	4
<u>1.3.3. Grados de reposo y niveles de latencia</u>	5
<u>1.3.4. Diversidad genética y ambiental. Efectos en el rendimiento, estabilidad y resiliencia</u>	7
<u>1.3.5. Cultivares de alfalfa: historia reciente</u>	7
<u>1.3.6. Alfalfa y respuesta a la variabilidad ambiental</u>	8
1.4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	9
<u>2. MATERIALES Y MÉTODOS</u>	11
2.1. BASE DE DATOS	11
<u>2.1.1 Ensayos de rendimientos</u>	11
<u>2.1.2 Caracterización de cultivares</u>	13
<u>2.1.3 Caracterización climática</u>	14
2.2. METODOLOGÍA	15
<u>2.2.1. Identificación y caracterización de años crisis</u>	15
<u>2.2.2. Cálculo de índices</u>	17
<u>2.2.3. Análisis y modelos estadísticos</u>	19
<u>2.2.4. Variables calculadas vs. otras características del cultivar</u>	20
<u>3. RESULTADOS</u>	22
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS Y AÑOS CRISIS	22

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS CULTIVARES.....	24
3.3. ASOCIACIÓN ENTRE VARIABLES CALCULADAS.....	26
3.4. ASOCIACIÓN ENTRE VARIABLES CALCULADAS Y OTRAS CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVAR	28
<u>4. DISCUSIÓN</u>	30
4.1. CARACTERIZACIÓN DE SITIOS Y AÑOS CRISIS	30
4.2. CARACTERIZACIÓN DE CULTIVARES.....	31
4.3. RELACIONES ENTRE VARIABLES	32
4.4. ASOCIACIÓN ENTRE VARIABLES Y OTRAS CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVAR	33
4.5. RESILIENCIA VS. PLASTICIDAD.....	35
4.6. OTRAS CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVAR ESTUDIADAS	36
4.7. IMPLICANCIAS PARA LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS.....	37
4.8. AGRUPAMIENTO REGIONAL EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE LATENCIA.....	38
4.9. LIMITACIÓN DE LAS BASES DE DATOS UTILIZADAS	38
<u>5. CONCLUSIONES</u>	40
<u>6. BIBLIOGRAFÍA</u>	41
<u>7. ANEXOS</u>	48
7.1 RESILIENCE, PRODUCTIVITY AND STABILITY OF ALFALFA CULTIVARS IN URUGUAY AND ARGENTINA	48

RESUMEN

El cambio climático ha incrementado tanto los déficits como los excesos hídricos, los cuales impactan en la producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.). Con el objetivo de evaluar la estabilidad de producción y resiliencia de cultivares de alfalfa a los extremos climáticos, se analizó una base de datos con 15.115 medias de rendimiento provenientes de 129 ensayos de evaluación de cultivares. Se incluyeron un total de 12 sitios de Argentina y Uruguay, para el período 1994-2018. Se calcularon tres índices: productividad, estabilidad y resiliencia para 59 cultivares. Utilizando la caracterización climática, se calcularon, además, medias de resiliencia (i. e., resistencia) asociadas a sequías, excesos hídricos y a situaciones no relacionadas con estos. Se obtuvieron diferencias significativas entre cultivares para los índices de productividad y estabilidad. No se obtuvieron diferencias significativas entre cultivares para los índices de resiliencia. Productividad y resiliencia estuvieron positivamente correlacionados con el grado de reposo (GR) de los cultivares. Cultivares más productivos en general presentaron también mayores niveles de producción acumulada en años con rendimientos medios muy reducidos. Se hipotetiza que la ventana de activo crecimiento más prolongada que poseen los materiales de mayor GR permitiría compensar caídas en los rendimientos generadas por restricciones ambientales pasajeras, con crecimiento durante etapas en las que materiales de menor GR se encuentran aún latentes. Las bases de datos utilizadas presentaron ciertas limitantes de continuidad temporal y duración de los ensayos que pueden haber limitado la obtención de resultados más robustos en todas las variables analizadas. Las conclusiones no podrían ser extrapoladas a cultivos de alfalfa de una duración superior a los 3 o 4 años. Se evaluaron finalmente agrupamientos utilizados en la región según los niveles de latencia de los cultivares (intermedia y sin latencia). El agrupamiento que generó niveles más contrastantes en los índices calculados fue aquel que congrega cultivares de grados de reposo 6 y 7 como cultivares con latencia intermedia y cultivares de grados 8, 9 y 10 como cultivares sin latencia.

Palabras clave: cambio climático, latencia, reposo, forrajeras, *Medicago sativa* L.

SUMMARY

Climate change is increasing both water deficits and excesses, which constrain Alfalfa (*Medicago sativa* L.) production. With the goal of assessing the stability and resilience of alfalfa cultivars to climate extremes in South America, a database of 15,115 Alfalfa annual forage mean yields from 129 variety trials was analyzed. 12 locations from Argentina and Uruguay were included for the period 1994-2018. Three indexes were computed: productivity, stability and resilience, for 59 varieties. We estimated 3 resilience metrics based on the nature of the weather crisis: drought, water excess, and not water related (*neutral*). Differences were detected for productivity and stability. Resilience metrics showed nonsignificant variation between cultivars. The methodology applied in our data set showed limited results when used at variety level. There was a positive association between productivity and resilience metrics except for the water excess related one. When grouping varieties considering dormancy levels, we found less dormant cultivars presented higher productivity and general, drought and neutral resilience metrics. Less dormant varieties (higher dormancy scores) have a substantially longer growing season in our region and they are actively growing during early spring and late fall. This would increase the possibility for them to compensate a potential dry matter shortage occurred in a critical period of time with growing in other seasons of the year. This resulting, in average, in higher annual forage yields. Finally, two ways of clustering varieties were evaluated according to the levels of dormancy of the cultivars (intermediate and without dormancy). The grouping that generated the most contrasting levels in the computed indices was the one that brought together cultivars of dormancy scores 6 and 7 as cultivars with intermediate dormancy and cultivars of scores 8, 9 and 10 as cultivars without dormancy.

Keywords: climate change, *Medicago sativa* L, dormancy, forages

1. INTRODUCCIÓN

1.1. VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y ADAPTACIÓN

En el ámbito global existe en las últimas décadas una creciente preocupación por los efectos que el cambio climático imprimirá sobre los sistemas de producción de alimentos. Para Uruguay es conocido el impacto que la variabilidad y los eventos climáticos extremos generan en los sistemas de producción agropecuarios en general y en las pasturas en particular (Tiscornia et al., 2016, Astigarraga et al., 2013, Barrenchea y Guerra, 2010).

Uno de los eventos climáticos con mayor impacto sobre nuestros sistemas son las sequías agronómicas. Existen, en el ámbito nacional, trabajos que evidencian una posible tendencia al incremento en las precipitaciones, tanto analizando series históricas como proyecciones futuras (Caorsi et al., 2018, Sordo-Ward et al., 2017, Cruz et al., 2014). Estos trabajos proyectan reducciones probables en las deficiencias hídricas en el país y la región pampeana de Argentina. Parte de los incrementos probables en los niveles de precipitación podrían ser explicados por un incremento en los eventos de lluvias intensas en la región sureste de Sudamérica (IPCC, 2014). Por otro lado, Penalba y Rivera (2013), con base en modelos CMIP5, proyectan sequías más frecuentes e intensas, aunque de menor duración. En todos los casos, y más allá de las posibles tendencias a largo plazo, se destaca en el contexto nacional una gran preponderancia de la variabilidad interanual de las precipitaciones, variable definitiva en la ocurrencia de sequías (Caorsi et al., 2018). Una consulta en la herramienta web Times Scales Map Room (IRI, 2011) permite evidenciar la gran relevancia que comparativamente tiene la componente interanual de las lluvias en Uruguay y la región, obteniéndose valores de 79 %, 70 % y 65 % para las zonas de Uruguay, la región sureste de América del Sur y el planeta, respectivamente. Valores cercanos e incluso mayores son reportados por la bibliografía nacional (Caorsi et al., 2018, Tiscornia et al., 2016). Esto confirma que, en Uruguay, la variabilidad interanual es comparativamente más importante que en otras regiones. Existen asimismo algunas evidencias de que esta podría verse incluso incrementada en el futuro (Penalba y Rivera, 2013).

Las proyecciones de temperaturas indican probables incrementos, asociados a un aumento en el número de días y noches cálidas, así como una reducción en los días y noches fríos. Por último, es esperable para Sudamérica, aunque con una tendencia menor para la región sureste, que se dé un incremento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor (IPCC, 2014).

En este escenario, y si bien la probabilidad de reducción en las sequías podría ser una buena noticia, parece pertinente continuar en un camino de búsqueda de sistemas de producción capaces de tolerar la elevada variabilidad que caracteriza la región, que permitirá enfrentar la vulnerabilidad actual así como la incertidumbre de los eventos futuros (Tiscornia et al., 2016, IPCC, 2014).

Para enfrentar esta situación el IPCC (2014) recomienda seguir caminos climáticamente resilientes que deben combinar la adaptación con la mitigación de los impactos en un contexto de implementación de caminos de desarrollo sustentable.

1.2. SUSTENTABILIDAD: PRODUCTIVIDAD, RESILIENCIA Y ESTABILIDAD

La sustentabilidad puede ser evaluada a diferentes escalas y por muy diversos atributos (Picasso et al., 2019). La resiliencia y la estabilidad en sistemas forrajeros reflejan el desempeño de los agroecosistemas en el largo plazo y aparecen como variables de gran relevancia para enfrentar la mencionada variabilidad climática y las crisis o extremos asociados a esta (Tracy et al., 2018).

Históricamente, la investigación en pasturas y especies forrajeras se ha enfocado en maximizar los niveles de productividad, es decir, el rendimiento promedio de materia seca por unidad de área (Collins et al., 2018). La estabilidad y la resiliencia son conceptos menos comprendidos, a veces confundidos, y su evaluación no es tan directa (Urruty et al., 2016). La estabilidad podría definirse teóricamente como la mínima variabilidad de los rendimientos en el tiempo bajo condiciones normales (Urruty et al., 2016, Dawson et al., 2010, Picasso et al., 2010, López-ridaura et al., 2005, Loreau et al., 2001, Grimm y Wissel, 1997, Marten, 1988). La resiliencia, por otro lado, ha sido abordada desde diferentes ópticas en las últimas décadas (Picasso et al., 2019, Tracy et al., 2018, Urruty et al., 2016, Sabatier et al., 2015, Dawson et al.,

2010, López-Ridaura et al., 2005, Walker et al., 2004, Grimm y Wissel, 1997). Waldron et al. (2021) cuantifican parámetros genéticos relacionados con la resiliencia al déficit hídrico, la heredabilidad, la correlación genética y la ganancia esperable (*predicted gain*) por la selección y obtienen resultados positivos tanto en la capacidad de cuantificar la resiliencia al déficit hídrico como en determinar su heredabilidad en una población de medios hermanos de festuca ((*Lolium arundinaceum* (Schreb.) Darbysh)).

Hodgson et al. (2015) definen la resiliencia como la capacidad de un sistema de persistir o mantener sus funciones al enfrentar un disturbio o impacto exógeno. Estos autores sugieren que la resiliencia no puede ser medida como una sola característica y proponen un enfoque en el que la resiliencia en sentido amplio comprende dos dimensiones complementarias, resistencia y recuperación. La resistencia se define como la habilidad de soportar una crisis y no desviarse durante la perturbación. Un ejemplo gráfico de sistemas forrajeros más resistentes sería aquellos que ante una sequía reducen menos sus niveles de producción, en comparación con otros menos resistentes en los que la producción caería marcadamente. La recuperación es la habilidad del sistema de reponerse luego de una crisis, incluyendo la forma o velocidad de esa recuperación (Tracy et al., 2018, Isbell et al., 2015, Oliver et al., 2015).

Dos obstáculos para estudiar características como estabilidad y resiliencia son la falta de consenso en las metodologías de medición (Grimm y Wissel, 1997) y la falta de bases de datos de largo plazo. Para estimar estas variables de forma satisfactoria y mejorar nuestra comprensión de las mismas, deben aplicarse metodologías en bases de datos lo suficientemente extensas, conjugando resultados de diferentes regiones y utilizando enfoques que integren diferentes disciplinas (Tracy et al., 2018).

Este trabajo tomará la metodología utilizada por Picasso et al. (2019) para calcular, en cultivares de alfalfa evaluados en la región, índices de productividad, estabilidad y resiliencia a través de una de sus dimensiones o componentes: la resistencia.

1.3. ALFALFA (*MEDICAGO SATIVA* L.)

1.3.1. Relevancia de la especie

Alfalfa es una de las principales especies forrajeras perennes tanto en el ámbito global como regional. Su importancia radica en su capacidad de ser utilizada tanto para pastoreo directo como para la generación de reservas forrajeras (Undersander, 2015), su gran potencial de producción, valor nutricional, perennidad, plasticidad y capacidad de fijar nitrógeno, así como su profundo sistema radicular, que le confiere una buena resistencia a la sequía (Basigalup, 2007). Esta forrajera es también valorada por los beneficios que aporta a la sustentabilidad de los sistemas, protegiendo la calidad del agua, mejorando la fijación de carbono en el suelo, recuperando la fertilidad y generando estabilidad edáfica (Martín et al., 2020, Russelle, 2013).

En Argentina, la alfalfa ha sido históricamente la principal especie forrajera sembrada, aunque con altibajos en las áreas de producción. Argentina es el segundo productor mundial de alfalfa, siendo esta especie uno de los principales cultivos del país (Martín et al., 2020, Basigalup, 2007).

En Uruguay, es una forrajera de relevancia que ha reafirmado su importancia en las últimas décadas (INASE, 2020, DIEA-MGAP, 2011, Rebuffo, 2000). Una de sus limitantes es la baja capacidad de prosperar en suelos de elevada acidez (Carámbula, 2002), así la mayor parte del área sembrada se concentra en el suroeste del país. Sin embargo, existen esfuerzos recientes por incorporarla en zonas en las que históricamente ha sido menos desarrollada, así como investigación tendiente a mejorar su capacidad adaptativa a suelos con dichas limitantes (Tabares-da Rosa et al., 2019, MGAP, 2018), lo que genera un desafío en cuanto a su posible adaptación.

1.3.2. Resistencia a enfermedades

Una de las características que más puede limitar el desarrollo de esta especie es la ocurrencia de excesos hídricos (Martín et al., 2020, Basigalup, 2007). Condiciones favorables al desarrollo de enfermedades pueden reducir los rendimientos de forraje y

matar plántulas y plantas establecidas, lo que hace dificultoso el mantenimiento de sus poblaciones (Undersander, 2015).

La mayor ocurrencia de enfermedades en alfalfa corresponde al complejo de manchas foliares, el cual se compone de una diversidad de microorganismos patógenos. Este complejo genera tanto efectos directos en producción, asociados a la caída de hojas, como indirectos a través de la reducción de área foliar, lo que reduce el vigor y la generación de reservas de las plantas. Algunos de estos patógenos pueden provocar, además, lesiones en los tallos y extenderse a la corona.

En general, los cultivares seleccionados en el contexto nacional y regional poseen menores niveles de incidencia de enfermedades foliares que los ingresados de regiones como Estados Unidos y Australia, estos últimos muchas veces seleccionados en ambientes más secos (Ayala et al., 2010, Rebuffo et al., 2010).

Por otra parte, las enfermedades de raíz y corona, en general de desarrollo más lento y progresivo a medida que evoluciona la edad la pastura, son responsables de ocasionar la muerte de las plantas, reducir los rendimientos en el tiempo y disminuir la persistencia de los alfalfares (Rebuffo, 2000).

Una de las principales herramientas para el manejo de enfermedades y plagas es la elección de cultivares resistentes o tolerantes, ya que existen grandes diferencias en la severidad de los ataques en función de la genética de los materiales (Undersander, 2015, Altier et al., 2010, Ayala et al., 2010).

1.3.3. Grados de reposo y niveles de latencia

Otro carácter que imprime grandes diferencias entre cultivares, tanto morfológicas como fisiológicas y productivas, es el grado de reposo invernal. Este define la estacionalidad del forraje y, en particular, su potencial de crecimiento a bajas temperaturas.

El grado de reposo de los cultivares de *Medicago sativa* L. puede ser calculado a través de una escala establecida por Teuber et al. (1998) para los Estados Unidos. Utilizando este método estandarizado cualquier material de alfalfa puede ser clasificado en un grado de reposo, entre 1 y 11, en función del nivel de crecimiento (altura en centímetros) de las plantas luego del último corte otoñal. De este modo,

cultivares con grados de reposo mayores son cultivares que poseen un mayor crecimiento otoñal, lo que indica una latencia menos marcada o más tardía.

Los cultivares que históricamente se encuentran en la región pueden ser agrupados según sus grados de reposo en tres grupos que generan diferencias contrastantes en diversas características. Para su clasificación se utiliza el concepto de latencia invernal, que está íntimamente asociado al de grado de reposo. De este modo, los cultivares sin latencia invernal son los asociados a los mayores grados de reposo utilizados (grados 8 o 9 al 10), indicando un crecimiento más activo de estos luego del último corte otoñal. Del mismo modo, cultivares con latencia marcada son los asociados a los grados de reposo inferiores (grados 4 y 5), indicando un crecimiento muy reducido luego de realizado el último corte otoñal. Por último, se identifican los cultivares que presentan latencia intermedia (grados 6 y 7 a 8). En las evaluaciones de cultivares realizadas en Uruguay, los grados de reposo no son históricamente publicados por lo que los límites de GR que separan las agrupaciones con *latencia intermedia* y *sin latencia* no están definitivamente estipulados.

Los cultivares sin latencia suelen ser asociados a menores niveles de persistencia que los cultivares que presentan algún grado de latencia invernal. Por otro lado, existe una asociación ampliamente documentada entre los niveles de latencia o grados de reposo y algunas características morfológicas de las plantas (Carámbula, 2002, Rebuffo, 2000). En líneas generales, los materiales con niveles de latencia marcada suelen presentar coronas de mayores dimensiones que los cultivares sin latencia, cuyas coronas son de menor calibre.

Los cultivares con latencia marcada, sin embargo, han sido paulatinamente eliminados de su utilización tanto en la región (Ayala et al., 2010, Basigalup, 2007) debido a su excesivamente prolongada etapa de reposo. Por último, los mismos autores mencionan una posible asociación entre el grado de reposo y la susceptibilidad a enfermedades e indican que cultivares sin latencia suelen presentar mayores severidades en los ataques por patógenos.

1.3.4. Diversidad genética y ambiental. Efectos en el rendimiento, estabilidad y resiliencia

Las diferencias genéticas existentes a la interna de esta especie dan origen a diferencias morfológicas y fisiológicas (p. ej., profundidad de arraigamiento, reservas de carbohidratos, dinámica de los rebrotes o arquitectura de la planta, entre otras) que afectan los rendimientos de forraje y su variabilidad en el tiempo. Estas características morfológicas y fisiológicas pueden también reflejar la capacidad de las plantas de resistir situaciones de estrés biótico y abiótico. Por ejemplo, la habilidad de dos cultivares de alfalfa de resistir una sequía puede estar asociado a sus diferentes profundidades de arraigamiento, que le permitirían explorar mayores volúmenes de suelo para extraer agua (Collins et al., 2018). Es, entonces, esperable que algunos cultivares sean consistentemente más resilientes a la sequía y más estables en el largo plazo que otros, debido a diferencias consistentes en características anatómicas o fisiológicas (Liu et al., 2018). Sin embargo, las características que podrían explicar los mayores rendimientos en años normales con niveles bajos de estrés biótico y abiótico pueden ser diferentes a las responsables de lograr los mayores rendimientos en años críticos, con elevados niveles de estrés (Atlin y Frey, 1990). Por lo tanto, es esperable que el ranking de rendimiento de un cultivar bajo condiciones normales pueda no estar asociado con su ranking en condiciones marcadas de estrés o con su persistencia (Annicchiarico et al., 2015, Ayala et al., 2010, Ceccarelli et al., 1998, Ceccarelli y Grando, 1991). Esto significa que podría existir un compromiso entre intentar maximizar productividad vs. resiliencia, estabilidad o persistencia. Por último, es posible que características relacionadas con la adaptación a condiciones de estrés biótico o abiótico estén positivamente correlacionadas con la resiliencia o la estabilidad de los cultivares.

1.3.5. Cultivares de alfalfa: historia reciente

Históricamente, los esfuerzos en los programas de mejoramiento de alfalfa en el contexto global se han enfocado en mejorar la resistencia a enfermedades y plagas, la calidad de forraje y la sobrevivencia invernal en regiones más frías, pero el

mejoramiento genético de los rendimientos ha sido bajo (Li y Brummer, 2012). Lo mismo fue observado en la última década para la región (Martín et al., 2020).

En un estudio comparando cultivares de alfalfa liberados durante 5 décadas en los Estados Unidos, los cultivares más modernos con resistencia a múltiples enfermedades obtuvieron mejores desempeños solo en ambientes con elevada incidencia de enfermedades, mientras que, en ambientes en los que las pérdidas de plantas no eran significativas, los cultivares más antiguos rindieron lo mismo que los más recientes (Lamb et al., 2006). Picasso et al. (2019), por otro lado, analizando una base de datos de evaluaciones de cultivares de Norteamérica para el período 1995-2013 encontraron una asociación positiva entre el año de registro de los cultivares y su nivel de productividad.

Martín et al. (2020), evaluando las tendencias históricas para la región pampeana de Argentina, muestran que existe una tendencia significativa al incremento en la productividad de los cultivares utilizados entre 1972 y 2015, aunque esta parece alcanzar una meseta en la última década evaluada. Las variaciones a lo largo de los años se habrían dado principalmente por ingreso de nuevos materiales, por mejoras en el comportamiento general frente a enfermedades y plagas y por la reducción en el grado de reposo invernal de los materiales utilizados. Este trabajo muestra que los eventos climáticos extremos, como sequías y excesos hídricos, incidieron directamente en los niveles de productividad, con un efecto más generalizado en el caso de las sequías.

1.3.6. Alfalfa y respuesta a la variabilidad ambiental

En lo que respecta a las capacidades de esta especie para desarrollarse y producir en forma óptima, existe enorme cantidad de literatura.

Se han generado para alfalfa diversos índices que intentan clasificar la gran variabilidad genética que presenta la especie y que se relacionan con su respuesta a factores ambientales. Además de los mencionados índices que cuantifican su grado de dormancia invernal, existen cuantificaciones respecto a la resistencia de un cultivar a las condiciones extremas del invierno. Este índice, usualmente conocido como winter

hardiness (Collins et al., 2018, NAAIC, 2004), se cuantifica a partir del número de plantas individuales que sobreviven luego de pasadas las condiciones extremas del invierno.

Trabajos recientes han intentado definir, como se ha mencionado, otros parámetros relacionados con la capacidad de *Medicago sativa* L. de enfrentar las variables climáticas o ambientales. En esa dirección se encuentran los recientes trabajos de Picasso et al. (2019), Hakl et al. (2019) y otros, quienes han realizado aproximaciones respecto a la variabilidad en los rendimientos de alfalfa en función de variables ambientales en cultivos sometidos a diferentes ambientes.

Estos trabajos permiten diseñar y dirigir los caminos más convenientes a seguir en programas de mejoramiento. Hakl et al. (2019) afirman, por ejemplo, que en sitios de bajo potencial de rendimiento existe una interacción genotipo-ambiente más significativa que en sitios de mayores potenciales de rendimiento. Estos últimos serían poco indicados para realizar selección de cultivares resistentes, incluso, por ejemplo, en situaciones de escasas de precipitaciones. Por otro lado, tanto estos autores como Picasso et al. (2019) coinciden en que los cultivares de mayores rendimientos no serían los de mayores niveles de estabilidad de producción.

En Uruguay, Otero y Castro (2019) analizaron la variabilidad en la productividad estacional del forraje de alfalfa en el suroeste de Uruguay y encontraron que las mayores tasas de crecimiento se encontraron en el verano, en situaciones en las que el déficit hídrico era reducido. Estas situaciones fueron encontradas, sin embargo, en tan solo un 6 % de los veranos evaluados (1997-2011), lo que confirma la importancia de la incorporación de cultivares más resistentes a la sequía que permitirían obtener mejores desempeños en la mayor parte de los veranos.

1.4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Los objetivos de nuestro trabajo fueron (i) evaluar diferencias entre cultivares en índices de productividad, estabilidad, y resiliencia a diferentes condiciones ambientales, (ii) evaluar la relación existente entre productividad, estabilidad y resiliencia y (iii) evaluar la relación existente entre los índices calculados y otras

características de los cultivares (niveles de latencia o reposo, y resistencia a enfermedades y plagas).

En función de lo discutido en las secciones anteriores y los resultados obtenidos en el trabajo previo (Picasso et al., 2019), las hipótesis planteadas son las siguientes: 1- existen diferencias entre cultivares en productividad, estabilidad y resiliencia. 2- La productividad está negativamente correlacionada con el nivel de resiliencia y estabilidad. 3- El grado de dormancia está positivamente correlacionado con la productividad y negativamente correlacionado con la estabilidad, y el nivel de resistencia a enfermedades y plagas está positivamente correlacionado con el nivel de productividad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. BASE DE DATOS

2.1.1 Ensayos de rendimientos

Se compiló una base de datos de rendimientos de 355 cultivares de alfalfa evaluados en 129 ensayos realizados entre 1994 y 2018. Los datos comprenden 12 localidades, una en Uruguay y once en Argentina, ubicadas entre las latitudes 27° 54' y 40° 47' S. La totalidad de los sitios se encuentra por debajo de los 460 metros sobre el nivel del mar.

Inicialmente se procesaron un total de 15.115 observaciones. Cada observación corresponde a una media ajustada anual de producción de materia seca para un sitio en particular, que surge de la acumulación de todos los cortes de un ciclo, correspondiente al período 1/7 al 30/6, evaluado en 3 a 4 repeticiones.



Figura 1. Ubicación de sitios analizados (Google Maps, s. f.)

Tabla 1. Nombre del sitio, país, provincia o departamento, coordenadas geograficas aproximadas y presencia de riego suplementario de los sitios en estudio.

<i>Sitio</i>	<i>País</i>	<i>Provincia/ Departamento</i>	<i>Latitud sur</i>	<i>Longitud oeste</i>	<i>Riego</i>
Anguil	Argentina	La Pampa	36° 31'	64° 00'	NO
Concepción del Uruguay	Argentina	Entre Ríos	32° 29'	58° 20'	NO
General Villegas	Argentina	Buenos Aires	35° 02'	63° 01'	NO
Hilario Ascasubi	Argentina	Buenos Aires	39° 22'	62° 38'	SÍ
Manfredi	Argentina	Córdoba	31° 41'	63° 46'	NO
Marcos Juárez	Argentina	Córdoba	32° 41'	62° 09'	NO
Paraná	Argentina	Entre Ríos	31° 50'	60° 31'	NO
Rafaela	Argentina	Santa Fe	31° 12'	61° 30'	NO
Santiago del Estero	Argentina	Santiago del Estero	27° 48'	64° 16'	SÍ
Viedma	Argentina	Río Negro	40° 47'	63° 03'	SÍ
Villa Mercedes	Argentina	San Luis	33°39'	65° 02'	NO
La Estanzuela	Uruguay	Colonia	34° 20'	57° 42'	NO

Para Argentina se utilizó la base de datos correspondiente a la Red de Evaluación de Cultivares de Alfalfa (INTA, 2019) del período 1994-2018. Los ensayos se establecieron cada 2 años y tienen una duración de 4 años.

Para Uruguay se utilizó la base de datos correspondiente a la Evaluación Nacional de Cultivares de Alfalfa (convenio INASE-INIA) para el período 2001-2018. Los ensayos se sembraron todos los años en la estación experimental INIA La Estanzuela y tuvieron una duración de 3 años.

El tercer año de evaluación en La Estanzuela tiene una duración variable a lo largo del período en estudio. Existen algunos años en los que se realizan cortes hasta fines del tercer verano y otros en los que los ensayos son finalizados en el mes de diciembre. Para eliminar esta fuente de variación todos los cortes posteriores a diciembre del tercer año fueron excluidos.

Los ensayos son sembrados en los meses de otoño, por lo que el año 1 incluye un período de implantación en el que no se realizan cortes de materia seca. Todo el material acumulado en pie durante este período es cuantificado en el primer corte, luego del mes de julio.

En Uruguay, los rendimientos para los diferentes ciclos de especies de pasturas perennes suelen ser expresados de marzo/abril (momento de la siembra) a marzo/abril del ciclo siguiente, tanto por técnicos como por investigadores. La Evaluación nacional de Cultivares (convenio INASE-INIA), por otro lado, presenta en sus publicaciones acumulados anuales en función de cortes realizados hasta el mes de diciembre, momento en el que se realiza la presentación y divulgación de los datos.

En Argentina, los acumulados anuales publicados por la Red de Evaluación de Cultivares de Alfalfa en sus boletines —*Avances en alfalfa*— son producto de la suma de cortes agrupados en general entre los períodos 1 de julio al 30 de junio.

Para este trabajo, los acumulados anuales fueron utilizados de acuerdo con el criterio reportado en los boletines *Avances en alfalfa*. La información uruguaya fue, por tanto, adaptada a dicho formato de acumulación.

Para reducir la posibilidad de basar conclusiones sobre cultivares con información muy reducida, se utilizaron en el análisis únicamente variedades para las que se contó con al menos dos ensayos para un sitio dado. Esto dejó 9.552 observaciones para todo el conjunto de datos.

2.1.2 Caracterización de cultivares

Cada cultivar fue caracterizado a partir de información publicada por los institutos de investigación agropecuaria INTA e INIA. Las variables utilizadas para la caracterización se describen a continuación.

En los ensayos argentinos, el grado de reposo es originalmente provisto por las compañías semilleristas. Para los análisis se utilizó también el criterio regional que clasifica a los cultivares en 3 niveles de latencia: con latencia, con latencia intermedia y sin latencia.

Los 58 cultivares que son parte de los análisis finales se encuentran únicamente en los grupos de latencia intermedia y sin latencia (grados 6 al 10). La red de evaluación de cultivares de alfalfa en Argentina clasifica los cultivares de GR 6 y 7 como cultivares con latencia intermedia y los de GR 8 a 10 como cultivares sin latencia. Históricamente la clasificación según grados de reposo no ha sido

formalmente utilizada en el Uruguay en la publicación de los resultados de la evaluación de cultivares (convenio INASE-INIA). En líneas generales, cultivares clasificados como grados de reposo 8 podrían ser considerados tanto materiales de latencia intermedia como materiales sin latencia. Para nuestros análisis utilizamos ambas modalidades, de modo de evaluar qué criterio genera conjuntos más homogéneos respecto a las variables aquí evaluadas. Se generaron, por lo tanto, dos análisis repetidos, teniendo en cuenta los dos posibles agrupamientos en función de donde se ubicaban los cultivares de GR 8.

Asimismo, los materiales fueron clasificados con información publicada de niveles de resistencia a enfermedades y plagas (INTA, 2019). Se utilizó información de comportamiento frente a los pulgones moteados (*Therioaphis maculata*), verdes (*Acyrtosiphum pisum*) y azules (*A. kondoi*) y a las enfermedades fitóftora (*Phytophthora megasperma f sp medicaginis*), fusariosis (*Fusarium oxysporum f sp medicaginis*) y antracnosis (*Colletotrichum trifolii*).

2.1.3 Caracterización climática

Para cada sitio se utilizaron los registros climáticos de todo el período, que permitieron caracterizar los años crisis. Los datos de INIA La Estanzuela fueron obtenidos del banco de datos agroclimático de INIA (INIA, 2020). Se obtuvieron datos de precipitaciones y media anual de evapotranspiración de referencia (ETR, método Penman-Monteith) para el período 2001-2018. Para los sitios ubicados en Argentina, los datos de precipitación fueron obtenidos de las publicaciones *Avances en alfalfa* (INTA, 2019), mismas publicaciones de las que se obtuvo la información de rendimientos de los ensayos. Para los períodos con faltantes de información, esta fue complementada con datos tomados del Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica, SIGA (INTA, 2020).

Para los sitios argentinos, la información de ET_0 fue obtenida a partir de la utilización en software QGIS (QGIS Development Team, 2020) de mapas geográficos presentes en los servicios WMS generados por Bianchi y Cravero (2010). En esta cartografía se presenta la evaporación calculada a partir del procesamiento digital de

mapas continuos de temperatura utilizando el método de Thornthwaite (1948). La evapotranspiración anual fue calculada a partir de la suma de la ET₀ mensual climática.

2.2. METODOLOGÍA

2.2.1. Identificación y caracterización de años crisis

Se identificaron inicialmente los años crisis para cada sitio. Un año crisis es aquel año en el que los rendimientos se ven drásticamente reducidos. Para la definición de un año crisis en este trabajo se seleccionó un grupo representativo de cultivares con elevada acumulación de información para el período estudiado, a los que llamaremos cultivares testigo. El grupo fue de 4 cultivares para Argentina y 2 cultivares para Uruguay. A continuación, se listan los materiales que fueron utilizados como testigo.

Tabla 1. Cultivares testigo, período de años con datos de producción, cantidad de observaciones (N) y grado de reposo del cultivar (GR).

Cultivar	Período con datos (desde-hasta)	N	GR
Monarca sp inta	1994-2018	452	8
Victoria sp inta ¹	1994-2011	213	6
Verdor	2004-2016	198	7
Wl 611 ²	2004-2018	192	6
Estanzuela Chaná ³	2001-2018	153	8
Crioula ³	2001-2018	135	7

¹Ausente en sitios con riego. ² Ausente en Santiago del Estero. ³ Tomado como parámetro únicamente en Estanzuela.

Para este grupo de cultivares se calculó el rendimiento medio anual de mínimos cuadrados (Y_{ijk}) para cada año y cada sitio, utilizando un modelo con año (A_i) como efecto fijo y cultivar (C_j) y edad del ensayo (E_k) como efectos aleatorios:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + C_j + E_k + \varepsilon_{jkl}$$

A continuación, calculamos la media de producción anual ajustada por sitio de todo el período (Y_{ijkl}), utilizando un modelo con sitio como efecto fijo (S_l) y cultivar (C_j), edad del stand (E_k), año (A_i) e interacción año-edad ($E * A$) como efectos aleatorios. Los efectos aleatorios fueron anidados dentro del sitio:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_l + A(S)_{il} + C(S)_{lj} + E(S)_{kl} + [E * A](S)_{ikl} + \varepsilon_{ijkl}$$

En el trabajo realizado por Picasso et al. (2019), la severidad media de las crisis obtenidas fue de 0,38, lo que significa una caída de los rendimientos de los ensayos de un 38 % en el promedio de los años crisis. Con base en esto y utilizando el rendimiento medio de cada sitio como parámetro, definimos en nuestro trabajo un año crisis como aquel en el que el rendimiento medio calculado para el grupo representativo de cultivares mostró una reducción del 40 % o más. El resto de los años fueron considerados como años normales.

Existe un permanente recambio de los cultivares sembrados en los ensayos a lo largo del período en evaluación. Utilizar un grupo de cultivares representativos a lo largo de todo el período nos permitió asegurarnos de que las caídas en los rendimientos encontradas en un ciclo de evaluación no fueron debidas al conjunto particular de cultivares evaluados durante ese ciclo. Utilizar únicamente un cultivar testigo implicaría, por otro lado, el riesgo de detectar una crisis generada por un efecto puntual sobre un único genotipo.

Los primeros cuatro cultivares presentados en la tabla 1 fueron utilizados como testigos en los 11 sitios ubicados en Argentina. Los últimos dos cultivares fueron los utilizados como testigos para INIA La Estanzuela (Uruguay).

Los grados de reposo (GR) son los presentados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 2019). Monarca a lo largo de la historia fue clasificada dependiendo del ensayo como 8 y como 9, del mismo modo, Verdor fue clasificado como GR7 y como GR8. En ambos casos, la mayor parte de los años y, coincidentemente, su clasificación más reciente, es la que se menciona en la tabla 1. Ésta es la que fue utilizada también en los análisis realizados.

Cada año crisis fue clasificado en función de la diferencia entre las lluvias y la evapotranspiración de referencia media anual (INIA, 2020, Bianchi y Cravero, 2010). Años con valores negativos en este índice fueron clasificados como sequías, años con valores entre 0 y 150 mm fueron definidos como neutros y años con valores de más de 150 mm fueron clasificados como excesos hídricos. El objetivo fue clasificar las crisis con el fin de determinar las posibles particularidades meteorológicas causantes de la

reducción detectada en los rendimientos y calcular subíndices de resiliencia relacionados a cada contingencia.

2.2.2. Cálculo de índices

Se calcularon dentro de cada sitio los siguientes índices por cultivar:

Productividad: se define como la media de rendimiento para el cultivar j en el sitio l en todos los años normales (n° de años totales - n° de años crisis) (figura 2a). A mayor rendimiento medio, mayor será la productividad:

$$P_{jl} = \frac{\sum_i^{n-(n^{\circ}crisis)} Y_{ijl}}{n - (n^{\circ}crisis)}$$

Estabilidad: se define en función de la productividad y su desvío estándar. Cuanto menor es la variabilidad de la productividad, más estable es el cultivar (figura 2b):

$$S_{jl} = \frac{P_{jl}}{\sigma_{(jl)}}$$

Donde P_{jl} es la productividad, arriba definida, y $\sigma_{(jl)}$ su desvío estándar.

La definición de estabilidad fue modificada de la metodología original (Picasso et al., 2019), en la que el denominador de la fórmula era el error estándar (SE) del cálculo de la productividad. Este estadístico tiene la desventaja de estar influenciado por el n que genera al valor de productividad. Por esto, la fórmula original tendría el riesgo de calcular valores mayores de estabilidad a cultivares que simplemente estuvieron un mayor número de años en evaluación.

La nueva fórmula de estabilidad es igual a la antigua dividida por la raíz cuadrada de n :

$$S_{jl} = \frac{P_{jl}}{SE(P_{jl})} / \sqrt{n} = \frac{P_{jl}}{\sigma_{(jl)}}$$

Resiliencia: se calcula como: $R_{jl} = \frac{Y_{cjl}}{P_{jl}}$

Donde Y_{cjl} es el rendimiento en cada uno de los años crisis para el cultivar j en el sitio l . Por lo que cuanto mayor sea el rendimiento de un cultivar en el año crisis en cuestión, mayor es su resiliencia. Esta es expresada como la proporción de la productividad que es alcanzada en el año crisis (figura 2c). Obsérvese que se puede definir más de un año crisis por sitio. Esta definición de resiliencia es un índice, sin unidad.

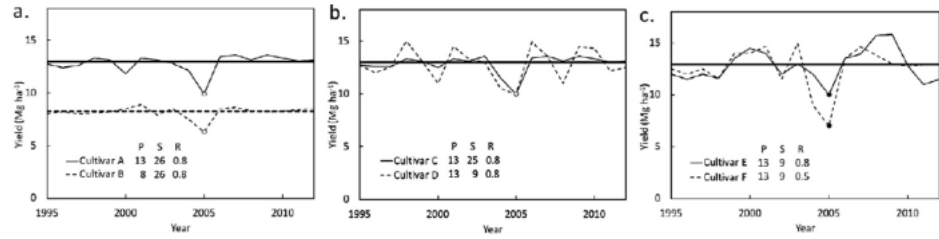


Figura 2. Rendimiento a lo largo del tiempo para dos cultivares contrastantes en productividad (a), estabilidad (b) y resiliencia (c). Adaptado de Picasso et al. (2019).

Un último índice calculado es la severidad de la crisis. A diferencia de los anteriores, este no se calcula por cultivar, sino que su función es la de caracterizar al año crisis.

Severidad de la crisis:

$$CS_l = 1 - \frac{Y_{C_l}}{P_l}$$

Siendo P_l la media ajustada de productividad del sitio l para los cultivares parámetro y Y_{C_l} la media de rendimiento para los cultivares parámetro de ese sitio durante el año crisis. De este modo, un valor de CS_l más elevado indica una mayor severidad de la crisis.

2.2.3. Análisis y modelos estadísticos

Se calcularon las medias ajustadas de rendimiento para cada cultivar por sitio y año utilizando un modelo con cultivar y edad de la pastura como efectos fijos: $Y_{jk} = \mu + C_j + E_k + \varepsilon_{jk}$ siendo C_i el efecto del cultivar i y E_j el efecto de la edad j . Para calcular la productividad y estabilidad del cultivar en un sitio se estimaron, en cada sitio, las medias ajustadas de rendimiento en los años normales, utilizando un modelo con año y cultivar como efectos fijos $Y_{ij} = \mu + A_i + C_j + \varepsilon_{ij}$ siendo A_i el efecto del año i y C_j el efecto del cultivar j . Luego de identificados los años crisis, se calcularon los valores de resiliencia para cada cultivar, en cada sitio, como se describió anteriormente.

El conjunto de datos obtenido luego del cálculo de los valores individuales de resiliencia fue de 596 valores de resiliencia, 104 cultivares y 9 sitios. Para evaluar la hipótesis de que existen diferencias consistentes entre cultivares a través de los diferentes sitios, los índices de productividad, estabilidad y resiliencia calculados para cada sitio fueron analizados con un modelo considerando el cultivar y sitio como efectos fijos. Para estos análisis se incluyeron únicamente cultivares con más de 3 valores de resiliencia, lo que dejó un total de 532 medias de 59 cultivares.

Además de la resiliencia general descrita anteriormente, se calcularon medias de resiliencia vinculadas a sequías y excesos hídricos. Utilizando la clasificación meteorológica de los años crisis descrita previamente, se calcularon las medias ajustadas para 3 subtipos particulares de resiliencia. Para esto se utilizaron los mismos modelos antes descritos. Se obtuvieron, de este modo, medias de resiliencia relacionadas a sequías, a excesos y a un tercer grupo no relacionado al balance lluvia - ET_0 calculado (*neutro*). En adelante, nos referimos a estas variables como R sequía, R exceso, R neutro.

Se realizaron pruebas de comparaciones múltiples (Tukey) para las medias de cada cultivar con el objetivo de identificar los cultivares con superior desempeño en cada uno de los índices.

Para evaluar el grado de asociación entre los índices calculados, se ajustaron regresiones lineales entre las medias ajustadas de productividad, estabilidad y los 4 tipos de resiliencia.

2.2.4. Variables calculadas vs. otras características del cultivar

Se analizaron las asociaciones entre cada una de las variables calculadas y otras características del cultivar. Para esto se ajustaron las regresiones lineales simples entre aquellas y los valores de grado de reposo, agrupamientos en niveles de latencia, niveles de resistencia a enfermedades y niveles de resistencia a pulgones. Se realizaron también análisis de varianza utilizando modelos con cada una de las diferentes características del cultivar como efectos fijos (ej., resistencia a enfermedades, grado de latencia, etc.) y el cultivar anidado dentro de la característica en cuestión como efecto aleatorio $Y_{je} = \mu + R_e + C(R)_{je} + \varepsilon_{ei}$ siendo R_e el efecto la característica e del cultivar (por ejemplo, nivel de resistencia a enfermedades registrada para el cultivar) y $C(R)_{ie}$ el efecto del cultivar anidado dentro de dicho carácter. Finalmente, se realizaron pruebas de comparación de medias (Tukey) para evaluar diferencias entre los grupos analizados.

En Uruguay, los grados de reposo no han sido históricamente utilizados de forma generalizada en el país. En este sentido, mejoradores de alfalfa en el ámbito nacional y responsables de los ensayos de evaluación de cultivares mencionan que los grados de reposo 7 serían cultivares con latencia intermedia, y los grados de reposo 9 cultivares sin latencia (Castro, M. com. pers., 2019). A nuestro entender los cultivares caracterizados en origen como grados de reposo 8 no generarían un consenso completo respecto a estas dos agrupaciones. Por esto, los análisis en función del nivel de latencia fueron realizados tanto incluyendo los cultivares con GR 8 en el grupo de los cultivares con latencia intermedia como en el grupo de los cultivares sin latencia, como es norma en Argentina. Se evalúa posteriormente qué grupo genera diferencias más contrastantes en las variables estudiadas con el objetivo asociado de confirmar qué agrupamiento generaría conjuntos más homogéneos para nuestra región.

Por último, se realizaron a la interna de los grados de reposo y niveles de latencia análisis para evaluar la existencia de diferencias significativas entre cultivares

pertenecientes a cada subgrupo para las variables en estudio. Estos consideraron cultivar y sitio como efectos fijos.

Los análisis y el procesamiento de los datos fueron realizados con el software estadístico SAS (version 9.4; SAS Institute Inc., Cary, NC, EE. UU.).

3. RESULTADOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS Y AÑOS CRISIS

La caracterización climática y el promedio de rendimientos históricos para los cultivos testigo en los doce sitios evaluados se presenta en la tabla 2. Hilario Ascasubi, Manfredi y Viedma no presentaron años crisis con la metodología utilizada, por lo que no fue posible realizar cálculos de resiliencia en estas localidades. Por tanto, del total de sitios iniciales, solo nueve fueron incluidos en los análisis finales, ocho de ellos con información de ensayos realizados en secano y uno (Santiago del Estero) con información de ensayos que incluyen riego suplementario.

Tabla 2. Sitio experimental, país, provincia o departamento, media anual de temperatura (T), media anual de precipitaciones (pp), media anual de evapotranspiración (ET₀), número de años con información de rendimientos de alfalfa (n) y productividad media de cultivos testigo.

Sitio	País	Provincia o depto.	Riego	T (° Celcius)	pp (mm/año)	² ET ₀ (mm/año)	n	Productividad media alfalfa (t/ha)
Anguil	Argentina	La Pampa	No	15,6	763	790	24	5,8
Concepción del Uruguay	Argentina	Entre Ríos	No	18,3	1188	913	22	7,5
General Villegas	Argentina	Buenos Aires	No	16,5	855	795	23	13,2
Hilario Ascasubi ¹	Argentina	Buenos Aires	Si	15,1	469	767,5	20	17,4
Manfredi	Argentina	Córdoba	No	16,8	753	885	22	9,4
Marcos Juárez	Argentina	Córdoba	No	18,0	800	898	20	20,7
Paraná	Argentina	Entre Ríos	No	18,8	1104	930	21	10,6
Rafaela	Argentina	Santa Fe	No	18,7	987	953	22	12,4
Santiago del Estero ¹	Argentina	Santiago del Estero	Si	20,4	600	1065	24	16,1
Viedma ¹	Argentina	Rio Negro	Si	14,9	339	740	8	18,4
Villa Mercedes	Argentina	San Luis	No	15,7	730	790	21	9,2
La Estanzuela	Uruguay	Colonia	No	17,0	1153	1166	18	10,6

¹ Sitios con riego. ² Calculada en función de método Thornthwaite para sitios de Argentina (Bianchi y Cravero, 2010) y calculada en función del método Penman-Monteith para Uruguay (INIA, 2020).

Hay una diversidad de sitios en lo que respecta a la caracterización climática y los potenciales de rendimiento de alfalfa. La media de producción anual para los sitios con riego varía entre 16,1 y 18,4 t MS ha⁻¹, siendo notoriamente superior a la media para los sitios sin riego suplementario, con la excepción de los rendimientos presentes

en Marcos Juárez (Córdoba), sitio de mayores rendimientos medios de los evaluados en nuestro trabajo. El resto de los sitios con ensayos en secano presentan medias anuales de producción que varían entre las 5,8 y las 13,2 t MS ha⁻¹.

La temperatura media anual de los sitios incluidos en los análisis finales varía entre 15,6 y 20,4 °C y la precipitación media anual entre 600 y 1188 mm. Los valores de evapotranspiración de Thornthwaite (Argentina) varían entre 790 y 1065 mm/año y la ET₀ de Penman-Monteith utilizada en Uruguay presenta valores superiores, de 1166 mm/año.

El promedio de años en evaluación para estos 9 sitios fue de 22 años variando entre 18 y 24 años de acumulación. La media ajustada de productividad para los 9 sitios utilizados en los análisis finales fue de 11,8 t MS ha⁻¹, variando entre 5,8 t MS ha⁻¹ (Anguil) y 20,7 t MS ha⁻¹ (Marcos Juárez).

Se identificaron 21 crisis en 9 de los 12 sitios evaluados. La media para severidad de las crisis varió entre 0,4 y 0,74 con una media de 0,51 (tabla 3). Debido a la presencia de riego suplementario, las crisis encontradas en Santiago del Estero fueron definidas como neutras. Del total de 21 crisis utilizadas, 9 se clasificaron como sequías, 8 como neutras y 5 como excesos.

Tabla 3. Sitios, años crisis, tipo y severidad de la crisis y diferencia lluvia menos ET_0 utilizado para caracterizar el tipo de crisis.

<i>Sitio</i>	<i>Año crisis</i>	<i>Tipo de crisis</i>	<i>Severidad de la crisis</i>	<i>lluvia -ET_0</i>
Anguil	1994	Sequía	0,59	-225
Anguil	2006	Sequía	0,40	-181
Anguil	2007	Sequía	0,57	-138
Anguil	2008	Sequía	0,74	-231
Anguil	2009	Exceso	0,60	227
Anguil	2011	Sequía	0,47	-187
Concepción del Uruguay	2008	Neutro	0,42	90
Concepción del Uruguay	2010	Neutro	0,51	27
La Estanzuela	2007	Sequía	0,43	-403
La Estanzuela	2010	Sequía	0,66	-384
General Villegas	2016	Exceso	0,64	335
Marcos Juárez	2001	Neutro	0,40	78
Paraná	1999	Exceso	0,46	480
Paraná	2005	Sequía	0,41	-139
Paraná	2015	Exceso	0,48	369
Rafaela	2009	Neutro	0,41	111
Rafaela	2014	Exceso	0,63	179
Santiago del Estero ¹	1994	Neutro	0,43	-547
Santiago del Estero ¹	1999	Neutro	0,47	-327
Villa Mercedes	2011	Sequía	0,46	-118
Villa Mercedes	2015	Neutro	0,59	128

¹ sitio con riego

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS CULTIVARES

La productividad anual promedio de los cultivares a través de los sitios varió entre 11,5 y 14,0 t MS ha⁻¹ observándose diferencias significativas entre cultivares ($p < 0,01$) (tabla 4). La media de estabilidad de los cultivares evaluados incluidos en los análisis finales varió entre 3,8 y 24,6 encontrándose diferencias entre cultivares ($p < 0,01$). La media general de resiliencia para los cultivares a través de los 9 sitios no presentó diferencias estadísticamente significativas entre cultivares ($p = 0,55$). La comparación de los valores de resiliencia separados en función de las características meteorológicas presentes en los años crisis tampoco presentaron diferencias estadísticamente significativas entre cultivares (R sequía, $p = 0,94$; R exceso $p = 0,79$, R neutro $p = 0,33$). Las medias ajustadas de las variables estimadas para todos los cultivares que presentaron más de 3 valores de resiliencia se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Medias de productividad (t MS ha⁻¹), estabilidad, resiliencia general, resiliencia a la sequía, resiliencia a exceso hídrico, número de medias utilizadas en cada variable

(ng, ns, ne, nn) y grado de reposo (GR) para 59 cultivares de alfalfa evaluados en Uruguay y Argentina. L= número de localidades usadas para cada cultivar. Medias seguidas por la misma letra no son diferentes ($\alpha = 0,05$)

cultivar	ng	L	Productividad		Estabilidad		R general	R sequía	ns	R exceso	ne	R neutro	nn	GR
5681	8	4	12,3	BCD EF	4,1	C	0,5	0,6	4	0,2	2	0,6	2	7
5939	9	5	13,0	ABC DEF	4,6	C	0,5	0,6	4	0,3	2	0,5	3	9
aca_605	12	6	12,4	BCD EF	3,9	C	0,5	0,6	4	0,5	4	0,5	4	6
aca_903	9	5	12,6	ABC DEF	5,5	C	0,5	0,6	2	0,4	3	0,6	4	9
alfa_70	7	4	12,2	BCD EF	4,4	C	0,5	0,6	3	0,2	2	0,7	2	7
andina	8	3	13,1	ABC DEF	5,8	B C	0,5	0,7	4	0,4	1	0,4	3	6
armona	10	7	12,5	ABC DEF	4,6	C	0,5	0,6	3	0,4	4	0,5	3	8
bacana	7	5	13,2	ABC DEF	5,6	B C	0,5	0,6	5	0,4	1	0,5	1	9
bar_pal_10	7	4	12,9	ABC DEF	6,0	B C	0,6	0,6	3	0,4	1	0,8	3	10
baralfa_85	9	4	12,7	ABC DEF	4,3	C	0,6	0,7	5	0,5	1	0,6	3	8
baralfa_9242	10	5	13,0	ABC DEF	4,9	C	0,6	0,6	6	0,4	1	0,7	3	9
barbara_sp_inta	9	6	13,3	ABC DE	4,7	C	0,5	0,6	3	0,3	2	0,6	4	9
cuf_101	5	4	12,0	ABC DEF	6,2	B C	0,5	0,6	1	0,3	1	0,6	3	9
cw_1010	9	4	13,5	ABC D	5,7	C	0,5	0,7	5	0,4	2	0,5	2	10
cw_194	8	4	13,5	ABC D	6,0	B C	0,6	0,6	3	0,4	2	0,7	3	9
cw_620	13	6	12,2	CDE F	4,6	C	0,5	0,5	5	0,6	4	0,5	4	6
cw_660	4	4	13,8	ABC DE	5,0	B C	0,5		,	0,5	3	0,6	1	6
cw_830	9	4	13,5	ABC D	6,1	B C	0,6	0,7	5	0,4	2	0,6	2	8
dk_166	6	3	12,0	BCD EF	4,8	C	0,4	0,5	3	0,2	2	0,6	1	6
dk_191	8	5	13,1	ABC DEF	5,2	C	0,5	0,7	3	0,4	2	0,5	3	9
dk_194	8	3	13,4	ABC DE	7,2	B C	0,6	0,6	4	0,5	1	0,7	3	9
don_enrique	8	4	12,1	CDE F	4,5	C	0,4	0,5	3	0,4	2	0,3	3	6
ebc_90	8	4	13,0	ABC DEF	5,5	C	0,6	0,7	3	0,4	2	0,6	3	9
franca	9	4	12,8	ABC DEF	5,0	C	0,5	0,6	5	0,4	1	0,5	3	8
g_969	12	6	12,8	ABC DEF	5,1	C	0,5	0,6	4	0,4	4	0,6	4	9
garufa	9	4	12,2	BCD EF	6,2	B C	0,5	0,6	5	0,3	1	0,4	3	6
lps_8500	11	6	13,4	ABC D	5,5	C	0,5	0,6	3	0,4	4	0,7	4	9
lps_9500	9	5	13,2	ABC DE	5,4	C	0,6	0,7	3	0,5	3	0,6	3	9
magna_601	9	4	11,8	EF	24,6	A	0,5	0,6	5	0,4	1	0,4	3	6
magna_804	8	4	13,6	ABC D	4,0	C	0,6	0,7	6	0,5	1	0,5	1	8
mecha	8	5	13,2	ABC DE	6,9	B C	0,6	0,6	4	0,3	1	0,7	3	9
medina	8	4	12,4	ABC DEF	5,1	C	0,5	0,6	4	0,4	2	0,5	2	8
milonga_ii	10	4	13,3	ABC DE	5,0	C	0,6	0,7	5	0,5	2	0,7	3	9
mireya	9	4	13,2	ABC DE	4,4	C	0,6	0,6	5	0,4	1	0,6	3	10
monarca_sp_inta	19	8	12,8	ABC DEF	4,8	C	0,5	0,6	7	0,3	5	0,6	7	8
p5681	7	4	12,7	ABC DEF	11,9	B	0,4	0,6	3	0,5	1	0,3	3	7

pampa_flor	4	3	11,5	DEF	5,5	B C	0,7	0,8	3	0,4	1	.	6	
panalfa_90	8	4	13,6	ABC D	5,8	B C	0,5	0,6	3	0,4	2	0,6	3	9
patriarca	6	5	13,1	ABC DEF	4,8	C	0,5	0,8	2	0,4	2	0,6	2	9
pf_9000	9	5	13,6	ABC D	6,3	B C	0,6	0,7	2	0,4	3	0,7	4	9
pintado	9	4	12,0	DEF	5,9	B C	0,5	0,6	5	0,6	1	0,4	3	6
pro_inta_carmina	8	4	12,4	ABC DEF	5,6	B C	0,6	0,6	4	0,4	1	0,7	3	8
pro_inta_lujan	14	7	13,2	ABC DE	4,4	C	0,5	0,5	7	0,5	4	0,5	3	6
pro_inta_mora	11	5	13,2	ABC DE	5,4	C	0,6	0,7	4	0,4	3	0,6	4	9
pro_inta_patricia	12	7	13,7	AB	4,4	C	0,5	0,6	5	0,4	4	0,5	3	7
pro_inta_super_mo	12	6	13,0	ABC	5,0	C	0,5	0,7	4	0,4	4	0,6	4	8
narca	6	5	12,3	DEF	4,6	C	0,5	0,7	2	0,3	2	0,5	2	9
queen_910				ABC										
regina	9	5	12,5	ABC DEF	4,1	C	0,4	0,6	2	0,4	3	0,4	4	6
salina_pv	7	3	12,9	ABC DEF	5,9	B C	0,6	0,6	2	0,4	2	0,7	3	9
sofia	7	3	13,1	ABC DEF	4,6	C	0,6	0,8	4	0,6	2	0,5	1	8
venus	7	4	12,3	ABC DEF	4,3	C	0,5	0,5	3	0,2	2	0,7	2	6
verdor	11	5	12,9	ABC DEF	4,6	C	0,6	0,6	6	0,5	2	0,6	3	8
verzy	10	4	11,6	F	3,8	C	0,5	0,6	5	0,5	2	0,4	3	6
victoria_sp_inta	12	5	12,3	BCD EF	4,2	C	0,5	0,6	6	0,2	2	0,6	4	6
villa	10	5	13,1	ABC DEF	4,9	C	0,6	0,6	6	0,3	1	0,6	3	9
wl_1058	11	6	13,9	A	5,1	C	0,5	0,6	3	0,4	4	0,6	4	10
wl_611	13	6	12,9	ABC DEF	4,4	C	0,5	0,5	5	0,5	4	0,4	4	6
wl_818	7	6	13,8	ABC	7,2	B C	0,5	0,7	2	0,5	3	0,5	2	8
wl_903	10	4	14,0	A	4,9	C	0,5	0,6	5	0,4	2	0,6	3	9

La media para los valores de R general, sequía, excesos y neutral fue de 0,53, 0,62, 0,40 y 0,56, respectivamente.

3.3. ASOCIACIÓN ENTRE VARIABLES CALCULADAS

Se estudió el grado de asociación entre las variables calculadas a través del ajuste de 15 regresiones lineales entre los valores de productividad y estabilidad y los diferentes tipos de resiliencia (tabla 5). Se observa una asociación positiva y significativa entre el nivel de productividad y la resiliencia del cultivar ($p < 0,01$). Esta asociación continúa siendo significativa cuando las medias de resiliencia son agrupadas en crisis asociadas a sequía y a condiciones *neutras* ($p < 0,01$ y $p = 0,02$, respectivamente). La asociación lineal de la variable productividad con la resiliencia asociada a excesos hídricos fue marginalmente significativa ($p = 0,06$).

La estabilidad no se asoció significativamente con ninguna de las otras variables calculadas.

La asociación entre resiliencia general y los diferentes subtipos de resiliencia también fue significativa y positiva. La resiliencia a sequías estuvo positivamente asociada a los valores de resiliencia a excesos; sin embargo, la asociada a condiciones definidas aquí como neutras mostró una asociación negativa con la asociada a excesos (aunque con un $r = -0,32$) y una asociación no significativa con los valores de resiliencia a condiciones de déficit hídrico.

Tabla 5. Valor de probabilidad de significancia para el parámetro de pendiente de regresiones lineales (arriba, derecha) y valor de coeficiente de correlación de Pearson r (abajo, izquierda).

	Productividad	Estabilidad	Resiliencia	R sequía	R exceso	R neutro	Grado reposo	Latencia	Pulgones	Enfermedades	Sanidad
Productividad		0,23	<0,01	<0,01	0,06	0,02	<0,01	<0,01	0,32	0,11	0,24
Estabilidad			0,67	0,62	0,45	0,25	0,45	0,39	0,74	0,57	0,96
Resiliencia	0,5			<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,62	0,21	0,33
R sequía	0,44		0,68		0,01	0,2	<0,01	<0,01	0,28	0,74	0,75
R exceso			0,37	0,33		0,02	0,96	0,61	0,82	0,61	0,49
R neutro	0,3		0,58		-0,32		<0,01	<0,01	0,92	0,08	0,06
Grado reposo	0,61		0,6	0,48		0,58		<0,01	0,1658	0,02	0,05
Latencia	0,55		0,61	0,51		0,52	0,89		0,1467	<0,01	0,04
Pulgones										<0,01	<0,01
Enfermedades							0,32	0,39	0,55		<0,01
Sanidad								0,28	0,79	0,77	

3.4. ASOCIACIÓN ENTRE VARIABLES CALCULADAS Y OTRAS CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVAR

El ajuste de regresión utilizando el grado de reposo como variable independiente mostró asociaciones lineales significativas y positivas con el nivel de productividad, resiliencia, resiliencia a sequías y resiliencia asociada a condiciones neutras.

Grados de reposo mayores mostraron una tendencia a estar asociados a mayores niveles tanto de productividad como de los 3 tipos de resiliencia. La estabilidad no mostró asociación lineal significativa con los grados de reposo (tabla 5 y figura 3).

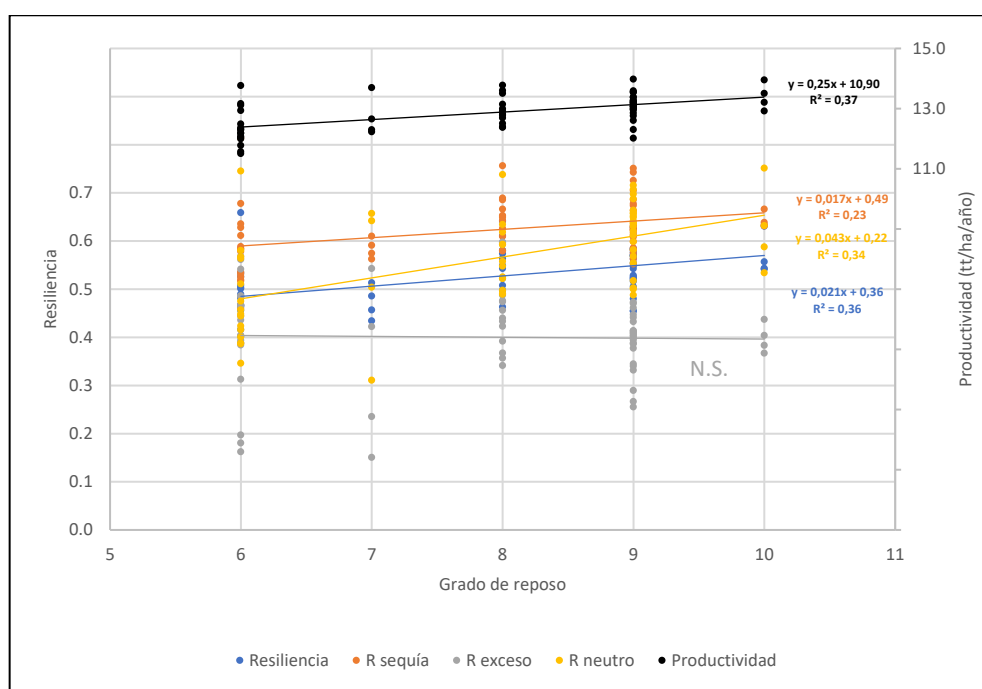


Figura 3. Resiliencia general, a sequías, a excesos, y neutra y productividad en función del grado de reposo para cultivares de alfalfa evaluados en 11 sitios de Argentina y 1 de Uruguay.

En la tabla 6 se muestran los valores de medias ajustadas de los grados de reposo 6 al 10 para las variables estudiadas.

Tabla 6. Medias ajustadas y errores estándar (ES) de productividad y resiliencias en función del grado de reposo (GR). Medias seguidas por la misma letra no son estadísticamente diferentes ($\alpha = 0,05$)

	<i>Productividad</i>		<i>R general</i>		<i>R sequia</i>		<i>R neutro</i>	
<i>GR</i>	<i>Media</i>	<i>ES</i>	<i>Media</i>	<i>ES</i>	<i>Media</i>	<i>ES</i>	<i>Media</i>	<i>ES</i>
10	13,4a	0,3	0,57a	0,03	0,65	0,02	0,63a	0,04
9	13,1a	0,1	0,55a	0,01	0,64	0,03	0,62a	0,01
8	13,0a	0,1	0,54a	0,01	0,64	0,01	0,57ab	0,03
7	12,7ab	0,3	0,48b	0,01	0,59	0,02	0,53ab	0,04
6	12,4b	0,1	0,47ab	0,03	0,58	0,03	0,48b	0,02

Los análisis de varianza para evaluar diferencias entre cultivares a la interna de los GR fueron significativos para la variable productividad en todos los GR ($p < 0,01$) y no fueron significativos para ningún tipo de resiliencia. A la interna de las agrupaciones por nivel de latencia (con latencia intermedia y sin latencia) también existieron diferencias significativas para la variable productividad en ambos grupos de latencia ($p < 0,01$) y no hubo diferencias entre cultivares para la variable resiliencia, o sus subtipos, a la interna de los grupos de latencia.

Como es lógico, el mismo grado de asociación encontrado para los GR se hizo evidente cuando se ajustaron las regresiones en función de los dos grupos de latencia utilizados regionalmente (con reposo intermedio y sin reposo) en sus dos posibles versiones. Se observa, de este modo, una asociación positiva y significativa para las mismas variables encontradas al utilizar los grados de reposo (productividad, R general, R sequía y R neutro).

El análisis de varianza y posterior prueba de comparación de medias (Tukey 5 %) utilizando estos agrupamientos también permite detectar diferencias estadísticamente significativas en todos los casos, excepto para resiliencia asociada a sequías cuando el GR 8 es clasificado como de latencia intermedia. Las medias ajustadas para las 4 variables se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Medias de productividad (P) y diferentes tipos de resiliencia (R general, R neutro y R sequía) en función del nivel de latencia, utilizando dos criterios de agrupación diferentes.

<i>Nivel de latencia (GR)</i>	<i>P</i>	<i>SE</i>	<i>R general</i>	<i>SE</i>	<i>R neutro</i>	<i>SE</i>	<i>R sequía</i>	<i>SE</i>
Sin latencia (GR: 8, 9 y 10)	13,1a	0,1	0,55a	0,01	0,60a	0,01	0,64a	0,01
L. intermedia (GR: 6 y 7)	12,5b	0,1	0,49b	0,01	0,49b	0,02	0,59b	0,01
Sin latencia (GR: 9 y 10)	13,1a	0,1	0,55a	0,01	0,62a	0,02	-	-
L intermedia (GR: 6, 7 y 8)	12,7b	0,1	0,51b	0,01	0,53b	0,02	-	-

Las regresiones entre las variables calculadas y los índices de caracterización sanitaria de los cultivares no fueron significativas. No se encontró asociación entre los niveles registrados de resistencia a enfermedades de raíz y corona, ni entre los niveles de resistencia a diferentes tipos de pulgones y los niveles de productividad, estabilidad o resiliencia calculados.

4. DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DE SITIOS Y AÑOS CRISIS

Se destaca la sequía como la principal causa en la ocurrencia de años crisis, coincidiendo con lo obtenido para el trabajo previo en América del Norte (Picasso et al., 2019). Si bien el clima en ambas regiones posee características marcadamente diferentes, en ambas aparecen las deficiencias hídricas como el factor más probable en generar fuertes reducciones en los rendimientos de alfalfa. Lo anterior se da a pesar de la destacada capacidad de esta especie, en comparación con otras forrajeras, de producir en condiciones de disponibilidad hídrica reducida gracias a diversos mecanismos genéticos, fisiológicos y anatómicos (Quan et al., 2016), así como a su extensamente documentado sistema radicular (Jung y Larson, 1972).

La ET_0 para los sitios de Argentina, a partir del método Thornthwaite (1948), varía entre 790 y 1065 mm. En Uruguay, la información (a partir del método Penman-Monteith) presenta un valor comparativamente superior a los utilizados en Argentina. Diversos trabajos muestran diferencias en los valores de ET_0 estimados a partir de

ambos métodos. El método de Thornthwaite si bien tiene una buena correlación con el método de Penman-Monteith, es una metodología menos precisa que, dependiendo de las regiones en estudio y sus características, puede sobre- o subestimar los valores de evapotranspiración (Lakatos et al., 2020, Sentelhas et al., 2010, Chen et al., 2005). Moreno et al. (2019), estudiando la región norte de Argentina, concluyen que el método de Thornthwaite subestimaría los valores de evapotranspiración a valores mensuales elevados, sobreestimándolos en condiciones asociadas a valores de evapotranspiración más reducidos.

Más allá de las diferencias numéricas entre sitios que podrían generar las diferentes fuentes de información de ET_0 , se considera que la clasificación de los años crisis realizada refleja las condiciones hídricas de los años en cuestión. Para confirmar la clasificación, se consultó para esos años la información que acompaña la publicación de la información de los ensayos utilizados (INTA, 2019) coincidiendo, en los casos en que se discuten las variables meteorológicas, con la clasificación aquí presentada.

Queda aquí un grupo de años en los que la caracterización metrológica realizada no sería, *a priori*, el factor generador de la caída en los rendimientos: los años *neutros*. En estos casos, es posible que la acumulación anual de precipitaciones no acusara déficits estacionales que pueden haber afectado a los cultivos, por lo que no deberían interpretarse como años con ausencia de deficiencias hídricas. Se optó, de todos modos, por clasificar como sequías únicamente a los años que cumplieran con los criterios presentados.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE CULTIVARES

La primera hipótesis planteada no fue rechazada para las variables productividad y estabilidad. La significancia estadística de estos resultados permite definir un grupo de 19 cultivares con rendimientos significativamente superiores (letra A, tabla 4) al grupo de 12 cultivares de rendimientos inferiores (letra F, tabla 4). El resto de los materiales, para los que se pueden observar medias ajustadas ubicadas entre ambos grupos, no son estadísticamente diferentes de los primeros o los últimos. El cultivar

magna 601 presenta un elevado indicador de estabilidad, destacándose particularmente del resto. Sin embargo, este material posee un valor de productividad reducido. Magna 601 sería, por tanto, un cultivar de rendimientos relativamente bajos pero estables en el tiempo.

La primera hipótesis fue rechazada para el indicador de resiliencia. Estadísticamente no se pudo encontrar en la base de datos utilizada ningún cultivar con superior desempeño en el indicador calculado ni en sus subclasificaciones que fuera consistente a través de los diferentes sitios de evaluación.

Se obtuvo para nuestra base de datos, con la metodología utilizada, una reducida capacidad para diferenciar de forma significativa distintos niveles de las variables calculadas entre cultivares.

4.3. RELACIONES ENTRE VARIABLES

Nuestra segunda hipótesis fue la existencia de una asociación negativa entre el nivel de productividad y los niveles de resiliencia y estabilidad de los cultivares. Si bien el análisis estadístico no permitió encontrar diferencias consistentes entre cultivares para los valores de resiliencia, la asociación entre este carácter y los niveles de productividad fue significativa y positiva. Este hecho estaría indicando que cultivares, o grupos de estos, con mayores desempeños en condiciones normales para la región muestran también rendimientos superiores en años de bajos rendimientos. Nuestro resultado es contrario a lo hallado por Picasso et al. (2019), donde los valores de resiliencia estuvieron negativamente asociados a los de productividad. Esto indicaría que para la región analizada en nuestro trabajo podría haber grupos de materiales con rendimientos consistentemente superiores en una diversidad de situaciones y niveles de rendimiento esperados para la especie. Esto significaría que no existió un compromiso entre los potenciales de rendimiento anual en situaciones normales y en situaciones de crisis, comportamiento indicado por Sadras y Richards (2014) como una de las posibles formas de expresión de la plasticidad fenotípica o, lo que es lo mismo, la relación entre la expresión de rendimientos en condiciones favorables y condiciones estresantes.

Los valores de resiliencia general estuvieron también asociados con los niveles de resiliencias específicas. La primera incluye para su cálculo los valores asociados a los tres subtipos, por lo que es esperable la existencia de una asociación positiva y significativa entre ellas.

4.4. ASOCIACIÓN ENTRE VARIABLES Y OTRAS CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVAR

Nuestros resultados muestran una asociación positiva entre los grados de reposo y las variables productividad y resiliencia (general, asociada a sequías y a condiciones no definidas como excesos). Esto muestra concordancia con la asociación positiva entre las variables mencionadas en la sección anterior. Grupos de cultivares con menores niveles de latencia invernal (GR superiores) presentarían una mayor adaptación a la región en términos de producción de forraje, tanto en lo que respecta a sus rendimientos en condiciones promedio como en los asociados a condiciones críticas. Una vez más, esto es contrario a los resultados obtenidos para la región norte de Estados Unidos y Canadá por Picasso et al. (2019), donde el grado de reposo estuvo negativamente correlacionado con la resiliencia. Los resultados de ambos trabajos coinciden, sin embargo, en la existencia de una asociación positiva entre las variables grado de reposo y nivel de productividad.

Los materiales evaluados con esta metodología para la región norteamericana pertenecen a los grados de reposo 3 al 5. Estos GR no son utilizados en nuestra zona de estudio. Existen en aquella región condiciones climáticas (inviernos más intensos en los que las pasturas atraviesan períodos prolongados bajo nieve o en suelos congelados) diferentes a las que se pueden encontrar en nuestra zona de estudio. Parece lógico, por lo tanto, que los comportamientos y relaciones dinámicas no sean extrapolables. Si bien en ambos casos cultivares de GR mayores estarían asociados a productividades superiores en años normales, debido probablemente a su mayor largo del período de crecimiento (Undersander, 2011, Basigalup, 2007, Carámbula, 2002), sus niveles de producción en años con fuertes restricciones (crisis) tendrían un comportamiento cualitativamente distinto dependiendo de la región en cuestión.

Pembleton y Sathish (2014) muestran, en un ensayo realizado en Tasmania (Australia), una mayor resistencia de cultivares de menor GR a condiciones de déficit hídrico. Estos autores relacionan la expresión diferencial de genes asociados a la resistencia a bajas temperaturas, comunes en este tipo de cultivares (GR 5 e inferior), como asociados también a mayores niveles de resistencia a las sequías. Esta relación es conocida incluso desde hace décadas (Jung y Larson, 1972). Cultivares con latencia invernal pronunciada fueron consistentemente superiores en las condiciones de déficits moderados impuestos en este trabajo. Sin embargo, las diferencias constatadas en la transcripción de los genes asociados a resistencia a la sequía, así como otras respuestas fisiológicas y de crecimiento, resultaron no significativas cuando los déficits hídricos fueron incrementados de 14 a 35 días. Como ya se señaló, este tipo de materiales con latencias invernales marcadas, presentes en el trabajo previo (Picasso et al., 2019), no se presentan en nuestra base de datos.

En cualquier caso, incluso si el grupo de materiales con latencia más marcada presentes en nuestra base tuviera una tolerancia relativamente superior a las deficiencias hídricas leves, lo que le podría permitir una mayor acumulación de materia seca durante esas etapas de restricción hídrica, el resultado al final del período de acumulación anual de estos materiales sería también influenciado por el largo del período en activo crecimiento. El resultado final dependería, entonces, del efecto relativo que estas fuerzas contrarias tendrían sobre el acumulado final de materia seca. Si consideramos que el momento de mayor probabilidad de ocurrencia de fuertes deficiencias hídricas coincide con el centro de la estación de crecimiento de la especie, es posible que los cultivares con latencias más prolongadas (que reinician su crecimiento más tarde en la primavera y lo detienen antes en el otoño) utilizarían en menor proporción momentos óptimos de crecimiento en los que es más probable que las sequías tengan un impacto de menor magnitud. Visto de otro modo, lo anterior podría significar una ventaja comparativa para materiales con latencias más reducidas. Estos genotipos generarían una acumulación de materia seca superior en aquellos períodos con buenas posibilidades de crecimiento (primavera y otoño) y menores probabilidades de déficit. Es posible que esta acumulación diferencial sea de mayor magnitud que la posible ventaja que cultivares con mayor latencia (y, por tanto, mejor

adaptación teórica a la sequía) tendrían en un verano extremo. Todo esto podría estar explicando por qué, para nuestras condiciones, los cultivares sin latencia estarían asociados tanto a mayores productividades como a mayores niveles resiliencia.

Bouizgaren et al. (2013), evaluando 16 materiales de alfalfa y su resistencia a las sequías en las condiciones de Marruecos, concluye que para estos materiales la adaptación a la sequía no parece estar tan correlacionada con el grado de reposo, sino con sitio de origen y mejoramiento de los cultivares. Es claro que en la región de la pampa Argentina, así como en Uruguay, existe desde hace algunas décadas una tendencia a la utilización de cultivares con latencias más cortas (Martín et al., 2020). Cultivares seleccionados y mejorados en la región habrían estado basados, al mismo tiempo, en grados de reposo crecientes en las últimas décadas. Teniendo esto en cuenta, no queda más que ser cautelosos a la hora de afirmar lo discutido en los párrafos anteriores. Es difícil discernir si para la región estudiada los mayores niveles de resiliencia que parecerían estar asociados a mayores grados de reposo, o grupos sin latencia, serían una asociación intrínseca a este carácter o si se pudiera tratar de un efecto confundido de estos (los GR) con otras características no relacionadas con el nivel de latencia de los cultivares seleccionados que los harían más adaptados a las condiciones locales en un sentido más amplio.

La misma consideración se podría realizar para los niveles de productividad. Si bien existió una relación positiva entre el nivel de productividad del cultivar y su grado de reposo o grupo de latencia, existieron también grandes diferencias a la interna de cada grupo. Esto confirma la idea de que, si bien el tipo de latencia que presenta un cultivar influye en sus niveles de producción, la genética específica de un cultivar individual tendrá implicancias tanto o más importantes que las asociadas al grado de reposo al que este pertenece.

4.5. RESILIENCIA VS. PLASTICIDAD

Como se discute en la introducción de este trabajo, el concepto de resiliencia es complejo, de utilización masiva reciente y utilizado en diversos campos del saber. Si bien plasticidad y resiliencia podrían ser conceptos contenidos uno dentro del otro en lo que respecta a la adaptación de, por ejemplo, especies animales a la variabilidad

ambiental (Canale y Henry, 2010), esto no es tan claro cuando lo que se desea abordar es la adaptación de especies forrajeras comerciales a dicha variabilidad. En este sentido, la plasticidad fenotípica, tan útil para permitir la subsistencia o perpetuación de las especies, puede no ser el tipo de resiliencia buscada cuando se tiene el objetivo de que esta se exprese, no como la capacidad de perdurar en el tiempo de una especie, cultivar o stand, sino como su capacidad de producir y mantener sus caracteres fenotípicos a pesar de las contingencias ambientales negativas.

Nuestro trabajo mostraría que materiales con menores niveles de reposo invernal cumplirían con este concepto cuando se evalúan las producciones acumuladas anuales de materia seca aérea. No se brinda, sin embargo, información que permita abordar otras dimensiones del concepto, como su capacidad o no de recuperarse de contingencias negativas pasadas, ni la velocidad de esta posible recuperación, ni la capacidad de persistencia de los materiales, entre otras características importantes.

Lo aquí presentado implicaría que, conceptualmente, grados de reposo más elevados presentarían, al menos para nuestras condiciones, niveles inferiores de plasticidad fenotípica para el carácter producción de forraje (Giordano, 2018, Sadras y Richards, 2014). Esto estaría íntimamente relacionado con el concepto de resiliencia en sentido estricto (i. e., resistencia) en el que se centra nuestro trabajo.

Si bien nuestro análisis no pudo detectar diferencias significativas entre cultivares para este carácter complejo, Giordano (2018) afirma que el tipo de respuesta relacionada a la plasticidad fenotípica es un carácter heredable. Esto marcaría la importancia que la selección podría tener en la búsqueda de cultivares más resilientes o con formas particulares de expresión de la plasticidad.

4.6. OTRAS CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVAR ESTUDIADAS

Para los 59 cultivares presentados existió una asociación positiva entre el grado de reposo y/o grupos de latencia con la resistencia a enfermedades de raíz y corona. Si bien varios autores (Ayala et al., 2010, Basigalup, 2007, Rebuffo, 2000) mencionan que, para los cultivares utilizados en Uruguay y Argentina, los materiales sin reposo estarían asociados a mayores niveles de ataque por patógenos foliares, no se conoce

una relación clara entre la susceptibilidad a enfermedades de raíz y corona con el nivel de reposo invernal. Es probable que la asociación aquí encontrada no indique una relación de causa-efecto. Por último, para la base utilizada, cultivares con mayores niveles de resistencia a enfermedades de raíz y corona estarían también positivamente asociados a mejores comportamientos frente al ataque de pulgones, lo que daría la pauta de que es posible contar con materiales de mejor comportamiento sanitario general.

Samac et al. (2016) mencionan la selección de cultivares resistentes a las tres enfermedades y plagas aquí presentadas como una de las medidas más efectivas para el control de estos importantes patógenos. Se destaca también que existe, para la mayoría de estos caracteres, una buena respuesta a la selección.

4.7. IMPLICANCIAS PARA LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS

Teniendo en cuenta los resultados aquí presentados, podría llegarse a la conclusión de que, para la región en estudio, los grupos mejor adaptados serían los cultivares sin latencia, es decir, aquellos asociados a grados de reposo más altos. A pesar de que nuestro análisis muestra, para estos grupos, niveles generales de productividad algo superiores en la mayor parte las condiciones que tuvieron los ensayos que originan nuestra información, es importante considerar otros factores a la hora de realizar la selección de un cultivar a sembrar.

Existe profusa evidencia que muestra que cultivares con grados de reposo superiores (o sin latencia) están asociados a menores niveles de persistencia (Pembleton y Sathish, 2014, Ayala et al., 2010, Basigalup, 2007, Putnam et al., 2005, Rebuffo, 2000, entre otros). Diversas explicaciones morfofisiológicas se documentan al respecto, siendo esto de especial relevancia en cultivos con manejos poco controlados. Esta información debería ser tenida en cuenta a la hora de seleccionar el material a sembrar, especialmente si el objetivo del sistema es el de buscar el establecimiento de pasturas más longevas. Existen disponibles gran cantidad de guías diseñadas para la selección de cultivares que toman en cuenta múltiples variables y, sobre todo, los objetivos buscados.

4.8. AGRUPAMIENTO REGIONAL EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE LATENCIA

Para la región en estudio parecería que el agrupamiento de los cultivares de grados de reposo 6 y 7 como cultivares con latencia intermedia, y de materiales 8 a 10 como cultivares sin latencia sería el que mejor resume las diferencias existentes en los niveles de rendimiento de los cultivares. Nuestro trabajo muestra, además, que este sería el mejor diseño para agrupar los materiales en función del aquí definido índice de resiliencia. Ambos argumentos demostrarían la posible conveniencia de utilizar este criterio en la separación de cultivares según su nivel de latencia.

Es evidente que este agrupamiento debería ser compatibilizado con mediciones a campo que demuestren una consistencia de estos agrupamientos en función de los parámetros existentes (NAAIC, 2004). Por último, y dada la relevancia en el contexto global que el grado de reposo tiene en la clasificación de cultivares, sería valiosa la publicación de esta información, en caso de estar disponible, en los ensayos de cultivares realizados en Uruguay, donde, en general, se nombra únicamente el nivel de latencia.

4.9. LIMITACIÓN DE LAS BASES DE DATOS UTILIZADAS

A pesar de que la metodología aquí utilizada resulta en una gran herramienta para analizar bases de datos de evaluaciones de cultivares de largo plazo, incluyendo múltiples localidades, encontramos algunas limitantes en la base de datos utilizada en el nuestro trabajo.

En primer lugar, la corta duración de los ensayos (entre 3 y 4 años, en comparación con los 6 años de la base de datos usada en el artículo previo (Picasso et al., 2019)) implica que se reduce la posibilidad de un cultivar de estar presente durante un año crisis. En el caso de Argentina (mayor parte nuestra base de datos), el hecho de que los ensayos se establezcan cada dos años implica que para un año específico se cuenta únicamente con un solapamiento de 2 edades distintas del stand. Por otro lado, la mayoría de los cultivares son sembrados únicamente una o dos veces en cada sitio

(173 de los 355 materiales iniciales cuentan con una única fecha de siembra por sitio). Esto hace que para una gran proporción de los materiales no se puedan generar valores de resiliencia.

Todo esto reduce el n para cada una de las variables calculadas, lo que reduce la precisión y la posibilidad de sacar conclusiones sólidas para un número elevado de cultivares. La porosidad de nuestra base de datos redujo también la posibilidad de incluir interacciones entre varios de los factores en los modelos utilizados.

Como contracara, el programa de evaluación de cultivares argentino tiene la ventaja de utilizar múltiples sitios en los que se prueban, en su mayoría, los mismos cultivares en cada ciclo. El programa de evaluación de cultivares uruguayo, a pesar de la desventaja de tener una duración efectiva de los ensayos de 3 años, posee la fortaleza de que sus experimentos se establecen todos los años, lo que incrementa la superposición de edades y mejora las estimaciones. Por último, la mayoría de los materiales que ingresan a la red nacional de evaluación de cultivares producto del convenio INASE-INIA se siembran al menos en dos ensayos diferentes.

La cooperación interinstitucional y entre organismos de Argentina y Uruguay podría generar fortalezas importantes y puede permitir agregar valor a la información y los recursos utilizados.

5. CONCLUSIONES

Para la región en estudio, los grupos de materiales sin latencia serían consistentemente más productivos y presentarían resiliencias (i. e., resistencia) a condiciones críticas, no asociadas a excesos hídricos, superiores a cultivares con latencia intermedia.

Agrupar materiales con grados de reposo 6 y 7 (como cultivares con latencia intermedia) y cultivares 8 a 10 (como cultivares sin latencia) genera grupos más contrastantes entre sí y más homogéneos a la interna en términos de productividad y resiliencia calculadas con nuestra metodología. Esto confirmaría que el propuesto es el criterio más acertado para agrupar cultivares y programas de evaluación regionales.

Los resultados mostrados son válidos para un período de vida de cultivos puros de alfalfa de entre 3 y 4 años. No se analizan los materiales en función de la persistencia y otras características relevantes de los cultivares.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Altier N, Rebuffo M, Cabrera K. 2010. Enfermedades y plagas en pasturas. Serie tecnica INIA, 183, 145.
- Annicchiarico P, Barrett B, Brummer EC, Julier B, Marshall AH. 2015. Achievements and Challenges in Improving Temperate Perennial Forage Legumes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34(1–3), 327–380. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.898462>
- Astigarraga L, Cruz G, Caorsi ML, Taks J, Cobas P, Mondelli M, Picasso V. 2013. Clima de cambios: Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay (Vol. 4 Sensibilidad y capacidad adaptativa de la lechería frente al cambio climático). Montevideo: FAO, MGAP (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca).
- Atlin GN, Frey KJ. 1990. Selecting Oat Lines for Yield in Low-Productivity Environments. *Crop Science*, 30(3), 556–561. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000030017x>
- Ayala W, Reyno R, Docanto J, Cotro B, Olmos Lopez F, Silva JA, Bemhaja M, Rebuffo M, Real D, Garcia JA, Rossi C. 2010. Forrajeras: Catálogo de cultivares 2010. INIA. UNIDAD DE COMUNICACION Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA.
- Barrenchea P, Guerra D. (Eds.). 2010. Estudio nacional de economía del cambio climático. Uruguay. CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe).
- Basigalup DH. (Ed.). 2007. El cultivo de la alfalfa en la Argentina. Ediciones INTA.
- Bianchi AR, Cravero SAC. 2010. Geoportal IDE Salta—WMS [Map]. <http://geoportal.idesa.gob.ar/geoserver/ows?version=1.1.1>
- Bouizgaren A, Farissi M, Ghoulam C, Kallida R, Faghire M, Barakate M, Al Feddy MN. 2013. Assessment of summer drought tolerance variability in Mediterranean alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars under Moroccan fields conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(1), 147–160. <https://doi.org/10.1080/03650340.2011.606216>
- Canale CI, Henry P. 2010. Adaptive phenotypic plasticity and resilience of vertebrates to increasing climatic unpredictability. *Climate Research*, 43(1–2), 135–147. <https://doi.org/10.3354/cr00897>

- Caorsi ML, Cruz G, Terra R, Astigarraga L. 2018. Variación de la precipitación y la ocurrencia de sequías en la cuenca lechera del SW del Uruguay en el período 1939-2011. *Agrociencia Uruguay*, 22(1), 116–123. <https://doi.org/10.31285/agro.22.1.12>
- Carámbula M. 2002. Pasturas y forrajes: Potenciales y alternativas para producir forraje. Hemisferio Sur.
- Ceccarelli S, Grando S. 1991. Environment of selection and type of germplasm in barley breeding for low-yielding conditions. *Euphytica*, 57(3), 207–219. <https://doi.org/10.1007/BF00039667>
- Ceccarelli S, Grando S, Impiglia A. 1998. Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments. *Euphytica*, 103(3), 307–318. <https://doi.org/10.1023/A:1018647001429>
- Chen D, Gao G, Xu CY, Guo J, Ren G. 2005. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Climate Research*, 28(2), 123–132. <https://doi.org/10.3354/cr028123>
- Collins M, Nelson CJ, Moore KJ, Barnes RF. (Eds.). 2018. Forages, Volume 1: An Introduction to Grassland Agriculture (Seventh edition). Wiley Blackwell.
- Cruz G, Baethgen W, Picasso V, Terra R. 2014. Análisis de sequías agronómicas en dos regiones ganaderas de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 18(1), 126–132.
- Dawson TP, Rounsevell MDA, Kluvánková-Oravská T, Chobotová V, Stirling A. 2010. Dynamic properties of complex adaptive ecosystems: Implications for the sustainability of service provision. *Biodiversity and Conservation*, 19(10), 2843–2853. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9892-z>
- DIEA-MGAP (Dirección de Investigaciones Económicas Agropecuarias-Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). 2011. Censo general agropecuario. Resultados definitivos.
- Giordano MC. 2018. Plasticidad fenotípica en *Panicum coloratum*: Variabilidad genética, heredabilidad y expresión diferencial de la plasticidad. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/114401>
- Google Maps. (n.d.). Google Maps. Retrieved October 16, 2022, from <https://www.google.com.uy/maps/>

- Grimm V, Wissel C. 1997. Babel, or the ecological stability discussions: An inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion. *Oecologia*, 109(3), 323–334. <https://doi.org/10.1007/s004420050090>
- Hakl J, Mofidian SMA, Kozová Z, Fuksa P, Jaromír Š. 2019. Estimation of lucerne yield stability for enabling effective cultivar selection under rainfed conditions. *Grass and Forage Science*, 74(4), 687–695. <https://doi.org/10.1111/gfs.12456>
- Hodgson D, McDonald JL, Hosken DJ. 2015. What do you mean, ‘resilient’? *Trends in Ecology & Evolution*, 30(9), 503–506. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.010>
- INASE (Instituto Nacional de Semillas). 2020. INASE Uruguay—Estadística. <https://www.inase.uy/Estadistica/>
- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2020. Portal INIA Banco datos agroclimatico. <http://www.inia.uy:80/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). 2019. Red nacional de evaluación de cultivares de Alfalfa. INTA. <https://inta.gob.ar/documentos/directorio-de-avances-en-alfalfa>
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). 2020. SIGA - Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica. <http://siga2.inta.gov.ar/#/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Ed.). 2014. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability: Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IRI (International Research Institute for Climate and Society). 2011. Time Scales Map Room. [index.html](http://www.iri.columbia.edu/TimeScalesMapRoom/index.html)
- Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C, Bezemer TM, Bonin C, Bruehlheide H, de Luca E, Ebeling A, Griffin JN, Guo Q, Hautier Y, Hector A, Jentsch A, Kreyling J, Lanta V, Manning P, Eisenhauer N. 2015. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 526(7574), 574–577. <https://doi.org/10.1038/nature15374>
- Jung GA, Larson KL. 1972. Cold, Drought, and Heat Tolerance. In *Alfalfa Science and Technology* (pp. 185–209). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr15.c9>

- Lakatos M, Weidinger T, Hoffmann L, Bihari Z, Horváth Á. 2020. Computation of daily Penman–Monteith reference evapotranspiration in the Carpathian Region and comparison with Thornthwaite estimates. *Advances in Science and Research*, 16, 251–259. <https://doi.org/10.5194/asr-16-251-2020>
- Lamb JFS, Sheaffer CC, Rhodes LH, Sulc RM, Undersander DJ, Brummer EC. 2006. Five Decades of Alfalfa Cultivar Improvement: Impact on Forage Yield, Persistence, and Nutritive Value. *Crop Science*, 46(2), 902–909. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.08-0236>
- Li X, Brummer EC. 2012. Applied Genetics and Genomics in Alfalfa Breeding. *Agronomy*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/agronomy2010040>
- Liu Y, Wu Q, Ge G, Han G, Jia Y. 2018. Influence of drought stress on alfalfa yields and nutritional composition. *BMC Plant Biology*, 18(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1226-9>
- López-ridaura S, Keulen H Van, Ittersum MK Van, Leffelaar, PA. 2005. Multiscale Methodological Framework to Derive Criteria and Indicators for Sustainability Evaluation of Peasant Natural Resource Management Systems. *Environment, Development and Sustainability*, 7(1), 51–69. <https://doi.org/10.1007/s10668-003-6976-x>
- Loreau M, Downing A, Emmerson M, Gonzalez A, Hughes J, Inchausti P, et al.. 2001. A new look at the relationship between diversity and stability. In: M. Loreau, et al., editors, *Biodiversity and ecosystem Function: Synthesis and perspectives*. Oxford Univ. Press, New York. p. 79–91.
- Marten GG. 1988. Productivity, stability, sustainability, equitability and autonomy as properties for agroecosystem assessment. *Agricultural Systems*, 26(4), 291–316. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(88\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0308-521X(88)90046-7)
- Martín B, Coronel A, Sacido M. 2020. Medicago Sativa en la región centro-este de Argentina. Ocho lustros de historia. *e-Universitas UNR Journal*, 1(23), Article 23.
- MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2018. Productores lecheros de Salto investigaron y validaron tecnologías para mejorar la implantación de la alfalfa como cultivo forrajero. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura->

pesca/comunicacion/noticias/productores-lecheros-salto-investigaron-validaron-tecnologias-para-mejorar

- Moreno CA, Hurtado RH, Portal MR, Valdiviezo Corte MB, Riquelme Guzman A, Alabar FD, Mayo HF. 2019. Ajuste de la estimación de la evapotranspiración de Hargreaves y Samani a la metodología de Penman-Monteith (FAO, 56), para localidades del Noroeste Argentino. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/121740>
- NAAIC (North American Alfalfa Improvement Conference). 2004. North American Alfalfa Improvement Conference. Standard Tests to Characterize Alfalfa Cultivars Third Edition (Amended 2004). <http://www.naaic.org/resource/stdtests.php>
- Oliver TH, Heard MS, Isaac NJB, Roy DB, Procter D, Eigenbrod F, Freckleton R, Hector A, Orme CDL, Petchey OL, Proença V, Raffaelli D, Suttle KB, Mace GM, Martín-López B, Woodcock BA, Bullock JM. 2015. Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(11), 673–684. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.08.009>
- Otero A, Castro M. 2019. Variability of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Seasonal Forage Production in the Southwest of Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 23(1), 65–75. <https://doi.org/10.31285/agro.23.1.9>
- Pembleton KG, Sathish P. 2014. Giving drought the cold shoulder: A relationship between drought tolerance and fall dormancy in an agriculturally important crop. *AoB PLANTS*, 6. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plu012>
- Penalba OC, Rivera JA. 2013. Future Changes in Drought Characteristics over Southern South America Projected by a CMIP5 Multi-Model Ensemble. *American Journal of Climate Change*, 02(03), 173–182. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.23017>
- Picasso V, Brummer C, Liebman M. 2010. Diversity and Stability in experimental grasslands communities. *Grassland Science in Europe*, 15, 827.
- Picasso VD, Casler MD, Undersander D. 2019. Resilience, Stability, and Productivity of Alfalfa Cultivars in Rainfed Regions of North America. *Crop Science*, 59(2), 800–810. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.06.0372>
- Putnam D, Orloff S, Teuber L. 2005. Strategies for Balancing Quality and Yield in Alfalfa Using Cutting Schedules and Varieties.

- QGIS Development Team. 2020. QGIS Geographic Information System (3.16.0). Open Source Geospatial Foundation. <http://qgis.osgeo.org>
- Quan, W., Liu, X., Wang, H., & Chan, Z. (2016). Comparative Physiological and Transcriptional Analyses of Two Contrasting Drought Tolerant Alfalfa Varieties. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1256. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01256>
- Rebuffo M. 2000. Tecnología en alfalfa. INIA La Estanzuela.
- Rebuffo M, Altier N, Coitiño MJ. 2010. La resistencia a enfermedades en el mejoramiento genético de leguminosas forrajeras. In N. Altier, M. Rebuffo, & K. Cabrera, *Enfermedades y Plagas en Pasturas* (Vol. 183, p. 145).
- Russelle MP. 2013. The Alfalfa Yield Gap: A Review of the Evidence. *Forage & Grazinglands*, 11(1), FG-2013-0002-RV. <https://doi.org/10.1094/FG-2013-0002-RV>
- Sabatier R, Oates LG, Brink GE, Bleier J, Jackson RD. 2015. Grazing in an Uncertain Environment: Modeling the Trade-Off between Production and Robustness. *Agronomy Journal*, 107(1), 257–264. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0357>
- Sadras VO, Richards RA. 2014. Improvement of crop yield in dry environments: Benchmarks, levels of organisation and the role of nitrogen. *Journal of Experimental Botany*, 65(8), 1981–1995. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru061>
- Samac DA, Rhodes LH, Lamp WO. 2016. *Compendium of Alfalfa Diseases and Pests*, Third Edition. The American Phytopathological Society. <https://doi.org/10.1094/9780890544488>
- Sentelhas PC, Gillespie TJ, Santos EA. 2010. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97(5), 635–644. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.12.001>
- Sordo-Ward A, Bejarano M, Iglesias A, Asenjo V, Garrote L. 2017. Analysis of Current and Future SPEI Droughts in the La Plata Basin Based on Results from the Regional Eta Climate Model. *Water*, 9(11), 857. <https://doi.org/10.3390/w9110857>
- Tabares-da Rosa S, Signorelli S, Del Papa M, Sabatini O, Reyno R, Lattanzi F, Rebuffo, M, Sanjuán J, Monza J. 2019. Inoculantes rizobianos para alfalfa en suelos ácidos: Una propuesta para Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 23(2), 4–16. <https://doi.org/10.31285/agro.23.120>

- Teuber LR, Taggard KL, Gibbs LK, McCaslin MA, Peterson MA, Barnes DK. 1998. Fall Dormancy. Standard Tests to Characterize Alfalfa Cultivars. A-1.
- Thorntwaite CW. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Tiscornia G, Cal A, Giménez A. 2016. Análisis y caracterización de la variabilidad climática en algunas regiones de Uruguay. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 42(1), 66–71.
- Tracy BF, Foster JL, Butler TJ, Islam MA, Toledo D, Vendramini JMB. 2018. Resilience in Forage and Grazinglands. *Crop Science*, 58(1), 31–42. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.05.0317>
- Undersander DJ (Ed.). 2011. Alfalfa management guide. American Society of Agronomy.
- Undersander DJ. 2015. Alfalfa management guide. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Urruty N, Tailliez-Lefebvre D, Huyghe C. 2016. Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0347-5>
- Waldron BL, Jensen KB, Peel MD, Picasso VD. 2021. Breeding for Resilience to Water Deficit and Its Predicted Effect on Forage Mass in Tall Fescue. *Agronomy*, 11(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112094>
- Walker B, Holling CS, Carpenter SR, Kinzig AP. 2004. Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems. *Ecology and Society*, 9(2), art5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>

7. ANEXOS

7.1 RESILIENCE, PRODUCTIVITY AND STABILITY OF ALFALFA CULTIVARS IN URUGUAY AND ARGENTINA

SUMMARY

Climate change is increasing both water deficits and excesses which constrain Alfalfa (*Medicago sativa* L.) production. To assess the productivity, stability, and resilience of Alfalfa cultivars to climate extremes in Argentina and Uruguay, a database of Alfalfa annual forage mean yields was compiled. 12 locations were included for the period 1994-2018. Three indexes were calculated as proposed by Picasso et al. (2019): productivity, stability, and resilience. We added 3 new resilience metrics based on the nature of the weather crisis: drought, water excess, and *non-water-related* (neutral). Differences were detected for productivity and stability. Resilience metrics showed nonsignificant variation between cultivars. There was a positive association between productivity and resilience metrics except for the water excess related one. The methodology applied in our data set showed limited results when used at variety level. Higher dormancy scores were positively associated with productivity and resilience, including drought and neutral resilience metrics. Groups of cultivars with shorter dormancy periods can produce more in normal years. The fact that higher dormancy groups present a longer growing window, i. e. they are actively growing during early spring and late fall, increase the possibility to cover a potential dry matter shortage occurred in a certain period with growing in other seasons of the year. This results, on average, in higher annual forage yields.

INTRODUCTION

In recent decades there has been a global growing concern about the effects that climate change will have on food production systems. For our region, the impact that variability and extreme weather events generate on agricultural production systems in general and on pasture-based ones in particular is well described (Tiscornia et al., 2016; Astigarraga et al., 2013; Barrenchea & Guerra, 2010).

Droughts are one of the climatic events with the greatest impact on our systems. Some national studies predict an increment in precipitations, both analyzing historical series and future projections (Caorsi et al., 2018; Sordo-Ward et al., 2017; Cruz et al., 2014). These studies project probable reductions in water deficiencies in Uruguay and the Pampean region of Argentina. The increase in precipitation levels could be explained by an intensification in heavy rain events in the southeastern region of South America (IPCC, 2014). On the other hand, Penalba & Rivera (2013), based on CMIP5 models, project more frequent and intense droughts, although of shorter duration. In all cases, and despite possible long-term trends, the interannual variability of rainfall stands out at the national level as a key variable in the occurrence of droughts (Caorsi et al., 2018). Further evidence in the same direction can be found in the Times Scales Map Room (IRI, 2011) web tool, which confirms the great relevance that the interannual component of rainfall variability comparatively has in our country and the region: values of 79 %, 70 % and 65 % are obtained for the areas of Uruguay, the southeastern region of South America and the planet, respectively. Similar and even higher values are reported by the national bibliography (Caorsi et al., 2018; Tiscornia et al., 2016). This confirms that in this study area the interannual variability is comparatively more important than in other regions. Some evidence shows that this variability could even be increased in the future (Penalba & Rivera, 2013).

Regarding air temperature for the region, predictions show an increase in warm days and nights, as well as a reduction in cold days and nights (IPCC, 2014). Finally, an increase in the frequency and intensity of heat waves is expected for South America, although with a lesser trend for the southeast region.

In this scenario, although the probability of a reduction in droughts could be read as good news, the search for production systems capable of facing and tolerating the high

variability that characterizes the region continues to be one of the most pertinent measures: this would allow to address the historical vulnerability of our systems, as well as the uncertainty of future events (Tiscornia et al., 2016; IPCC, 2014).

To face this situation, the IPCC (2014) recommends following climate resilient paths that must combine adaptation with mitigation of impacts in a context of implementation of sustainable development paths.

Sustainability can be evaluated at different scales and by many different attributes (Picasso et al., 2019). Resilience and stability in forage systems reflect the performance of agroecosystems in the long term and appear as highly relevant variables to face the climate variability and the crises or extremes associated with it (Tracy et al., 2018).

Historically, research on pastures and forage species has focused on maximizing productivity levels, that is, the average dry matter yield per unit area (Collins et al., 2018).

Stability and resilience are less understood concepts, sometimes confused, and their evaluation is not so direct (Urruty et al., 2016). Stability could theoretically be defined as the minimum variability of yields over time under normal conditions (Urruty et al., 2016; Dawson et al., 2010; Picasso et al., 2010; López-ridaura et al., 2005; Loreau et al., 2001; Grimm & Wissel, 1997; Marten, 1988). Resilience, on the other hand, has been approached from different perspectives in recent decades (Tracy et al., 2018; Urruty et al., 2016; Sabatier et al., 2015; Picasso et al., 2013, Picasso et al., 2011; Dawson et al., 2010; López-ridaura et al., 2005; Walker et al., 2004; Grimm & Wissel, 1997). Hodgson et al. (2015) define it as the ability of a system to persist or maintain its functions when facing a disturbance or exogenous impact. These authors suggest that resilience cannot be measured as a single characteristic and propose an approach in which resilience in the broad sense comprises two complementary dimensions, resistance and recovery. Resistance is defined as the ability to withstand a crisis and not deviate during the disturbance. A graphic example of more resistant forage systems would be those that reduce their production levels less in the face of a drought, compared to other less resistant ones, in which forage production would drop

markedly. Recovery is the ability of the system to recover after a crisis, including the shape and speed of that path (Tracy et al., 2018; Isbell et al., 2015; Oliver et al., 2015). Two obstacles to study traits such as stability and resilience are the lack of consensus on measurement methodologies (Grimm & Wissel, 1997) and the lack of long-term databases. To measure these variables with good results and improve our understanding of them, methodologies must be applied in large enough databases, combining results from different regions and using approaches integrating different disciplines (Tracy et al., 2018). The present study used the methodology generated by Picasso et al. (2019) to calculate productivity, stability and resilience index in alfalfa cultivars evaluated in Argentina and Uruguay.

Medicago sativa L. is one of the main perennial forage species both globally and regionally. Its importance lies in its ability to be used both for direct grazing and for the production of forage reserves (Undersander, 2015), its great production potential, nutritional value, perenniality, plasticity and ability to fix nitrogen as well as its deep root system, which gives it good resistance to drought (Basigalup, 2007). It has the ability to improve system sustainability, protect water quality, improve carbon fixation in the soil, recover fertility and generate soil stability (Martín et al., 2020; Russelle, 2013).

Medicago sativa L. is a highly important crop for the region under study, being historically the most planted forage species in Argentina, second worldwide alfalfa producer. In Uruguay, alfalfa has shown an increase in its importance in the past decades (INASE, 2020; DIEA-MGAP, 2011; Rebuffo, 2000) with some regional limitations due to soil conditions.

One of the characteristics that can limit the development of this species is the occurrence of excess water (Martín et al., 2020; Basigalup, 2007). The development of diseases can reduce forage yields and kill seedlings and established plants, making it difficult to maintain their populations (Undersander, 2015).

The highest occurrence of diseases in alfalfa corresponds to the leaf spot complex that includes a diversity of pathogens. These generate both direct damage to production due to leaf fall, affecting the amount of forage available, and indirect damage due to the reduction in leaf area, which affects the vigor and reserves of the plants. Some of

these pathogens can also cause lesions on the stems and spread to the crown. Varieties selected locally have lower incidence of foliar diseases than those imported from regions such as the United States and Australia, which have been selected in drier environments. (Ayala et al., 2010; Rebuffo et al., 2010). On the other hand, root and crown diseases, which generally develop more slowly and progressively as the stand age evolves, are responsible for causing death of plants and reducing the persistence of the stand (Rebuffo, 2000).

The selection of resistant cultivars is one of the main tools for managing pests and diseases since the severity of the attacks is highly variable depending on the genetics (Undersander, 2015; Altier et al., 2010; Ayala et al., 2010).

Differences in fall dormancy score also print great differences between cultivars, both morphological and in growth and persistence. This trait defines the annual distribution of the forage production and, in particular, its growth potential at low temperatures. Cultivars that are historically found in our region can be classified into three groups that generate contrasting differences in persistence. Non-dormant cultivars tend to be less persistent than those with a certain degree of dormancy. Highly dormant varieties, however, were gradually eliminated regionally since they have a long unproductive period (Ayala et al., 2010; Basigalup, 2007). On the other hand, these authors maintain that cultivars with shorter dormancy period (or, which is the same, higher dormancy scores) tend to be less resistant to pathogenic attacks.

Historically, efforts in breeding programs to increase alfalfa yields globally have focused on improving resistance to diseases and pests, forage quality and winter survival in colder regions, but genetic improvement of yields has been low (Li & Brummer, 2012). Martín et al. (2020) observed the same for Argentina in the last decade. In a study comparing alfalfa cultivars released over 5 decades in the United States, the most modern cultivars with resistance to multiple diseases obtained better performance only in environments with a high disease pressure, while in environments where plant losses were not significant, the oldest cultivars yielded the same as the most recent ones (Lamb et al., 2006).

Martin et al. (2020) show that for the Pampean region of Argentina there is a significant trend of increased productivity of the cultivars used between 1972 and

2015, although it seems to reach a plateau in the last evaluated decade. Variations over the years were mainly due to the entry of new materials, improvements in behavior against diseases and pests, and due to the increment of the dormancy score of varieties. This paper shows that extreme weather events, such as droughts and water excesses, directly affected productivity levels, droughts showing a more generalized effect.

Otero & Castro (2019) analyzed the variability in the seasonal productivity of alfalfa forage in southwestern Uruguay, finding that the highest growth rates occurred in summer, in situations where water deficit was reduced. These situations were found, however, in only 6 % of the evaluated summers (1997-2011), confirming the importance of incorporating cultivars more resistant to drought.

There is great genetic and phenotypic diversity within this species. Plant characteristics such as rooting depth, canopy architecture or carbohydrate reserves affect yields and their variability over time. The ability of two alfalfa cultivars to resist drought may be associated, for example, with their different rooting depths, which allows them to explore larger volumes of soil to extract water (Collins et al., 2018). It is then expected that some cultivars are consistently more resilient to drought and more stable in the long term than others, due to consistent differences in anatomical or physiological characteristics (Liu et al., 2018). However, the characteristics that could explain the higher yields in normal years with low levels of biotic and abiotic stress may be different from those responsible for achieving the higher yields in critical years with high levels of stress (Atlin & Frey, 1990). Therefore, it is expected that the yield ranking of a cultivar under normal conditions may not be correlated with its ranking under stress conditions or with its persistence (Annicchiarico et al., 2015; Ayala et al., 2010; Ceccarelli et al., 1998; Ceccarelli & Grando, 1991). This means there could be tradeoffs between maximizing productivity vs. resilience or stability. Finally, it is possible that characteristics related to resistance to biotic or abiotic stress are positively correlated with resilience or stability.

The goal of this paper is to apply a novel methodology developed by Picasso et al. (2019) on varieties of use in Uruguay and Argentina in order to i) evaluate cultivar differences in productivity, stability and resilience and to identify those with superior performance, ii) to evaluate associations between variables calculated, and iii) to

evaluate association between variables calculated and other cultivar traits (dormancy score, disease and aphids resistance levels).

MATERIALS AND METHODS

DATABASE

A database of forage yields of 355 alfalfa cultivars from 129 public trials conducted between 1994 and 2018 was used, comprising 12 locations, one in Uruguay and eleven in Argentina. The sites are located between the latitudes 27° 54' y 40° 47' S. All locations are located below 460 meters above sea level.

A total of 15,115 observations were initially processed with an observation defined as a cultivar total annual yield across three to four replicates per trial. The annual yield considers an accumulation period defined from the 1st of July until the 30th of June of the next year for all locations.

Figure 1

Geographical location of sites used for the study.



<i>Location</i>	<i>Province/Department</i>	<i>Latitude S/ Longitude W</i>
Anguil	La Pampa	36° 31' / 64° 00'
Concepción del Uruguay	Entre Ríos	32° 29' / 58° 20'
General Villegas	Buenos Aires	35° 02' / 63° 01'
Hilario Ascasubi *	Buenos Aires	39° 22' / 62° 38'
Manfredi	Córdoba	31° 41' / 63° 46'
Marcos Juárez	Córdoba	32° 41' / 62° 09'
Paraná	Entre Ríos	31° 50' / 60° 31'
Rafaela	Santa Fe	31° 12' / 61° 30'
Santiago del Estero*	Santiago del Estero	27° 48' / 64° 16'
Viedma*	Rio Negro	40° 47' / 63° 03'
Villa Mercedes	San Luis	33° 39' / 65° 02'
La Estanzuela	Colonia (Uruguay)	34° 20' / 57° 42'

* Locations including supplemental irrigation

To perform the analysis, we only selected varieties evaluated in at least two trials for any given location to reduce the possibility of drawing conclusions on cultivars with reduced information. This left 9,552 observations for the whole data set.

For Argentinian locations, the trials were established every two years with a duration of 4 years per trial. For the Uruguayan location, the trials were established every year with a trial duration of 3 years. The date for the last cut of the 3rd year was highly variable for this location. To eliminate this variability, we redefined that 3rd year only considering the accumulation until December of the 3rd cycle. All cuts after December of the third year were not considered.

Each cultivar was characterized based on information published by the INTA and INIA research institutes. Fall dormancy score (DS) for each variety is originally provided to the research institutes by the seed companies. In Argentina, variety trials are historically divided in three, depending on the dormancy scores of each variety. Three groups are used, namely: dormant, intermediate and non-dormant cultivars gathering groups 4 to 5, 6 to 7 and 8 to 10, respectively.

In Uruguay, cultivars are classified as intermediate and non-dormant. Although dormancy scores are not usually shown in variety trials and were not historically of widespread use, dormancy scores N° 8 tend to be included in the intermediate dormancy group differing from the classification used in Argentina. The threshold dividing intermediate and non-dormant cultivars is then unclear. To help clarify this threshold score, both groupings were used to process all our information in order to determine which criteria generates more consistent groups/clusters in terms of the variables calculated in this study.

Cultivars were also classified with quantitative disease and aphids' resistance information. To summarize this information, we assigned an index ranging from 1 to 30 resulting from the sum of the resistance values for 3 root and stem diseases (*Fusarium* wilt, *phytophthora* root rot and anthracnose) and 3 aphid species attack (*Therioaphis maculata*, *Acyrtosiphum pisum* and *A. kondoi*), each of them ranging from 1 (susceptible) to 5 (highly resistant) (Picasso et al., 2019).

Weather information was also compiled and processed. For Argentinian locations, this data was obtained from information published in the alfalfa trial publications (INTA, 2019). For the periods with lack of published information, the data was complemented with information downloaded from the SIGA web page (INTA, 2020). For the

Uruguayan location, the information was obtained from the Agroclimatic Data Bank from INIA (INIA, 2020).

IDENTIFICATION OF CRISIS YEAR

To define a crisis year in this article, we selected a representative group of cultivars with high data accumulation for the whole period studied (Table 1). We selected 4 cultivars for Argentina and 2 cultivars for Uruguay. The *annual least square mean yield* for each year in each location was calculated for that group of cultivars using a model with year as fixed effect and cultivar and stand age as random effects. Following, we calculated the *annual mean yield for each location* for the whole period using a model with location as fixed effect and cultivar, stand age, year and the interaction year*stand age as random. The random effects were nested in location.

Using the average yield for each location as a parameter and in accordance with the average crisis severity of 0.38 obtained for the previous paper (Picasso et al., 2019), we defined a crisis year as one where the mean yield calculated for the representative group of cultivars showed a reduction of 40 % or more compared with the mean yield for the whole period for that location. The rest of the years were considered *normal years*.

Table 1

Check varieties, period with available information, number of observations and dormancy score

<i>Variety</i>	<i>Period with available information (from-to)</i>	<i>N</i>	<i>D.S.</i>
Monarca sp inta	1994-2018	452	8
Victoria sp inta ¹	1994-2011	213	6
Verdor	2004-2016	198	7
Wl 611 ²	2004-2018	192	6
Estanzuela Chana ³	2001-2018	153	8
Crioula ³	2001-2018	135	7

¹Absent in locations with supplementary irrigation. ² Absent in Santiago del Estero ³ Check only in Uruguay

There is a rapid turnover of the cultivars evaluated during the studied period. Because of that, using only 6 representative cultivars to define the crisis years ensures that the reduction of the mean yield observed at the crisis years was not due to the set of cultivars evaluated in that specific year. Using only one check variety, on the other hand, could have implied the risk of detecting a crisis due to a particular situation affecting that specific variety.

Each crisis year was classified using rainfall and evapotranspiration information. We computed the difference between rainfall for each year and the climatic evapotranspiration (ET_0) for the period July-June for each location. Negative results for that difference were considered droughts, values between 0 and 150 mm were considered neutral and values above 150 mm were considered years of water excess. The objective was to classify the crises to look into the environmental situations triggering the identified yield reduction, giving us the possibility to calculate specific resilience values for each situation.

VARIABLES CALCULATED

Based on the previous paper (Picasso et al., 2019) and our crisis and normal years definitions, we calculated productivity, stability and resilience for each cultivar in each

location. The crisis severity was calculated using the same set of cultivars used to define the crisis years.

Productivity is defined as the average yield for the cultivar j at the location l in the normal years ($n-1$ (N^o crisis years)). The higher the average yield the higher the productivity.

$$P_{jl} = \frac{\sum_i^{n-1(n^o \text{ crisis})} Y_{ijl}}{n-1(n^o \text{ crisis})}$$

Where n is the number of data points used for the calculation of the productivity value of the cultivar j .

Stability is defined using the productivity and its standard deviation (σ)

The lower the variability of the productivity, the higher the stability.

$$S_{jl} = \frac{P_{jl}}{\sigma_{(jl)}}$$

Where P_{jl} is the productivity as defined above and $\sigma_{(jl)}$ its standard deviation.

The stability formula was modified from the original paper (Picasso et al., 2019), where the denominator in the formula was the standard error (SE) of the productivity computation. This implies the result is affected by the n used to compute the productivity mean. This has the risk of giving higher values to cultivars with more data accumulation which is not necessarily associated with its stability of yields.

The new formula is equivalent to the previous stability formula divided by the square root of n :

$$S_{jl} = \frac{P_{jl}}{SE(P_{jl})} / \sqrt{n} = S_{jl} = \frac{P_{jl}}{\sigma_{(jl)}}$$

Resilience index is calculated as follows:

$$R_{jl} = \frac{Y_{cjl}}{P_{jl}}$$

Where Y_{cjl} is the yield of the cultivar j in the crisis year. It shows the proportion of the productivity reached by a cultivar in the crisis year.

The last index computed is the **crisis severity**. It characterizes the crisis years. The lower the yield of the test cultivars, the higher the crisis severity.

$$CS_l = 1 - \frac{Y_{C_l}}{P_l}$$

Where P_l is the least square mean yield of the test cultivars for the location l and Y_{C_l} the least square mean for the same cultivars in the crisis year.

STATISTICAL ANALYSIS

We calculated the least square means yield for each cultivar by location and year using a model with cultivar and stand age as fixed effects. Following, to calculate productivity and stability for each cultivar in each location, least square means by location were estimated for yield of cultivars in the normal years, considering cultivar and year as fixed effects. Once the crisis years were identified, the resilience values were estimated as described in the previous section.

The final set after estimating resilience values consisted of 596 resilience values, 104 cultivars and 9 locations.

To test the hypothesis of differences among cultivars across locations, cultivar productivity, stability and resilience were analyzed with a model considering cultivar and location as fixed effects. For this analysis we only included cultivars with more than 3 values of resilience leaving 532 observations of 59 cultivars.

Using the weather characterization of the crisis years we computed 3 resilience sub-types means. For this we used the same models described above. With this approach we got resilience means related to drought, water excess and a third type not related to the balance *Rainfall – ET₀*. We called this last group *neutral*.

Multiple comparisons tests (Tukey) for least squares means of each cultivar were performed to identify the cultivars with superior performance in each variable.

To test the association between calculated variables, simple linear regressions were fit for cultivar means across locations of productivity, stability and 4 types of resilience.

VARIABLES VS. CULTIVAR TRAITS

To test the association between variables calculated and fall dormancy scores, the two fall dormancy groupings, and disease resistance and aphid resistance levels, we performed two sets of analysis. First, we adjusted simple linear regressions between

calculated variables and the formerly mentioned cultivar traits. Finally, we performed analyses of variance using models including each of the traits described above as fixed effects and variety nested in each trait as random. That model was used for all traits except for the fall dormancy groupings. In this case, the ANOVA was performed only using the dormancy groups as fixed effects, leaving the cultivar means as repetitions. This allowed us to have enough degrees of freedom to perform the analysis. Finally, Tukey tests were performed when differences were significant to assess differences between levels for each trait.

Finally, we looked inside fall dormancy scores and dormancy groups to check the existence of differences between cultivars inside each group. For this we used models with cultivar and location as fixed effects.

RESULTS

CHARACTERIZATION OF LOCATIONS AND CRISIS YEARS

Geographic information, climatic characterization, mean yields and data accumulation for the 12 initial locations is shown in Table 2.

A total of 9 locations showed crisis years and were included in the final analysis. The 9 locations present an average of 22 years of yield data, ranging from 18 to 24 years of accumulation. Mean productivity across locations was 11.77 TT. ha⁻¹ ranging from 5.83 (Anguil) to 20.68 (Marcos Juárez).

Annual mean yield for locations with irrigation ranges from 16.1 to 18.4 TT DM ha⁻¹ being largely superior to rainfed locations with the exception of Marcos Juárez (Córdoba), location with highest yields for the 12 locations. The rest of rainfed locations range from 5.8 to 13.2 TT DM ha⁻¹.

Table 2

Location, province or country, annual mean for temperature, rainfall, ET_0 , number of years of yield data and average yield for check varieties

<i>Location</i>	<i>Province or country</i>	<i>T^o (Celsius)</i>	<i>pp (mm/year)</i>	<i>²ET₀ (mm/year)</i>	<i>n</i>	<i>Productivity alfalfa (TT/ha)</i>	<i>Latitude S /Longitude W</i>
Anguil	La Pampa	15.6	763	790	24	5.8	36° 31' / 64° 00'
Concepción del Uruguay	Entre Ríos	18.3	1188	913	22	7.5	32° 29' / 58° 20'
Estanzuela	Uruguay	17.0	1153	1166	18	10.6	34° 20' / 57° 42'
General Villegas	Buenos Aires	16.5	855	795	23	13.2	35° 02' / 63° 01'
Hilario Ascasubi ¹	Buenos Aires	15.1	469	767.5	20	17.4	39° 22' / 62° 38'
Manfredi	Córdoba	16.8	753	885	22	9.4	31° 41' / 63° 46'
Marcos Juárez	Córdoba	18.0	800	898	20	20.7	32° 41' / 62° 09'
Paraná	Entre Ríos	18.8	1104	930	21	10.6	31° 50' / 60° 31'
Rafaela	Santa Fe	18.7	987	953	22	12.4	31° 12' / 61° 30'
Santiago del Estero ¹	Santiago del Estero	20.4	600	1065	24	16.1	27° 48' / 64° 16'
Viedma ¹	Rio Negro	14.9	339	740	8	18.4	40° 47' / 63° 03'
Villa Mercedes	San Luis	15.7	730	790	21	9.2	33° 39' / 65° 02'

¹ Locations with supplementary irrigation ² Climatic Thornthwaite ET_0 for Argentinian locations (Bianchi & Cravero, 2010) and Penman-

Monteith average for the period analyzed for Uruguay (INIA, 2020).

The range of crisis severity values was between 0.4 and 0.74 with an average of 0.51. For the total of 22 crisis, 9 were drought related, 5 water-excess related, and 7 were unrelated with those conditions according to our classification.

Table 3

Locations, crisis years, type and severity of the crisis and subtraction rainfall – ET_0 used to classify crisis years

Location	Crisis year	Type of crisis	Crisis severity	$pp - ET_0$
Anguil	1994	Drought	0.59	-225
Anguil	2006	Drought	0.40	-181
Anguil	2007	Drought	0.57	-138
Anguil	2008	Drought	0.74	-231
Anguil	2009	Water excess	0.60	227
Anguil	2011	Drought	0.47	-187
Concepción del Uruguay	2008	Neutral	0.42	90
Concepción del Uruguay	2010	Neutral	0.51	27
Estanzuela	2007	Drought	0.43	-403
Estanzuela	2010	Drought	0.66	-384
General Villegas	2016	Water excess	0.64	335
Marcos Juárez	2001	Neutral	0.40	78
Paraná	1999	Water excess	0.46	480
Paraná	2005	Drought	0.41	-139
Paraná	2015	Water excess	0.48	369
Rafaela	2009	Neutral	0.41	111
Rafaela	2014	Water excess	0.63	179
Santiago del Estero	1994	Neutral	0.43	-547
Santiago del Estero	1999	Neutral	0.47	-327
Villa Mercedes	2011	Drought	0.46	-118
Villa Mercedes	2015	Neutral	0.59	128

CHARACTERIZATION OF CULTIVARS

For the 59 cultivars with more than 3 resilience values, annual productivity of cultivars across locations ranged from 11.50 to 13.97 t MS ha⁻¹ and significant differences were detected among cultivars ($p < 0.01$). Mean stability of cultivars across locations ranged from 3.82 to 24.65, and cultivars were significantly different in stability ($P < 0.01$). Mean *resilience* of cultivars across locations was not significantly different among cultivars ($P = 0.55$). None of the three calculated resilience subtypes were significantly different at the cultivar level.

The adjusted means across locations for the subset of cultivars present in more than 3 crisis are presented in Table 4.

Table 4

Number of locations used for each cultivar (L), means of productivity (tt DM ha⁻¹), stability, general resilience, resilience to drought, resilience to water excess, neutral resilience, number of means used for each variable (ng, nd, ne, nn) and dormancy score (DS) for 59 alfalfa cultivars evaluated in Uruguay and Argentina. Means followed by the same letter are not statistically different ($\alpha = 0.05$)

cultivar	L	Productivity	Stability	General Resilience	ng	Drought resilience	nd	Water excess resilience	ne	Neutral resilience	nn	DS
5681	4	12.3 bcdef	4.1 c	0.5	8	0.6	4	0.2	2	0.6	2	7
5939	5	13.0 abcdef	4.6 c	0.5	9	0.6	4	0.3	2	0.5	3	9
aca_605	6	12.4 bcdef	3.9 c	0.5	12	0.6	4	0.5	4	0.5	4	6
aca_903	5	12.6 abcdef	5.5 c	0.5	9	0.6	2	0.4	3	0.6	4	9
alfa_70	4	12.2 bcdef	4.4 c	0.5	7	0.6	3	0.2	2	0.7	2	7
andina	3	13.1 abcdef	5.8 bc	0.5	8	0.7	4	0.4	1	0.4	3	6
armona	7	12.5 abcdef	4.6 c	0.5	10	0.6	3	0.4	4	0.5	3	8
bacana	5	13.2 abcdef	5.6 bc	0.5	7	0.6	5	0.4	1	0.5	1	9
bar_pal_10	4	12.9 abcdef	6.0 bc	0.6	7	0.6	3	0.4	1	0.8	3	10
baralfa_85	4	12.7 abcdef	4.3 c	0.6	9	0.7	5	0.5	1	0.6	3	8
baralfa_9242	5	13.0 abcdef	4.9 c	0.6	10	0.6	6	0.4	1	0.7	3	9
barbara_sp_inta	6	13.3 abcde	4.7 c	0.5	9	0.6	3	0.3	2	0.6	4	9
cuf_101	4	12.0 abcdef	6.2 bc	0.5	5	0.6	1	0.3	1	0.6	3	9
cw_1010	4	13.5 abcd	5.7 c	0.5	9	0.7	5	0.4	2	0.5	2	10
cw_194	4	13.5 abcd	6.0 bc	0.6	8	0.6	3	0.4	2	0.7	3	9
cw_620	6	12.2 cdef	4.6 c	0.5	13	0.5	5	0.6	4	0.5	4	6
cw_660	4	13.8 abcde	5.0 bc	0.5	4			0.5	3	0.6	1	6
cw_830	4	13.5 abcd	6.1 bc	0.6	9	0.7	5	0.4	2	0.6	2	8
dk_166	3	12.0 bcdef	4.8 c	0.4	6	0.5	3	0.2	2	0.6	1	6
dk_191	5	13.1 abcdef	5.2 c	0.5	8	0.7	3	0.4	2	0.5	3	9
dk_194	3	13.4 abcde	7.2 bc	0.6	8	0.6	4	0.5	1	0.7	3	9
don_enrique	4	12.1 cdef	4.5 c	0.4	8	0.5	3	0.4	2	0.3	3	6
ebc_90	4	13.0 abcdef	5.5 c	0.6	8	0.7	3	0.4	2	0.6	3	9
franca	4	12.8 abcdef	5.0 c	0.5	9	0.6	5	0.4	1	0.5	3	8
g_969	6	12.8 abcdef	5.1 c	0.5	12	0.6	4	0.4	4	0.6	4	9
garufa	4	12.2 bcdef	6.2 bc	0.5	9	0.6	5	0.3	1	0.4	3	6
lps_8500	6	13.4 abcd	5.5 c	0.5	11	0.6	3	0.4	4	0.7	4	9
lps_9500	5	13.2 abcde	5.4 c	0.6	9	0.7	3	0.5	3	0.6	3	9
magna_601	4	11.8 ef	24.6 a	0.5	9	0.6	5	0.4	1	0.4	3	6
magna_804	4	13.6 abcd	4.0 c	0.6	8	0.7	6	0.5	1	0.5	1	8
mecha	5	13.2 abcde	6.9 bc	0.6	8	0.6	4	0.3	1	0.7	3	9
medina	4	12.4 abcdef	5.1 c	0.5	8	0.6	4	0.4	2	0.5	2	8
milonga_ii	4	13.3 abcde	5.0 c	0.6	10	0.7	5	0.5	2	0.7	3	9
mireya	4	13.2 abcde	4.4 c	0.6	9	0.6	5	0.4	1	0.6	3	10
monarca_sp_inta	8	12.8 abcdef	4.8 c	0.5	19	0.6	7	0.3	5	0.6	7	8
p5681	4	12.7 abcdef	11.9 b	0.4	7	0.6	3	0.5	1	0.3	3	7
pampa_flor	3	11.5 def	5.5 bc	0.7	4	0.8	3	0.4	1			6
panalfa_90	4	13.6 abcd	5.8 bc	0.5	8	0.6	3	0.4	2	0.6	3	9
patriarca	5	13.1 abcdef	4.8 c	0.5	6	0.8	2	0.4	2	0.6	2	9
pf_9000	5	13.6 abcd	6.3 bc	0.6	9	0.7	2	0.4	3	0.7	4	9
pintado	4	12.0 def	5.9 bc	0.5	9	0.6	5	0.6	1	0.4	3	6
pro_inta_carmina	4	12.4 abcdef	5.6 bc	0.6	8	0.6	4	0.4	1	0.7	3	8

pro_inta_lujan	7	13.2 abcde	4.4 c	0.5	14	0.5	7	0.5	4	0.5	3	6
pro_inta_mora	5	13.2 abcde	5.4 c	0.6	11	0.7	4	0.4	3	0.6	4	9
pro_inta_patricia	7	13.7 ab	4.4 c	0.5	12	0.6	5	0.4	4	0.5	3	7
pro_inta_super_monarca	6	13.0 abcdef	5.0 c	0.5	12	0.7	4	0.4	4	0.6	4	8
queen_910	5	12.3 abcdef	4.6 c	0.5	6	0.7	2	0.3	2	0.5	2	9
Regina	5	12.5 abcdef	4.1 c	0.4	9	0.6	2	0.4	3	0.4	4	6
salina_pv	3	12.9 abcdef	5.9 bc	0.6	7	0.6	2	0.4	2	0.7	3	9
sofia	3	13.1 abcdef	4.6 c	0.6	7	0.8	4	0.6	2	0.5	1	8
venus	4	12.3 abcdef	4.3 c	0.5	7	0.5	3	0.2	2	0.7	2	6
verdor	5	12.9 abcdef	4.6 c	0.6	11	0.6	6	0.5	2	0.6	3	8
verzy	4	11.6 f	3.8 c	0.5	10	0.6	5	0.5	2	0.4	3	6
victoria_sp_inta	5	12.3 bcdef	4.2 c	0.5	12	0.6	6	0.2	2	0.6	4	6
villa	5	13.1 abcdef	4.9 c	0.6	10	0.6	6	0.3	1	0.6	3	9
wl_1058	6	13.9 a	5.1 c	0.5	11	0.6	3	0.4	4	0.6	4	10
wl_611	6	12.9 abcdef	4.4 c	0.5	13	0.5	5	0.5	4	0.4	4	6
wl_818	6	13.8 abc	7.2 bc	0.5	7	0.7	2	0.5	3	0.5	2	8
wl_903	4	14.0 a	4.9 c	0.5	10	0.6	5	0.4	2	0.6	3	9

ASSOCIATION BETWEEN CULTIVAR TRAITS

Table 5

Probability of significance for slope parameter for linear regression (top and right) and Pearson correlation coefficient (r) value (bellow and left). R values are shown for pair of variables where significance was higher than 0.05

	Productivity	Stability	Resilience	Drought Resilience	Water excess resilience	Neutral Resilience	Dormancy score	Dormancy clusters	Aphids Resistance	Disease resistance	Health score
Productivity		0.23	<0.01	<0.01	0.06	0.02	<0.01	<0.01	0.32	0.11	0.24
Stability			0.67	0.62	0.45	0.25	0.45	0.39	0.74	0.57	0.96
Resilience	0.5			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.62	0.21	0.33
Drought resilience	0.44		0.68		0.01	0.2	<0.01	<0.01	0.28	0.74	0.75
Water excess resilience			0.37	0.33		0.02	0.96	0.61	0.82	0.61	0.49
Neutral resilience	0.3		0.58		-0.32		<0.01	<0.01	0.92	0.08	0.06
Dormancy score	0.61		0.6	0.48		0.58		<0.01	0.1658	0.02	0.05
Dormancy cluster	0.55		0.61	0.51		0.52	0.89		0.1467	<0.01	0.04
Aphid resistance										<0.01	<0.01
Disease resistance							0.32	0.39	0.55		<0.01
Health score								0.28	0.79	0.77	

Associations between variables calculated.

Degree of association between the calculated variables was studied through the adjustment of 15 linear regressions between the values of productivity, stability and the different types of resilience (Table 5). A positive and significant association is observed between the level of productivity and resilience of the cultivar ($p < 0.01$). The association is also significant when the means of resilience are grouped into crises associated with drought and *general* conditions ($p < 0.01$ and $p = 0.02$, respectively). The linear association of productivity and resilience associated with water excesses was only marginally significant ($p = 0.06$).

Stability was not significantly associated with any of the other computed variables.

Associations between variables and other cultivar traits

The regression adjustment using the dormancy score as an independent variable showed significant and positive linear associations with the level of productivity, resilience, resilience to drought and resilience associated with neutral conditions. Higher dormancy scores were then associated with higher levels of both productivity and the 3 types of resilience. Stability did not show a significant linear association with dormancy score (Table 5 and Figure 2).

Figure 2

General, drought, neutral and water excess resilience, and productivity related to dormancy score for alfalfa varieties evaluated in 9 locations from Uruguay and Argentina.

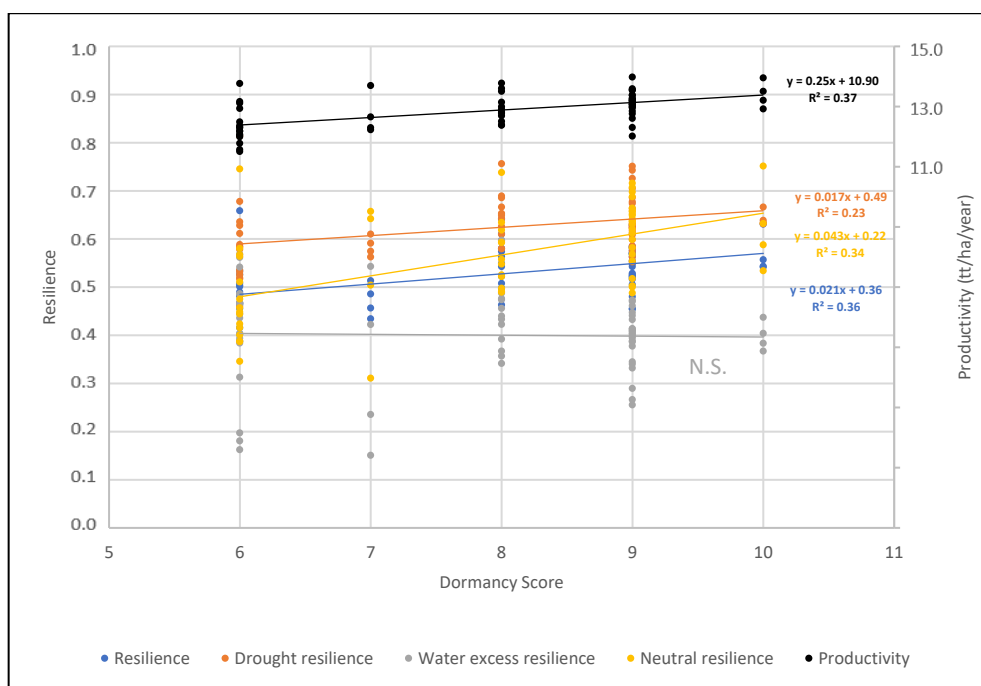


Table 6 summarizes results from ANOVAS where differences for the variables studied using dormancy scores as independent variable were significant. Adjusted mean values and standard error for those variables are shown for dormancy scores 6 to 10. Letters resulting from Tukey test analysis are presented next to mean values on the table. The higher the dormancy score the higher the productivity mean value, ranging from 12.4 to 13.4 TT.MS. ha^{-1} . However, there were not statistical differences for most of the groups (Tukey test, $\alpha = 0.05$).

Dormancy score N° 6 showed lower general and neutral resilience values compared to DS 8 to 10.

Table 6

Adjusted means and standard error (SE) for productivity, general, drought, and neutral resilience for different dormancy scores. Means followed by same letter are not statistically different (tukey, $\alpha = 0.05$)

<i>DS</i>	<i>Productivity</i>		<i>General resilience</i>		<i>Drought resilience</i>		<i>Neutral resilience</i>	
	<i>Mean</i>	<i>SE</i>	<i>Mean</i>	<i>SE</i>	<i>Mean</i>	<i>SE</i>	<i>Mean</i>	<i>SE</i>
10	13.4a	0.3	0.57a	0.03	0.65a	0.02	0.63a	0.04
9	13.1a	0.1	0.54a	0.01	0.64a	0.03	0.62a	0.01
8	13.0a	0.1	0.55a	0.01	0.64a	0.01	0.57ab	0.03
7	12.7ab	0.3	0.47ab	0.03	0.59a	0.02	0.53ab	0.04
6	12.4b	0.1	0.48b	0.01	0.58a	0.03	0.48b	0.02

Dormancy clusters: Results for two different ways of clustering dormancy scores (including DS 8 as both intermediate dormancy and non-dormant) are shown in Table 7. Statistical differences were found for productivity and two types of resilience in both clusterings. Drought resilience means are statistically different only when DS 8 is classified as non-dormant.

Table 7

Productivity and different resilience types means for two ways of clustering dormancy scores

<i>Dormancy score</i>	<i>P</i>	<i>SE</i>	<i>R (general)</i>	<i>SE</i>	<i>R (neutral)</i>	<i>SE</i>	<i>R (drought)</i>	<i>SE</i>
Non-dormant (DS: 8, 9 y 10)	13.1a	0.1	0.55a	0.01	0.60a	0.01	0.64a	0.01
Intermediate dormancy (DS: 6 y 7)	12.5b	0.1	0.49b	0.01	0.49b	0.02	0.59b	0.01
Non-dormant (DS: 9 y 10)	13.1a	0.1	0.55a	0.01	0.62a	0.02	-	-
Intermediate dormancy (DS: 6, 7 y 8)	12.7b	0.1	0.51b	0.01	0.53b	0.02	-	-

Including DS 8 as non-dormant: in line with results previously showed, productivity means generated in the ANOVA for non-dormant cultivars were greater compared to

the intermediate dormancy group (13.1 vs. 12.5 tt/ha, $p < 0.01$). Stability was similar in both groups (23.1 and 23.9 for intermediate and no dormancy groups, respectively) not showing statistical differences. General, neutral and drought resilience was higher for the non-dormant group.

The linear regression for productivity of cultivars vs. dormancy groups was significant and positive with a parameter estimate of 0.647 ($p > 0.01$, $Rsq = 0.30$, adj $Rsq = 0.29$, $n = 46$). There was no association with stability and a positive association with general resilience (parameter = 0.074, $p < 0.01$, adj $Rsq = 0.39$, $Rsq = 0.41$, $n = 46$). Drought and water excess types of resilience did not show a significant regression ($p = 0.56$ and $p = 0.07$, respectively).

Including DS 8 as intermediate: in this case, statistical differences were found for the same variables, except for drought resilience. Numerical differences were smaller for all variables evaluated when using this clusters.

The linear regression of productivity of cultivars and dormancy groups was significant and positive with a parameter estimate of 0.537 ($p = 0.01$, $Rsq = 0.21$, Adj $Rsq = 0.20$, $n = 46$). There was no association with stability ($p = 0.63$) and a positive association with general resilience (parameter = 0.049, $p < 0.01$, $Rsq = 0.18$, Adj $Rsq = 0.16$, $n = 46$). Drought and water excess types of resilience did not show a significant regression either ($p = 0.71$ and $p = 0.98$, respectively).

Disease and aphid resistance: the analysis performed to check association between all variables calculated and disease and aphid resistance levels showed no significant differences (ANOVA) or associations (regressions).

DISCUSSION

Location and crisis years

Drought stands out as the main cause in the occurrence of crisis years, coinciding with what was obtained for previous work in North America (Picasso et al., 2019). Although climate in both regions has markedly different characteristics, water deficit appear as the main cause reducing alfalfa yields. This occurs despite the outstanding ability of this species to produce in conditions of reduced water availability thanks to various

genetic, physiological and anatomical mechanisms (Quan et al., 2016), as well as its extensively documented root system (Jung & Larson, 1972).

Varieties characterization

Our first hypothesis was not rejected: differences were found for the productivity and stability variables. The statistical significance of these results makes it possible to define a group of 19 cultivars with significantly higher yields (letter A, Table 3) and a second group of 12 cultivars with significantly lower yields (letter F, Table 3). Other varieties presented yield means not statistically different from any of those groups. *Magna 601* presents a high stability indicator, standing out particularly from the rest. However, this material has a reduced productivity value. *Magna 601* would, therefore, be a cultivar with relatively low but stable yields over time.

For our database, resilience indicators at the variety level did not generate statistical differences.

Our methodology presented a generally reduced ability to find consistent superior cultivars for the variables here estimated.

Relationship between calculated variables

Our second hypothesis proposed a negative association between productivity and resilience or stability of cultivars. Although resilience values for the 59 varieties analyzed were not statistically different, its association with productivity of the cultivar was significant and positive. This would indicate for the region in study that cultivars, or groups of cultivars, with higher yields under normal conditions are likely to present higher yields in crisis years. Our results differ with Picasso et al. (2019) findings, where resilience values were negatively associated with those of productivity. This would indicate that, for the region analyzed in the current paper, there are groups of materials with consistently higher yields in a wide range of environments. Therefore, there is no tradeoff shown between the annual yield in normal situations and those of crisis situations, behavior indicated by Sadras & Richards (2014) as one of the possible expressions of phenotypic plasticity or, what is the same, the relationship between the expression of yields in favorable and stressful conditions.

General resilience values were also associated with specific resilience levels. The first includes the values associated with the three subtypes for its calculation, hence the existence of a positive and significant association between them is expected.

Association between variables calculated and other cultivar traits

There is a positive association between the dormancy scores and the following variables: productivity and resilience (general, associated with droughts and conditions not defined as excesses) (Tables 5 and 6; Figure 2). These results are in line with the positive association between the variables mentioned in the previous section. Groups of cultivars with lower levels of winter dormancy would present a greater adaptation to the region in terms of forage production, both under *average* and critical environments. Once again, this contrasts with results obtained for the northern region of the United States and Canada by Picasso et al. (2019), where dormancy scores showed a negative correlation with resilience. The two papers obtained, however, a positive association between dormancy scores and productivity.

Varieties evaluated by Picasso et al. (2019) for North American region belong to dormancy scores 3 to 5. These DS are not present in our study area. Climatic conditions for that region (i.e., intense winters in which pastures going through prolonged periods under snow or frozen soils) highly differ from those found in the area analyzed in this study (Table 2). It seems logical, therefore, that dynamics of the species and the relationship with each environment would not be the same. Although in both cases, lower levels of dormancy are associated with higher production in normal years, probably due to their longer growth period (Basigalup, 2007; Carámbula, 2002; Undersander, 2011), their production levels in highly restricted environments (crises years) express different behaviors depending on the region.

Pembleton & Sathish (2014) show that lower DS's tend to express greater resistance to water deficit conditions for a trial carried out in Tasmania, Australia. These authors relate the differential expression of genes associated with resistance to low temperatures, common in this type of cultivars (GR 5 and lower), as responsible for higher drought resistance levels. This relationship has been previously described by Jung & Larson (1972). Varieties with high levels of winter dormancy were consistently

superior under moderate water deficit conditions imposed in this work. However, the differences found in the transcription of genes associated with resistance to drought, as well as other physiological and growth responses, were not significant when water deficits were increased from 14 to 35 days. As already noted, these type of varieties with marked winter dormancy which are present in the previous paper (Picasso et al., 2019) do not form part of our database.

In any case, even if the group of materials with the most marked dormancy present in our base had a relatively higher tolerance to mild water deficiencies, which could allow a greater accumulation of dry matter during water restricted periods, the production at the end of the annual accumulation period of different varieties would also be influenced by the length of the active growing period. The total annual dry matter accumulation would hence depend on the relative effect of these opposing forces. If we consider that the greatest probability of a strong water deficiency is at the center of the growing season of the species (i.e., summer), it is possible that varieties with longer dormancy periods (which implies to restart their growth later in the spring and to stop it earlier in the fall) would not be actively growing during less critical periods with closer to optimal growth conditions in which droughts are less likely to occur. The above would imply a comparative advantage for materials with lower dormancy periods during years with strong summer water restrictions. These would generate a higher dry matter accumulation in those periods with good growth possibilities (spring and autumn) and less probability of water deficit. It is possible that this differential accumulation would be of greater magnitude than the possible advantage that cultivars with greater dormancy (and, therefore, better theoretical adaptation to drought) would have in an extreme summer. All this could be explaining why, for our conditions, and our groups of varieties, cultivars without dormancy would be associated with both higher productivities and higher levels of resilience.

Bouizgaren et al. (2013), evaluating 16 alfalfa materials and their resistance to drought under Moroccan conditions, concludes that, for those varieties, adaptation to drought did not seem to be highly correlated with dormancy scores, but to the site of origin and improvement of cultivars. During the last decades, there has been in our region a tendency to use and select varieties with shorter dormancy periods (Martín et al.,

2020). Hence, selected and improved cultivars for the region in the last decades would also have been based on increasing dormancy scores.

Bearing all this in mind, it is difficult to determine if higher levels of resilience allegedly associated with higher dormancy scores (i.e., non-dormant cultivars) would be as a result of an intrinsic association to this character, or if it could be just a confounding effect resulting from concurrent *selection* for low dormancy and other traits associated with better general adaptation to our environmental conditions and limitations.

The same consideration could be made for productivity levels. Although there was a positive relationship between the level of productivity and level of dormancy, there were also large differences within each group. This confirms the idea that, although the level of dormancy that a cultivar presents could partially explain the yields obtained, the potential of a cultivar would also be strongly related to its specific genetics and history of genetic improvement.

Implications for production systems

The results presented could lead to the conclusion that the best adapted materials for the region under study are non-dormant cultivars. Even though these groups of cultivars presented higher average yields in most environments analyzed here (under normal and critical conditions), a few considerations should be taken into account.

There is abundant evidence showing that cultivars with higher dormancy scores are associated with lower levels of persistence (Pembleton & Sathish, 2014; Ayala et al., 2010; Basigalup, 2007; Putnam et al., 2005; Rebuffo, 2000; among others). Various morphophysiological explanations are documented in this regard, especially in crops with poorly controlled management. Persistence, for instance, is one of the traits not analyzed in the current paper. This information should be taken into account when selecting materials for production systems, especially when the establishment of longer-lived pastures are sought. There are many guides publicly available designed to aid during the process of selecting the cultivars that consider multiple variables, and, above all, the objectives sought.

Dormancy clusters

In terms of the numbers analyzed in this investigation, DS 8 seems to relate better with groups 9 and 10 than with groups 6 and 7. For the region under study, clustering cultivars 6 and 7 as intermediate and 8 to 10 as non-dormant would be the most accurate way of grouping varieties taking into account productivity levels and resilience as assessed in our work. We therefore recommend adopting this criterion to separate dormancy clusters in variety trials in Uruguay, where threshold dormancy score to separate these groups was not completely clear up to date. These clusters should be checked with field measurements to demonstrate consistency of these groupings based on existing parameters (NAAIC, 2004).

It is previously known for this region that cultivars with strong fall dormancy scores are not well adapted. Since they were not present in high numbers in the data set, we could not assess resilience numbers for that group (dormancy scores N° 5 and below).

Dataset and limitations

Although the approach proposed in this paper and previous one (Picasso et al., 2019) has a lot of potential as an option to add value to long term data sets conjugating many locations, there are certain limitations we found in the data set analyzed on this paper. First, the short duration of both trial programs (3 to 4 years, compared to the 6 years used in the previous paper) implies that cultivars are present for a lower amount of time in the trials, hence, it is less likely for a specific cultivar to be present during a crisis year.

The fact that trials are established every other year for Argentinian locations, most of our data set implies that, for a specific year, the estimation of production means including stand age as a fixed effect is not possible since data for a specific year only includes 2 age values in a specific location and not all 4 possible ones. This gaps existing in the dataset make it not possible to include interactions between several variables when generating statistical models.

Although this is expected and general in most variety trials, the fact that most of the cultivars are planted only once or twice (173 out of 355) on each location makes that a lot of the information gets lost during the process of calculations. At the same time, this reduces the n for each cultivar to calculate resilience means across locations

reducing precision, hence reducing the possibility of drawing strong conclusions (i.e., low r or r^2). This fact is partially compensated by the multiple locations where a cultivar is checked.

Regarding the strengths of the data sets, Argentinian trial program has the advantage that multiple locations are used and most of cultivars are tried on most locations on each cycle. Although the duration of the trials is shorter than trials analyzed in previous papers, the 4-year duration allows for a good overlap of cultivars and stand ages. Despite the fact that each trial at the Uruguayan trial program is designed to last only 3 years, its strengths are that trials are established every year, increasing the age overlap, hence reducing gaps on dataset. Also, most cultivars are seeded at least in two different trials (two sowing dates usually consecutive), unless seed company decides to remove the variety from the trials.

CONCLUSIONS

For the region under study, the groups of materials with no dormancy would be consistently more productive and would present superior resilience (i.e., resistance) to critical conditions, not associated with water excess, than intermediate dormancy cultivars.

Clustering materials with dormancy scores 6 and 7 (as cultivars with intermediate dormancy) and cultivars 8 to 10 (as non-dormant cultivars) generate more contrasting groups and more internally homogeneous in terms of productivity and resilience calculated with our methodology. This would confirm that the proposed is the most accurate criterion to group cultivars and variety trials for the region under study.

The results shown are valid for a life span of pure alfalfa crops between 3 to 4 years. Varieties are not analyzed based on persistence and other relevant characteristics.

References

- Altier, N., Rebuffo, M., & Cabrera, K. (2010). Enfermedades y plagas en pasturas. Serie técnica INIA, 183, 145.

- Annicchiarico, P., Barrett, B., Brummer, E. C., Julier, B., & Marshall, A. H. (2015). Achievements and Challenges in Improving Temperate Perennial Forage Legumes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34(1–3), 327–380. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.898462>
- Astigarraga, L., Cruz, G., Caorsi, M. L., Taks, J., Cobas, P., Mondelli, M. y Picasso, V. (2013). *Clima de cambios: Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay* (Vol. 4 Sensibilidad y capacidad adaptativa de la lechería frente al cambio climático). Montevideo: FAO, MGAP (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca).
- Atlin, G. N., & Frey, K. J. (1990). Selecting Oat Lines for Yield in Low-Productivity Environments. *Crop Science*, 30(3), 556–561. <https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000030017x>
- Ayala, W., Reyno, R., Docanto, J., Coto, B., Olmos Lopez, F., Silva, J. A., Bemhaja, M., Rebuffo, M., Real, D., Garcia, J. A., & Rossi, C. (2010). *Forrajeras: Catálogo de cultivos 2010*. INIA. Unidad de comunicación y transferencia de tecnología.
- Barrenchea, P., & Guerra, D. (Eds.). (2010). *Estudio nacional de economía del cambio climático*. Uruguay. CEPAL.
- Basigalup, D. H. (Ed.). (2007). *El cultivo de la alfalfa en la Argentina*. Ediciones INTA.
- Bianchi, A. R., & Cravero, S. A. C. (2010). Geoportal IDE Salta-WMS [Map]. <http://geoportal.idesa.gob.ar/geoserver/ows?version=1.1.1>
- Bouizgaren, A., Farissi, M., Ghoulam, C., Kallida, R., Faghire, M., Barakate, M., & Al Feddy, M. N. (2013). Assessment of summer drought tolerance variability in Mediterranean alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars under Moroccan fields conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(1), 147-160. <https://doi.org/10.1080/03650340.2011.606216>
- Caorsi, M. L., Cruz, G., Terra, R., & Astigarraga, L. (2018). Variación de la precipitación y la ocurrencia de sequías en la cuenca lechera del SW del Uruguay en el período 1939-2011. *Agrociencia Uruguay*, 22(1), 116-123. <https://doi.org/10.31285/agro.22.1.12>
- Carámbula, M. (2002). *Pasturas y forrajes: Potenciales y alternativas para producir forraje*. Hemisferio Sur.

- Ceccarelli, S., & Grando, S. (1991). Environment of selection and type of germplasm in barley breeding for low-yielding conditions. *Euphytica*, 57(3), 207-219. <https://doi.org/10.1007/BF00039667>
- Ceccarelli, S., Grando, S., & Impiglia, A. (1998). Choice of selection strategy in breeding barley for stress environments. *Euphytica*, 103(3), 307-318. <https://doi.org/10.1023/A:1018647001429>
- Chen, D., Gao, G., Xu, C.-Y., Guo, J., & Ren, G. (2005). Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Climate Research*, 28(2), 123-132. <https://doi.org/10.3354/cr028123>
- Collins, M., Nelson, C. J., Moore, K. J., & Barnes, R. F. (Eds.). (2018). *Forages, Volume 1: An Introduction to Grassland Agriculture* (Seventh edition). Wiley Blackwell.
- Cruz, G., Baethgen, W., Picasso, V., & Terra, R. (2014). Análisis de sequías agronómicas en dos regiones ganaderas de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 18(1), 126-132.
- Dawson, T. P., Rounsevell, M. D. A., Kluvánková-Oravská, T., Chobotová, V., & Stirling, A. (2010). Dynamic properties of complex adaptive ecosystems: Implications for the sustainability of service provision. *Biodiversity and Conservation*, 19(10), 2843-2853. <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9892-z>
- DIEA-MGAP (Dirección de Investigaciones Económicas Agropecuarias-Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca). (2011). Censo general agropecuario. Resultados definitivos.
- Grimm, V., & Wissel, C. (1997). Babel, or the ecological stability discussions: An inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion. *Oecologia*, 109(3), 323-334. <https://doi.org/10.1007/s004420050090>
- Hakl, J., Mofidian, S. M. A., Kozová, Z., Fuksa, P., & Jaromír, Š. (2019). Estimation of lucerne yield stability for enabling effective cultivar selection under rainfed conditions. *Grass and Forage Science*, 74(4), 687-695. <https://doi.org/10.1111/gfs.12456>
- Hodgson, D., McDonald, J. L., & Hosken, D. J. (2015). What do you mean, 'resilient'? *Trends in Ecology & Evolution*, 30(9), 503-506. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.010>

- INASE (INSTITUTO NACIONAL DE SEMILLA). (2020). INASE Uruguay-Estadística. <https://www.inase.uy/Estadistica/>
- INIA (INSTITUTO DE INVESTIGACION AGROPECUARIA). (2020). Portal INIA Banco datos agroclimatico. <http://www.inia.uy:80/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- INTA (INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGROPECUARIA). (2019). Red nacional de evaluación de cultivares de Alfalfa. INTA. <https://inta.gob.ar/documentos/directorio-de-avances-en-alfalfa>
- INTA (INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGROPECUARIA). (2020). SIGA - Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica. <http://siga2.inta.gov.ar/#/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Ed.). (2014). Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability: Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IRI (International Research Institute for Climate and Society). (2011). Time Scales Map Room. [index.html](http://www.iri.columbia.edu/index.html)
- Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Bezemer, T. M., Bonin, C., Bruelheide, H., de Luca, E., Ebeling, A., Griffin, J. N., Guo, Q., Hautier, Y., Hector, A., Jentsch, A., Kreyling, J., Lanta, V., Manning, P., ... Eisenhauer, N. (2015). Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 526(7574), 574–577. <https://doi.org/10.1038/nature15374>
- Jung, G. A., & Larson, K. L. (1972). Cold, Drought, and Heat Tolerance. In *Alfalfa Science and Technology* (pp. 185–209). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr15.c9>
- Lamb, J. F. S., Sheaffer, C. C., Rhodes, L. H., Sulc, R. M., Undersander, D. J., & Brummer, E. C. (2006). Five Decades of Alfalfa Cultivar Improvement: Impact on Forage Yield, Persistence, and Nutritive Value. *Crop Science*, 46(2), 902-909. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.08-0236>
- Li, X., & Brummer, E. C. (2012). Applied Genetics and Genomics in Alfalfa Breeding. *Agronomy*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/agronomy2010040>

- Liu, Y., Wu, Q., Ge, G., Han, G., & Jia, Y. (2018). Influence of drought stress on alfalfa yields and nutritional composition. *BMC Plant Biology*, 18(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1226-9>
- López-ridaura, S., Keulen, H. Van., Ittersum, M. K. van., & Leffelaar, P. A. (2005). Multiscale Methodological Framework to Derive Criteria and Indicators for Sustainability Evaluation of Peasant Natural Resource Management Systems. *Environment, Development and Sustainability*, 7(1), 51-69. <https://doi.org/10.1007/s10668-003-6976-x>
- Loreau M, Downing A, Emmerson M, Gonzalez A, Hughes J, Inchausti P, et al.. 2001. A new look at the relationship between diversity and stability. In: M. Loreau, et al., editors, *Biodiversity and Ecosystem function: Synthesis and perspectives*. Oxford Univ. Press, New York. p. 79–91.
- Marten, G. G. (1988). Productivity, stability, sustainability, equitability and autonomy as properties for agroecosystem assessment. *Agricultural Systems*, 26(4), 291-316. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(88\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0308-521X(88)90046-7)
- Martín, B., Coronel, A., & Sacido, M. (2020). *Medicago Sativa en la región centro-este de Argentina. Ocho lustros de historia*. e-Universitas UNR Journal, 1(23), Article 23.
- NAAIC (North American Alfalfa Improvement Conference). (2004). *Standard Tests to Characterize Alfalfa Cultivars Third Edition (Amended 2004)*. <http://www.naaic.org/resource/stdtests.php>
- Oliver, T. H., Heard, M. S., Isaac, N. J. B., Roy, D. B., Procter, D., Eigenbrod, F., Freckleton, R., Hector, A., Orme, C. D. L., Petchey, O. L., Proença, V., Raffaelli, D., Suttle, K. B., Mace, G. M., Martín-López, B., Woodcock, B. A., & Bullock, J. M. (2015). Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(11), 673-684. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.08.009>
- Otero, A., & Castro, M. (2019). Variability of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Seasonal Forage Production in the Southwest of Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 23(1), 65-75. <https://doi.org/10.31285/agro.23.1.9>
- Pembleton, K. G., & Sathish, P. (2014). Giving drought the cold shoulder: A relationship between drought tolerance and fall dormancy in an agriculturally important crop. *AoB PLANTS*, 6: Plu012, 1-17, <https://doi.org/10.1093/aobpla/plu012>

- Penalba, O. C., & Rivera, J. A. (2013). Future Changes in Drought Characteristics over Southern South America Projected by a CMIP5 Multi-Model Ensemble. *American Journal of Climate Change*, 02(03), 173-182. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.23017>
- Picasso, V., Brummer, C., & Liebman, M. (2010). Diversity and Stability in experimental grasslands communities. *Grassland Science in Europe*, 15, 827.
- Picasso, V., L. Astigarraga, I. Buffa, D. Sotelo, G. Américo, R. Terra, et al. (2011). Robustness of livestock farmers to climate variability: A case study in Uruguay. Paper presented at the 5th World Congress of Conservation Agriculture incorporating the 3rd Farming Systems Design Conference, Brisbane, Australia. 26–29 Sept. 2011.
- Picasso, V., C. Lizarralde, C. Molina, D. Bartaburu, H. Morales, and L. Astigarraga. (2013). A quantitative assessment of robustness to drought in livestock grazing systems in Uruguay. Paper presented at the First International Global Food Security Conference, Noordwijkerhout, the Netherlands. 29 Sept.–2 Oct. 2013.
- Picasso, V. D., Casler, M. D., & Undersander, D. (2019). Resilience, Stability, and Productivity of Alfalfa Cultivars in Rainfed Regions of North America. *Crop Science*, 59(2), 800-810. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.06.0372>
- Putnam, D., Orloff, S., & Teuber, L. (2005). Strategies for Balancing Quality and Yield in Alfalfa Using Cutting Schedules and Varieties. In *Proceedings, 35th California Alfalfa and Forage Symposium*, Visalia, CA (pp. 12-14).
- Quan, W., Liu, X., Wang, H., & Chan, Z. (2016). Comparative Physiological and Transcriptional Analyses of Two Contrasting Drought Tolerant Alfalfa Varieties. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1256. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01256>
- Rebuffo, M. (2000). Tecnología en alfalfa. INIA La Estanzuela.
- Rebuffo, M., Altier, & Coitiño, M. J. (2010). La resistencia a enfermedades en el mejoramiento genético de leguminosas forrajeras. In N. Altier, M. Rebuffo, & K. Cabrera, *Enfermedades y Plagas en Pasturas* (Vol. 183, p. 145).
- Russelle, M. P. (2013). The Alfalfa Yield Gap: A Review of the Evidence. *Forage & Grazinglands*, 11(1), FG-2013-0002-RV. <https://doi.org/10.1094/FG-2013-0002-RV>
- Sabatier, R., Oates, L. G., Brink, G. E., Bleier, J., & Jackson, R. D. (2015). Grazing in an Uncertain Environment: Modeling the Trade-Off between Production and

- Robustness. *Agronomy Journal*, 107(1), 257–264.
<https://doi.org/10.2134/agronj14.0357>
- Sadras, V. O., & Richards, R. A. (2014). Improvement of crop yield in dry environments: Benchmarks, levels of organisation and the role of nitrogen. *Journal of Experimental Botany*, 65(8), 1981-1995. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru061>
- Sordo-Ward, A., Bejarano, M., Iglesias, A., Asenjo, V., & Garrote, L. (2017). Analysis of Current and Future SPEI Droughts in the La Plata Basin Based on Results from the Regional Eta Climate Model. *Water*, 9(11), 857. <https://doi.org/10.3390/w9110857>
- Tiscornia, G., Cal, A., & Giménez, A. (2016). Análisis y caracterización de la variabilidad climática en algunas regiones de Uruguay. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 42(1), 66-71.
- Tracy, B. F., Foster, J. L., Butler, T. J., Islam, M. A., Toledo, D., & Vendramini, J. M. B. (2018). Resilience in Forage and Grazinglands. *Crop Science*, 58(1), 31-42. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.05.0317>
- Undersander, D. J. (Ed.). (2011). *Alfalfa management guide*. American Society of Agronomy.
- Undersander, D. J. (2015). *Alfalfa management guide*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Urruty, N., Tailliez-Lefebvre, D., & Huyghe, C. (2016). Stability, robustness, vulnerability and resilience of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 15. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0347-5>
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. P. (2004). Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems. *Ecology and Society*, 9(2), art. 5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>