



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
MAGÍSTER EN HORTOFRUTICULTURA

**EVALUACIÓN DE LA PAR INTERCEPTADA POR EL CULTIVO, NDVI Y
CARACTERES AGRONÓMICOS EN CULTIVARES DE TRIGO INVERNAL
LIBERADOS EN CHILE DESDE 1965 A 2020**

POR
PABLO ANDRÉS MADARIAGA TEJOS

TUTOR: DR. ALEJANDRO DEL POZO LIRA
CO-TUTORA: DRA. ANA MARÍA MÉNDEZ ESPINOZA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER

CHILE

2020

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su unidad de procesos técnicos certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Talca, 2021

DEDICATORIA

A mi hijo Máximo que sin ti no podría seguir batallando, eres mis ojos, mi felicidad y mi mundo daré lo mejor de mí para que crezcas fuerte y lleno de amor.

A mis padres, por sus consejos y ayuda en los momentos que he estado muy complicado y no he visto la luz de esperanza que pueda de nuevo llevarme al buen camino.

A mis abuelos y mi Ita que en paz descansen y sé que de arriba me ayudan y están muy orgullosos de mí en seguir en el conocimiento de este hermoso mundo: la agronomía.

A mi padrino Jorge que de arriba en el cielo me está mirando orgulloso de mis logros.

A Francisca, me has ayudado bastante desde el comienzo en mis estudios hasta el final de este gran proceso de mi vida.

A mis hermanos, que de alguna manera siempre están allí en las buenas y en las malas, aunque estén muy lejos ellos siempre me han ayudado en todo.

A mi Tío Domingo que siempre me ha apoyado y ha sido como un segundo padre para mí.

A mis amigos, que con una pequeña ayuda de ellos me han dado ánimo y ahínco para cada día seguir adelante en este hermoso proceso de mi vida.

Título: Evaluación de la PAR interceptada, NDVI y caracteres agronómicos en cultivares de trigo invernal liberados en Chile desde 1965 a 2020

Title: Evaluation of crop-intercepted PAR, NDVI and agronomic traits in winter wheat cultivars released in Chile from 1965 to 2020

Estudiante: Pablo Andrés Madariaga Tejos

Fecha de inicio de la Tesis: 8 de mayo 2018.

Fecha de término de la Tesis: 26 mayo 2021.

Profesor guía: Dr. Alejandro Del Pozo Lira. Profesor Titular Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Talca. Dirección: Centro de Mejoramiento Genético y Fenómica Vegetal, Universidad de Talca, Av. Lircay S/N, 346000. Contacto: adelpozo@utalca.cl

Profesora Co-guía: Dra. Ana María Méndez Espinoza. Investigadora Instituto de investigaciones Agropecuarias, INIA Remehue. Dirección: Ruta 5, kilómetro 8 Norte, Osorno Contacto: ana.mendez@inia.cl

AGRACEDIMIENTOS

Deseo agradecer al programa de Magíster en Hortofruticultura de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Talca y todos sus integrantes que en conjunto forman esta noble institución por darme la oportunidad de seguir especializándome y realizar este hermoso postgrado que es una ayuda reveladora para mi presente y futuro.

Mis sinceros agradecimientos al Centro de Mejoramiento Genético y Fenómica Vegetal. En especial al Dr. Alejandro del Pozo Lira, por darme la oportunidad de pertenecer a este gran equipo, a la Dra. Ana María Méndez que sin su ayuda y su apoyo no podría haber terminado este hermoso proceso. A Dn. José Cares, al Dr. Abdelhalim Elazab al Dr. Kurt Ruf, a Felipe Moraga, a Ramón Amigo al Dr. Felix Estrada al Dr. Miguel Garriga y a todo el equipo que aportaron que esto sea posible.

De la misma manera agradezco al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria INIA y a todos sus profesionales que forman parte del centro de investigación más importante de Chile por permitir desarrollar mi trabajo en sus centros de investigaciones.

Por otro lado, agradezco el apoyo financiero brindado por Fondecyt Regular 1180252 que me permitió participar en el programa de Magister en Hortofruticultura de la Universidad de Talca. Ya que sin este apoyo financiero jamás podría haber logrado que esto sea posible.

I INDICE

I	INDICE	I
II	RESUMEN.....	III
III	ABSTRACT	IV
1	INTRODUCCIÓN	1
2	MARCO TEÓRICO	2
2.1	Importancia del trigo en el mundo y en Chile	2
2.2	Progreso genético	3
2.3	Programas de mejoramiento genético.....	4
2.4	Rendimiento en trigo como una función de la radiación interceptada	5
2.5	Rendimiento de grano y sus componentes agronómicos	8
2.5.1	Peso del grano	9
2.5.2	Número de granos.....	10
2.6	Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI).....	11
2.7	Duración del área foliar post antesis (“stay-green”).....	11
3	HIPÓTESIS	12
4	OBJETIVO	12
4.1	Objetivos específicos.....	12
5	MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
5.1	Descripción del sitio experimental.....	13
5.2	Manejo agronómico de los ensayos.....	14
5.3	Evaluación de la radiación interceptada por el cultivo y NDVI	15
5.4	Características fisiológicas.....	17
5.5	Rendimiento de granos y componentes	17
5.6	Análisis de datos.....	17
6	RESULTADOS	18
6.1	Rasgos agronómicos.....	18
6.2	Rendimiento del grano.....	19
6.3	Biomasa, altura de plantas e índice de cosecha.....	21
6.4	Componentes del rendimiento	21
6.5	Correlación entre el rendimiento y rasgos agronómicos.....	24
6.6	NDVI, PAR interceptado y eficiencia de uso de radiación (EUR).....	25
7	DISCUSIÓN	31

7.1 Rendimiento y sus componentes	31
7.2 Intercepción del PAR, permanencia del verdor y eficiencia uso de radiación.	34
8 CONCLUSIONES	36
9 BIBLIOGRAFÍA	37

II RESUMEN

El aumento del rendimiento en todas las especies de interés agrícola es atribuible al progreso genético. El trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) es uno de los principales cereales cultivados a nivel mundial, por este motivo constituye un pilar fundamental para garantizar la seguridad alimentaria. Según proyecciones es necesario una progresión en el rendimiento de 2,5 % por año para abastecer las necesidades alimenticias para el año 2050. La selección de los nuevos cultivares se hace considerando rendimiento de grano y tolerancia a estreses, principalmente bióticos. Sin embargo, se hace necesario incorporar evaluaciones de diferentes rasgos fisiológicos asociados al rendimiento, para identificar caracteres asociados al rendimiento de grano. En Chile, variedades de trigo invernal tienen un alto potencial de rendimiento, sobrepasando las 15 t ha⁻¹, en el sur del país, sin embargo, no se conocen qué rasgos fisiológicos están asociados a ese potencial de rendimiento. El objetivo general de este estudio fue evaluar los cambios en rasgos morfo-fisiológicos y agronómicos implicados en la mejora genética del trigo de invierno liberados entre 1965 y 2020, en ambientes de alto rendimiento. Para cumplir este objetivo, se plantearon cuatro objetivos específicos: 1) Evaluar los cambios en el rendimiento de grano y sus componentes agronómicos en cultivares de trigo invernal liberados entre 1965 y 2020 (después de la Revolución Verde), en ambientes de alto rendimiento; 2) analizar los cambios en radiación interceptada, eficiencia de uso de radiación y biomasa producida de cultivares de trigo invernal liberados en el país durante los últimos cincuenta años; 3) evaluar el carácter de permanencia de verdor en cultivares de distinto año de liberación; y 4) determinar el avance genético en trigos invernales en zonas de alto rendimiento potencial, y su relación con los componentes agronómicos del rendimiento de granos.

Se estudió un panel de cultivares liberados entre 1965 y 2020 en tres localidades del sur del país. En la primera temporada 2018/19 fueron analizados 13 genotipos y la segunda temporada 2019/20 14 genotipos. Durante el desarrollo del cultivo se cuantificó la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por el cultivo, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), la eficiencia de uso de radiación (EUR). Se evaluó rendimiento de granos y sus componentes. Los resultados mostraron cierta variación entre las temporadas en las respuestas, sin embargo, en general las tendencias se mantuvieron. Los genotipos exhibieron un aumento en el rendimiento de grano, índice de cosecha, número de granos por espiga y peso de los mil granos. La biomasa aérea y el número de espigas por m² solo exhibieron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la primera temporada. El rendimiento del grano obtuvo una correlación positiva con el número de espiga por m², índice de cosecha, peso de mil granos, biomasa aérea y número de granos por espiga. La eficiencia de uso de radiación se correlacionó positivamente con el rendimiento de grano y la biomasa aérea. El análisis de verdor no mostró correlación con rendimiento de grano, sin embargo, tres cultivares mostraron una menor tasa de senescencia; Bicentenario, Melifen y Talafen. Los resultados sugieren que los altos rendimientos son atribuibles a los diferentes componentes del rendimiento y el mejoramiento de la eficiencia del uso de radiación.

III ABSTRACT

The increase in yield in all species of agricultural interest is attributed to genetic progress. Bread wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the main cereals cultivated worldwide, and it constitutes a fundamental pillar to guarantee food security. According to projections, a yield progression of 2.5% per year is necessary to supply the nutritional needs for the year 2050. The selection of new cultivars has done considering grain yield and tolerance to stresses, mainly biotic. However, it is necessary to incorporate physiological evaluations to identify traits associated with grain yield. In Chile, winter wheat varieties have a high yield potential, exceeding 15 t ha⁻¹ in the south of the country, however it is unknown which physiological traits are associated with this yield potential. Thus, the aim of this study was to evaluate the changes in morpho-physiological and agronomic traits involved in the genetic improvement of winter wheat release between 1965 and 2020, in high-yield environments. The specific objectives were: 1) to evaluate the changes in grain yield and its agronomic components in winter wheat cultivars released between 1965 and 2020 (after the Green Revolution), in high-yield environments; 2) to analyze the changes in radiation intercepted, efficiency of use of radiation and biomass produced of winter wheat cultivars released in the country during the last fifty years; 3) to evaluate the stay green in cultivars of different year of release; , and 4) to determine the genetic advance in winter wheats in areas of high potential yield, and its relationship with the agronomic components of grain yield.

A wheat panel of cultivars released between 1965 and 2020 were evaluated in three locations in the south of the country. In the first season 2018/19, 13 genotypes were analyzed and in the second season 2019/20, 14 genotypes. During the development of the crop the following traits were assessed: the photosynthetically active radiation (PAR) intercepted by the crop, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), radiation use efficiency (RUE). It was evaluated the grain yield (GY) and its components. The results showed some variation between the seasons, however, in general the trends were maintained. Genotypes exhibited an increase in GY, harvest index, grains per spike and thousand kernel weight (TKW). The shoot biomass and the number of spikes per m² only exhibited significance (p <0.05) differences in the first season. The GY showed a positive correlation with spike per m², harvest index, TKW, shoot biomass and grains per spike. RUE was positively correlated with GY and shoot biomass. Stay green did not presented correlation with grain yield, however, three cultivars showed a lower rate of senescence: Bicentenario, Melifen and Talafen. The results suggest that the high yields are attributable to the yield components and the improvement in the efficiency of radiation use.

1 INTRODUCCIÓN

El trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) constituye el 20% de las calorías diarias consumidas directamente como pan, o indirectamente por vía de alimentación animal (Ramos Garmíño, 2013; Khoury et al., 2014; Lephuthing et al., 2017; FAOSTAT, 2019). La población a nivel mundial se espera llegue a los 9,3 billones para el año 2050 (Fischer et al., 2014; Hunter et al., 2017), en consecuencia, uno de los principales desafíos es mantener la seguridad alimentaria a nivel global (Pradhan et al., 2015).

El aumento en la producción mundial de trigos entre 1985 al 2005 fue de un 28%, el que estuvo asociado principalmente a un aumento del rendimiento por hectárea (ha) (20 %), mientras que el 8% restante, se debió al aumento de las áreas agrícolas (Foley et al., 2011). El incremento del rendimiento por superficie es clave en vez de despejar más tierras para el uso agrícola y es, además, el camino más sostenible para la seguridad alimentaria (Godfray et al., 2010; Foley et al., 2011; Phalan et al., 2011; Hulme et al., 2013).

Este incremento en la producción de trigo ha estado asociado al mejoramiento genético, principalmente a la introgresión de los alelos enanizantes a mediados de los 60's (e.g. mayor repartición de fotoasimilados al grano), y a un cambio en los manejos agronómicos, lo que ha llevado a un incremento global de los rendimientos del 250 % (Calderini y Slafer, 1998; Mackay et al., 2011). El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CYMMIT) junto a diferentes centros de investigación están liderando actualmente programas de mejoramiento de trigo enfocados en obtener cultivares de alto rendimiento adaptados para las diferentes condiciones edafoclimáticas, con el objetivo de mejorar los rendimientos a nivel de agricultores y así garantizar la seguridad alimentaria (Pingali, 2001; Engler y del Pozo, 2013; Crespo-Herrera et al., 2017). Uno de los desafíos más importantes de los programas de mejoramiento es el estudio de la interacción del genotipo frente al ambiente (G x E) (Fischer et al., 2014). Para esto se investiga los diferentes rasgos fisiológicos que afectan al rendimiento del cultivo asociados al genotipo, el fenotipo y la interacción en diferentes ambientes (Slafer, 2003; Fu, 2015; Camargo y Lobos, 2016; Hunter et al., 2017).

Una de las respuestas de las plantas a la interacción G x E es la producción de biomasa, que en los cereales es producto de la radiación interceptada y la eficiencia del cultivo en convertirla en biomasa (EUR), a través de la fotosíntesis (Slafer et al., 1999; Ray et al., 2012). El rendimiento de granos (GY) depende de la repartición de los fotoasimilados en la producción de grano, y una forma de medir la eficiencia de la planta es calculando el índice de cosecha (IC), que relaciona la producción de granos con la biomasa total (Acreche et al., 2009).

La zona sur de Chile se caracteriza por presentar altos rendimientos de grano en cereales (del Pozo et al., 2014), asociados a las condiciones edafoclimáticas junto a genotipos de alto rendimiento. El Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) es el que lleva el mayor programa de mejoramiento de cereales y sus principales esfuerzos están enfocados

a la selección de variedades con alto potencial de rendimiento, que cumplan con los requisitos de la agroindustria nacional, y que sean resistentes a factores de estrés bióticos y abióticos (de la Fuente-González y González-Urbina, 2016). En la temporada 2018/2019, el cultivo del trigo abarcó una superficie total de 222 mil ha, desde Coquimbo hasta la región de Los Lagos (ODEPA 2020). El progreso del rendimiento del trigo en Chile ha sido importante. En los años sesenta la media era 1,6 Mg ha⁻¹, luego en la primera década del siglo XXI fue de 4,6 Mg ha⁻¹ (Engler y del Pozo, 2013) y actualmente alcanza 6,0 Mg ha⁻¹. Los trigos invernales, en la zona sur de Chile destacan por el alto potencial de rendimiento alcanzando 10,0 Mg ha⁻¹, lo que se debe a una combinación del genotipo, el ambiente, la tecnología, el manejo agronómico, capital e insumos ayudan al agricultor alcanzar este potencial (Jobet y Hewstone, 2003; Campillo et al., 2010; Mera et al., 2015; Jobet et al., 2015, 2017).

A continuación, se presenta una revisión bibliográfica acerca de la importancia del trigo invernal, progresión genética y como la intercepción de la radiación afecta tanto en el rendimiento como en sus componentes.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Importancia del trigo en el mundo y en Chile

El trigo es una planta alohexaploide ($2n = 6x = 42$; AABBDD) que surgió hace unos 8.000 años en el creciente fértil, por hibridación entre un trigo tetraploide (*T. turgidum* $2n = 4x = 28$; AABB) y por una gramínea diploide silvestre, el *Aegilops tauschii* ($2n = 14$; DD) (Cooper, 2015)

Es uno de los principales cereales cultivados en zonas mediterráneas, constituyendo la base alimentaria en el mundo (Ramos Garmiño, 2013; del Pozo et al., 2014). Entrega el 20% del total de energía y proteína de la dieta humana (FAOSTAT, 2019), junto a macro y micronutrientes esenciales para la población (Shewry y Hey, 2015; Lephuthing et al., 2017). La superficie de trigo cosechado, a nivel mundial, en el 2014 fue de 221.6 millones de ha, la cual representa el 30% de la superficie global de cereales cosechado (Crespo-Herrera et al., 2017). En la actualidad la producción mundial de trigo es aproximadamente de 729 millones de toneladas.

Existen tres tipos de trigo, de acuerdo a los requerimientos climáticos y hábito de crecimiento: a) el trigo primaveral, que se caracteriza por no necesitar un periodo de vernalización, por lo tanto no requiere temperaturas bajas ($T_{min} < 15\text{ °C}$) para cambiar de estado vegetativo a reproductivo (Fischer et al., 2014); b) el trigo invernal, que se siembra en otoño entre las latitudes 35-55° N/S, tiene un hábito rastrero al comienzo, la planta en crecimiento debe experimentar un periodo de horas frío (vernalización), que es un tipo de

mecanismo de control de temperatura que asegura que la planta no entre en un estado reproductivo antes del invierno (Lantican et al., 2005; Miralles et al., 2014); y c) un grupo intermedio de trigos facultativos, que son tolerantes a las bajas temperaturas, y se cultivan en varias áreas de transición representadas como mega ambientes (ME7 – ME9) (Rajaram et al., 1993; Lantican et al., 2005).

En Chile, el trigo es el principal cultivo anual, en términos de área, tiene una gran distribución cubriendo un amplio sector climático que va desde el mediterráneo semi-árido (~350 mm de precipitaciones anuales) en el norte del país a un clima temperado húmedo (~2000 mm anuales) en la zona sur, donde es principalmente cultivado el trigo invernal (Matus et al., 2012). Las principales regiones que siembran trigo son las Regiones de la Araucanía, Bío-Bío y del Maule con un 40, 28 y 13 % del área total sembrada (Mera et al., 2015; De la Fuente-González y González-Urbina, 2016).

El rendimiento de trigo antes de los 60 en Chile alcanzaba un promedio de 1,3 Mg ha⁻¹ y el área cultivada era entre 600.000 a 800.000 ha. El rendimiento aumentó considerablemente alcanzado 11,1 Mg ha⁻¹ en el 2019, con una reducción de la superficie a 205.000 ha (ODEPA, 2020; Mera et al., 2015). Una de las principales causas de este cambio del área de cultivo ha sido el incremento del sector forestal, manzanos, vides y últimamente en frutos del bosque y avellanas que son más rentables, ya que Chile es reconocido como uno de los principales exportadores y productores de alimentos (Mera et al., 2015).

2.2 Progreso genético

El progreso genético es la evolución que se observa en los trigos liberados en diferentes años (Maich y Di Rienzo, 2014). Este se cuantifica como la pendiente que se forma por la regresión lineal del rendimiento potencial con respecto al año de liberación (Slafer, 2003; Cargnini et al., 2008). El progreso genético y el conocimiento de los rasgos asociados con las ganancias genéticas son esenciales en los programas de mejoramiento (Wu et al., 2014). Esto ayuda a la liberación de nuevas variedades con una mayor ganancia genética, mejorando el rendimiento de los cultivos (Reynolds et al., 2009).

La progresión genética no solo sirve para ver el progreso del rendimiento en una región específica o país, sino también, un medio para investigar los rasgos agronómicos, fisiológicos y de calidad asociados con la evolución del mejoramiento (del Pozo et al., 2014), como son la resistencia a estreses abiótico y bióticos (Graybosch y Peterson, 2010). Se ha visto que las ganancias genéticas desde la década de los 60's se han enfocado en los granos/m² (usualmente en grano/espiga) y el índice de cosecha (IC) (Foulkes et al., 2007).

En los programas de mejoramiento clásicos, la primera selección se basa principalmente en el tamaño de la planta y el tiempo de siembra a floración, luego vienen las pruebas de rendimiento de los diferentes genotipos (Richards, 2006; Jia y Jannink, 2012; Desheva y

Cholakov, 2014). Otra herramienta que se ha incorporado es la selección genética, con la utilización de marcadores moleculares para analizar las diferentes regiones del genoma que controlan rasgos cuantitativos de interés (QTLs). Con el fin de acelerar el mejoramiento es necesario antes un preciso fenotipado que ha sido durante mucho tiempo la clave para la mejora genética (Heisey y Day-Rubenstein, 2015; Crain et al., 2018). Los rasgos que se han correlacionado bien con la ganancia genética son: el índice de cosecha (Zhou et al., 2016; Lo Valvo et al., 2018), el número de granos por unidad de área, expresado en número de granos por m² (NG) (Shearman et al., 2005; Bustos et al., 2013; Beche et al., 2014; Lo Valvo et al., 2018), el peso del grano (PG) (Gambín y Borrás, 2010), la biomasa aérea del cultivo (Shearman et al., 2005; Xiao et al., 2012; Bustos et al., 2013), como también el uso eficiente de la radiación (EUR) (Fischer et al., 2014; Lo Valvo et al., 2018) y biomasa (Richards et al., 2019). Por eso es de interés tener programas continuos de mejoramiento de trigo, y evaluar cómo van cambiado los rasgos de interés a través de las diferentes liberaciones de variedades de trigos.

2.3 Programas de mejoramiento genético

Los programas de mejoramiento de cereales, desde el 1920 pusieron su interés en mejorar los componentes del rendimiento del trigo, como también el uso de mejores prácticas agronómicas (Maich y Di Rienzo, 2014). En los 60's los rasgos más importantes eran la resistencia a la tendadura, una madurez temprana y disminución de la altura del cultivo, el peso del grano y de la espiga (Wu et al., 2014; Yao et al., 2019). Estas últimas décadas se han incorporado otros objetivos, como aumentar la calidad del grano, ahorro de agua, la resistencia a plagas y enfermedades, pero sin dejar de lado el objetivo principal que es aumentar el rendimiento del grano (Zhuang, 2003; Reynolds et al., 2012a; Heisey y Day-Rubenstein, 2015). Los enfoques de los programas de mejoramiento van desde un nivel molecular de la genómica funcional (e.g. en la eficiencia en los procesos de fijación de carbono) hasta poblaciones completas de cultivos (evaluación de rasgos fisiológicos y agronómicos) (Fischer, 2011; Sadras y Calderini, 2015).

En el mejoramiento la estabilidad del rendimiento requiere muchos años y diferentes sitios de evaluación (Furber y Tester, 2011). Utilizando la investigación, se han hecho diferentes métodos y estrategias para la selección de genotipos, y así reducir los tiempos de liberación de variedades. Por ejemplo, el campo de la genómica (Rutkoski et al., 2016), utilizando marcadores moleculares para analizar los locus de rasgos cuantitativo QTLs (i.e. regiones del genoma que están asociados a la expresión de un rasgo deseable y se pueda cuantificar) (Collard et al., 2005), por ejemplo, para reducir la longitud del tallo, así evitar el daño por tendadura del cultivo, y a la vez aumentar la partición de fotoasimilados al grano (Lo Valvo et al., 2018), y de una forma indirecta modificar el número de granos (NG) (Aisawi et al., 2015). Otro aspecto que se trabaja a nivel de marcadores es la sensibilidad al fotoperiodo (Ppd) y la duración de la vernalización (Vrn) (Fu, 2015).

Por otra parte, la utilización de sensores proximales o remotos para mejorar los modelos de predicción del rendimiento están siendo utilizados con mayor frecuencia, como es la temperatura del dosel o el índice de vegetación normalizado (NDVI) (Rutkoski et al., 2016). Otro de los desafíos de los programas de mejoramiento se centra en disminuir las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados que contribuyen al cambio climático (Calderini y Slafer, 1998; Miralles y Slafer, 2007; Tester et al., 2010). Para lo que se hacen ensayos y así determinar la dosis mínima que requiere el cultivo y que no se vea afectado el rendimiento.

A nivel internacional está como referente el centro de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) (Fischer et al., 2014). Sus enfoques principales son el mejoramiento en el rendimiento potencial y resistencia sostenible de importantes plagas y enfermedades (Lantican et al., 2005). En Chile, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), tiene programas nacionales mejoramiento (PMG) de trigo, y otros cultivos. El proceso de creación de nuevas variedades de trigos se clasifica en (i) híbridos F1, (ii) poblaciones F2, (iii) poblaciones F3 a F7, (iv) jardines nacionales, (v) jardines extranjeros, (vi) ensayos de rendimiento y (vii) ensayos estándares. Este último se siembra en diferentes ambientes, tanto en riego como en secano (De la Fuente-González y González-Urbina, 2016).

En el INIA se utilizan modernas técnicas, como el cruzamiento inter-genérico trigo x maíz con el fin de acelerar el mejoramiento genético, logrando una homocigosis acelerada y su posterior selección obteniendo dobles haploides, como ha sido el caso de los cvs. Maxwell INIA y Konde INIA, liberados por INIA (Jobet et al., 2015, 2017). En Chile, por sus favorables condiciones ambientales y una estrecha relación entre los mejoradores con los agricultores se trabaja en formular estrategias en el manejo del trigo y otros cultivos como el CropCheck Chile (Mera et al., 2015), en que juntos pueden enfocarse en continuar el mejoramiento del rendimiento y la productividad.

2.4 Rendimiento en trigo como una función de la radiación interceptada

Monteith, (1977), presentó la teoría del uso eficiente de la intercepción de la luz, que da la base para la simulación de la intercepción de la luz por el dosel y la producción de biomasa (Taiz y Zeiger, 2002). La radiación interceptada por el cultivo (LI) depende del índice de área foliar (IAF) y la duración del área foliar (LAD), que es la velocidad de desarrollo, cierre del dosel, longevidad, tamaño y arquitectura de la planta (Fig. 1) (Long et al., 2006). El efectivo uso de la radiación (EUR) está determinada por la combinación de la tasa fotosintética de todas las hojas dentro del dosel, menos las pérdidas respiratorias del cultivo durante la temporada (Duchemin et al., 2008; Chakwizira et al., 2015; Man et al., 2017). Y el IC que es la eficiencia en el cual la biomasa es particionada hacia el producto cosechado (Tang et al., 2017). Solamente una parte de la energía proveniente del sol puede ser utilizada por la fotosíntesis del cultivo (Fischer et al., 2014). Esta es denominada Radiación

Fotosintéticamente Activa (PAR), se mide en unidades de $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Se asume que la tasa diaria de radiación PAR es de 0,50 (Sinclair y Muchow, 1999).

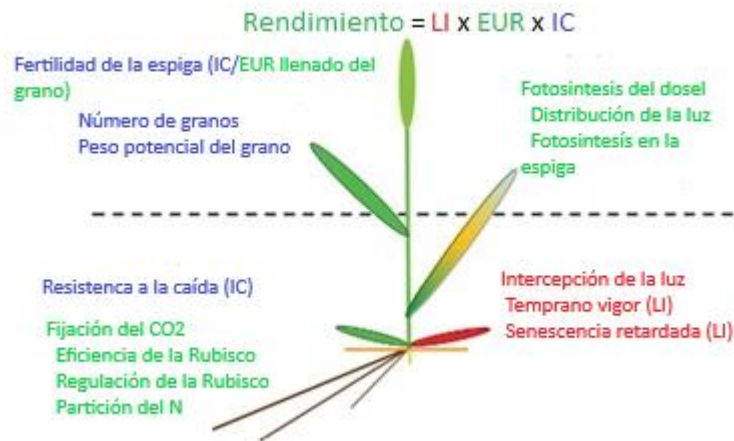


Figura 1. Esquema conceptual de rasgos asociados al rendimiento de grano. En que éste está en función de la luz interceptada por el dosel PAR (LI) (MJ m^{-2}), la eficiencia del uso de radiación (EUR) (MJ g^{-1}), y el índice de cosecha (IC). El crecimiento del cultivo es la acumulación de materia seca medido como peso por unidad de área (g/m^2 , kg/ha o t/ha) Fuente: adaptado de Reynolds et al. (2012b).

La PAR, comprende la energía libre que proviene desde el sol, que excita a la clorofila y da inicio al flujo de energía requerida para la fotosíntesis y la creación de biomasa (Monteith et al., 1977). Las longitudes de onda que activa el proceso de la fotosíntesis van desde los 0,4 a 0,7 μm . correspondiente aproximadamente al espectro visible (Hipps et al., 1983; Asrar et al., 1984; Rahman et al., 2019).

El crecimiento y desarrollo del trigo está fuertemente relacionado con la acumulación de la energía lumínica recibida en todo su ciclo de vida, por lo tanto, es importante la arquitectura y el tamaño de la biomasa que lo intercepta (Mellado, 2007). La FPAR está relacionada con el IAF, de acuerdo con la siguiente ecuación (Fischer et al., 2014):

$$\text{FPAR} = 1 - \exp(-K * \text{IAF}) \quad (1)$$

donde FPAR es la fracción de PAR interceptada por el dosel, K es el coeficiente de extinción (su rango de parámetros va de 0,3 a 1,0) e IAF el índice de área foliar medido por m^2/m^2 . El coeficiente de extinción K es mayor en hojas con ángulo horizontales que en verticales, ya que deja menos penetración de la luz hacia los niveles más inferiores dentro del dosel (Acreche y Slafer, 2009). Por lo tanto, mientras más erecta se muestran las hojas, el cultivo tendrá que maximizar la intercepción, cubriendo más rápidamente la superficie de suelo

llegando a un rango óptimo que es por lo general a un IAF de 4 a 5 para interceptar un 90% de la radiación incidente diaria en trigo (Fischer et al., 2014). La tasa de crecimiento del cultivo (2) se relaciona el PAR interceptado por el cultivo:

$$\frac{dDM}{dt} = FPAR * PARi * EUR \quad (2)$$

donde dDM/dt es la materia seca acumulada diariamente ($g/m^2/d$) (ecuación 2), FPAR es la fracción de PAR interceptada, $PARi$ corresponde al PAR incidente, y $FPAR * PARi$ es el PAR interceptado por el cultivo (LI); EUR en trigo es aproximadamente 2,7 g DM/MJ. El $PARi$ corresponde aproximadamente al 50% de la radiación solar diaria (R_s , $MJ m^{-2}$) (ecuación 3):

$$PARi = 0,5 * R_s \quad (3)$$

La materia seca acumulada por el cultivo (DM, $g m^{-2}$) en un periodo de tiempo dado, corresponde a:

$$DM = \sum PARi * FPAR * EUR \quad (4)$$

donde $\sum PARi$ es la acumulación diaria de radiación incidente en el mismo periodo. Con la integración de estas tres ecuaciones 1, 2 y 4 podemos describir cómo la radiación interceptada por el cultivo y su eficiencia está estrechamente relacionada con el rendimiento. La ecuación más común utilizada es la que se muestra en Fig. 1, es decir:

$$PY = LI * EUR * IC \quad (5)$$

donde, PY es el rendimiento potencial en gramos por metro cuadrado ($g m^{-2}$), LI es el PAR interceptada desde emergencia a madurez del cultivo ($MJ m^{-2}$), EUR es la eficiencia del uso de la radiación dado ($g MJ^{-1}$), e IC es el índice de cosecha, que es la partición de la materia seca hacia el grano.

2.5 Rendimiento de grano y sus componentes agronómicos

El rendimiento del grano es el resultado final de muchos procesos fisiológicos en el cual interactuaron diferentes factores ambientales como manejos agronómicos durante todo el ciclo de crecimiento del cultivo (Fig. 2), en el cual es importante para el mejoramiento y las evaluaciones fisiológicas (Pask et al., 2012).

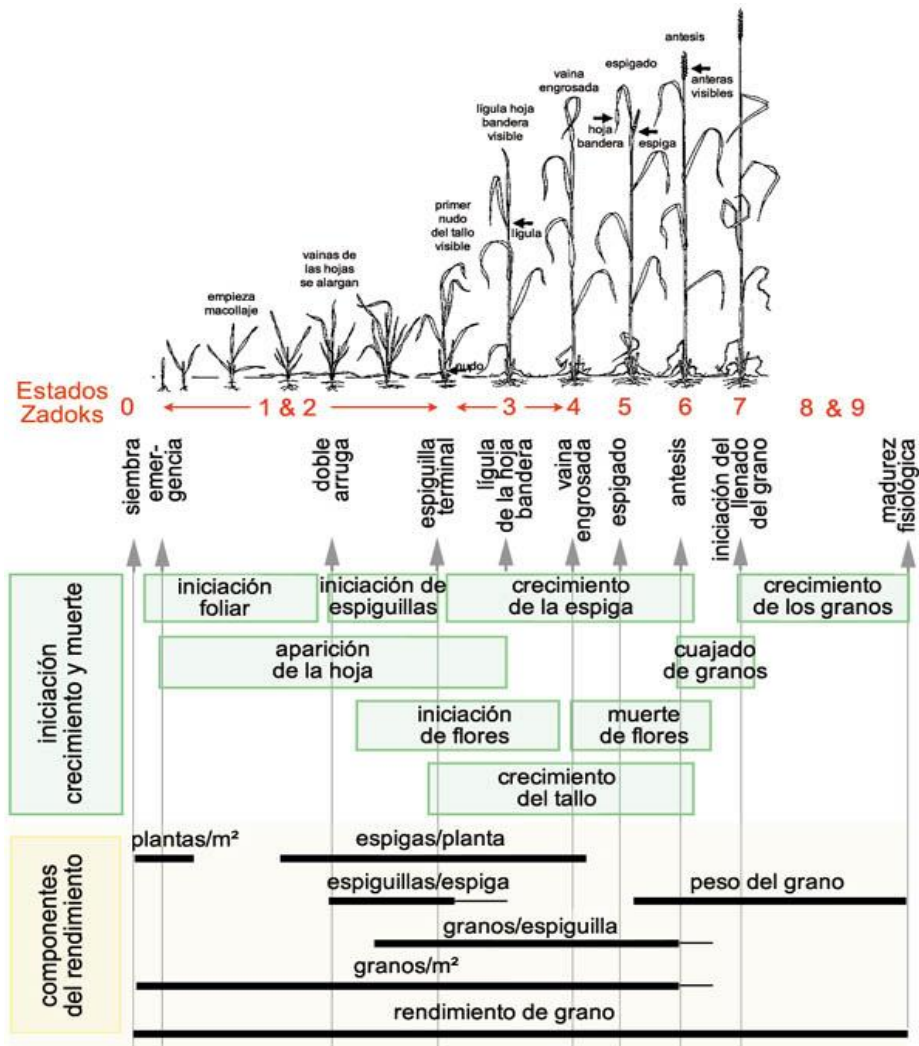


Figura 2.- Esquema del ciclo del trigo medido en escala Zadoks (en rojo), muestra todos los cambios fenológicos observables y el desarrollo de los diferentes componentes del rendimiento. Fuente: Rawson y Macpherson (2001).

El rendimiento de grano del trigo ha aumentado en un 40% en este último siglo y ha sido asociado al incremento del índice de cosecha asociado al aumento del número de granos por espiguilla y por espiga (Stapper y Fischer, 1990; Fischer et al., 2014; Ferrante et al., 2017). Parte de este aumento fue logrado por la introgresión de los genes enanizantes Rht-B1b y Rht-D1b que son insensibles a la giberelina, llevando a una disminución en la longitud de los entrenudos del tallo y la altura de la planta (Du et al., 2018), lo que se tradujo en una mejor distribución de los fotoasimilados hacia el grano (Tang et al., 2017).

Estos fotoasimilados se acumulan en los tallos hasta aproximadamente dos semanas después de la antesis y en algunos casos son los responsables de hasta 70% del rendimiento del grano (Slafer et al., 2015). De los componentes agronómicos del rendimiento, estudios han mostrado que los principales son el número de granos por m² (NG) y el peso del grano (PG) (Arjona et al., 2018). Una ecuación simple del rendimiento (RDG) descrita por Fischer et al (2014) es:

$$RDG = NG * PG \quad (6)$$

2.5.1 Peso del grano

El PG depende de las condiciones de crecimiento en post antesis, asociado a la eficiencia y movilización de fotoasimilados hacia el grano (Peltonen-Sainio et al., 2007; Ballesteros-Rodriguez et al., 2019). Se ha visto en ambientes de altos rendimientos que el peso del grano juega un papel más importante que en ambientes con estrés terminales (Lopes et al., 2012; Aisawi et al., 2015). Sin embargo, el peso del grano se ve afectado por la localización del grano en la espiga, ya que granos del sector distal de la espiga suelen mostrar un menor peso que los granos de más cercanos al tallo (Pask et al., 2012).

2.5.2 Número de granos

En trigo, el aumento del rendimiento ha estado asociado a un incremento del número de granos por unidad de área (Fischer, 2008), junto al aumento de la fertilidad floral (Guo et al., 2016). La densidad de plantas es un factor que afecta la cantidad de número de granos por m² (Borrás et al., 2004; Fischer, 2007).

Fischer (1983) propuso un modelo para definir el número de granos considerando la duración del crecimiento de la espiga:

$$SDWa = Ds * CGR * Fs \quad (7)$$

donde, SDWa, es el peso seco de la espiga en la antesis (por unidad de área), Ds es la duración del crecimiento de la espiga, CGR es la tasa de acumulación de materia seca sobre la superficie y Fs es la fracción de esta materia seca sobre el periodo de crecimiento de la espiga. El número de granos por metro cuadrado se puede obtener como:

$$NG = SDWa * FE \quad (8)$$

donde FE es la eficiencia de fructificación, definida como el número de granos por unidad de espiga en la antesis.

2.6 Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI)

El índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) (Montazeaud et al., 2016) es un índice que ha sido muy utilizado en la predicción del rendimiento, monitoreo de la vegetación, evaluación de la cubierta vegetal de los cultivos y la senescencia. El NDVI es calculado como una tasa de diferencia entre la medida de la reflectancia del dosel del cultivo en las bandas del rojo (ROJO) y rojo infrarrojo cercano (NIR) (Gandhi et al., 2015):

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{ROJO}}{\text{NIR} + \text{ROJO}} \quad (9)$$

Corresponde al cociente de la reflectancia del rojo visible (ROJO) con respecto a la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR); el ancho de banda va de 600 - 700 nm y 750 - 1300 nm, respectivamente. Esta medición se hace en días despejados y entre las 10 am a 4 pm. En varios trabajos se ha demostrado que existe una dependencia entre el (NDVI) y el índice de área foliar (LAI) (Carlson y Ripley, 1997; Steltzer y Welker, 2006; Marti et al., 2007; Moriondo et al., 2007). En trigo, el NDVI ha sido particularmente utilizado para predecir el rendimiento del grano, el área foliar del dosel y parámetros como el índice de verdor (“*stay-green*”), cuando se mide en diferentes estados de desarrollo del cultivo (Lopes et al., 2014).

2.7 Duración del área foliar post antesis (“*stay-green*”)

La fotosíntesis en las hojas disminuye durante el llenado del grano, cuando empieza la etapa de senescencia de las plantas (Man et al., 2017). Esto es debido a que la senescencia está genéticamente programada e influenciada por el ambiente. Es un proceso que resulta de la destrucción de la clorofila y la remobilización de nutrientes a órganos reproductivos de la planta (Vijayalakshmi y Fritz, 2010). En el trigo, la senescencia de las hojas está asociada a la translocación del nitrógeno (N) de las hojas hacia el grano, en el cual se encuentra el 40% - 90% del N final en el grano (Kichey et al., 2007). El retraso de la senescencia de las hojas, conocido como “*stay-green*”, se refiere a un carácter hereditario de permanencia de verdor y retrasar la senescencia foliar del cultivo (Montazeaud et al., 2016). Este carácter, se traduce en un aumento y una menor caída del rendimiento en condiciones de estrés, tanto biótico como abiótico (Bogard et al., 2011; Lopes y Reynolds, 2012). En el proceso de senescencia está involucrado fuertemente el metabolismo de C y N (Spano et al., 2003). La permanencia de verdor puede disminuir la concentración de N en el grano en variedades de trigo panadero (Reynolds et al., 2009). Al mantener por más tiempo el verdor de las hojas da como resultado una mayor asimilación de C y baja la

translocación de N hacia los granos (Bogard et al., 2011). En diferentes investigaciones se han visto correlaciones con el rendimiento y con diferentes componentes del rendimiento, como por ejemplo peso del grano (Wu et al., 2014), el número de granos (Sadras y Slafer, 2012), el número de espigas por m² (Ferrante et al., 2017).

En otros cultivos como maíz, en la progresión genética se ha visto un mejoramiento en la arquitectura del dosel aumentando un 20% en la intercepción de luz y el tiempo de duración de la permanencia de verdor, aumentando sus rendimientos notablemente (Lee y Tollenaar, 2007). En cambio, en trigo hay pocos estudios sobre la evolución de la biomasa o no está muy claro cómo el mejoramiento genético ha seleccionado genotipos que tengan una mejor intercepción de luz que influyen en el rendimiento final del grano. Por lo tanto, estudiar la evolución del crecimiento del trigo con mediciones no destructivas permitirá comprender mucho mejor las estrategias de las plantas y como el mejoramiento genético ha seleccionado genotipos que incluyen características que influyen el rendimiento del grano final.

3 HIPÓTESIS

El progreso genético en las variedades de trigo de invierno liberados entre 1964 y 2020 en Chile se asocia a una mayor eficiencia en el uso de la radiación, al aumento de la biomasa y la asignación de recursos al grano (índice de cosecha).

4 OBJETIVO

Evaluar los cambios en rasgos morfo-fisiológicos y agronómicos implicados en la mejora genética del trigo de invierno entre 1965 y 2020, en ambientes de alto rendimiento.

4.1 Objetivos específicos

-Evaluar los cambios en el rendimiento de grano y sus componentes agronómicos en cultivares de trigo invernal liberados entre 1965 y 2020 (después de la Revolución Verde), en ambientes de alto rendimiento.

- Analizar los cambios en radiación interceptada, eficiencia de uso de radiación y biomasa producida de cultivares de trigo invernal comercializados en el país durante los últimos cincuenta años.

- Evaluar el carácter de permanencia de verdor en cultivares de distinto año de liberación.
- Determinar el avance genético en trigos invernales en zonas de alto rendimiento potencial, y su relación con los componentes agronómicos del rendimiento de granos.

5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Descripción del sitio experimental

El ensayo fue establecido en cuatro sitios experimentales en dos temporadas: Centro experimental Santa Rosa INIA-Quilmapu en Chillán ($36^{\circ}32' S$; $71^{\circ}54' O$ a 217 m s. n. m.), a 25 km de Chillán, en 2018/19-2019/20; Centro Regional de Investigación (CRI) INIA-Carillanca en la comuna de Vilcún ($38^{\circ} 41' S$; $72^{\circ} 25' O$, 200 m.s.n.m), en 2018/19-2019/20; Centro experimental INIA-La Pampa, Purrunque ($40^{\circ} 90' S$; $73^{\circ} 16' O$, 121 m.s.n.m) cercana a la ciudad de Osorno en 2018/2109; y. en Máfil ($39^{\circ} 39' S$; $73^{\circ} 01' O$, 22 m.s.n.m), cercano a Valdivia, estableciéndose en el predio de un agricultor particular en 2019/2020. La caracterización agroclimática de los cuatro sitios se presenta en el Tabla 1.

Tabla 1. Descripción de los diferentes sitios experimentales de zonas de alto rendimiento en trigo invernal. Temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax), temperatura promedio (PromT) y precipitación anual (PP).

Sitio Experimental	Tmin (°C)	Tmax (°C)	PromT (°C)	PP anual (mm)	Tipo de clima
Santa Rosa (Chillán)	3 (Julio)	28,6 (Enero)	13,9	1270,0	Templado cálido con lluvias invernales
Carillanca (Vilcún)	4,9 (Junio)	16,7 (Febrero)	11,3	1346,0	Templado lluvioso cálido sin estación seca
Máfil (Valdivia)	4,3 (Julio)	24,5 (Enero)	11,9	1503,6	Templado lluvioso cálido sin estación seca
La Pampa (Purranque)	6,3 (Julio)	16,9 (Febrero)	10,5	1091,0	Templado lluvioso cálido sin estación seca

5.2 Manejo agronómico de los ensayos

Se evaluaron 14 cultivares de trigos invernales, liberados entre 1965 y el 2020 (Tabla 2). La dosis de siembra fue la equivalente a 180 kg ha⁻¹, con el fin de establecer una densidad de 333 plantas por metro cuadrado. Las unidades experimentales consistieron en parcelas de 9 surcos con 5 m de longitud y separadas a 0.2 m entre hileras. El diseño experimental correspondió a bloques completos al azar con cuatro replicas por tratamiento. Todas las parcelas tuvieron el mismo manejo agronómico. La fertilización consistió en 250 kg ha⁻¹ de súper fosfato triple (46% P₂O₅), además se agregaron 230 kg ha⁻¹ de urea (46% N) al estado de cuatro hojas (Z14), mitad de macollaje (Z24) y al segundo nudo (Z32) (Zadoks et al., 1974; Tottman y Makepeace, 1979). Además, en pleno macollaje (Z23), se aplicaron 100 kg ha⁻¹ de Sulpomag (22% K₂O, 18% MgO y 22% S) y 100 kg ha⁻¹ de muriato de potasio (60%, KCL). Para el control de malezas se aplicó Bacara® Forte 360 SC 1 L ha⁻¹, en preemergencia y post emergencia. Además, como una manera de controlar malezas, en agosto se aplicó una combinación de herbicidas Ally (4 g a.i.) + Logran (4 g a.i.) y MCPA

(500 g a.i.), principalmente para el control de malezas de hoja ancha. Conjuntamente para prevenir el ataque del pulgón se realizó una aplicación de Pirimor (200 g a.i.). Así, todos los cultivares evaluados pueden alcanzar su rendimiento potencial.

Tabla 2.- Panel de variedades de trigo invernales comercializados en Chile entre 1965 y 2019 utilizados para el estudio de progresión genética.

Cultivar	Año de liberación
Druchamp	1965
Melifen	1974
Manquefen	1977
Talafen	1982
Laurel	1987
Kona	1990
Tukan	1993
Kumpa	2002
Bicentenario	2010
Maxwell	2012
Pionero	2013
Rocky	2015
Kiron	2017
Chevignon	2020

5.3 Evaluación de la radiación interceptada por el cultivo y NDVI

La intercepción del PAR se evaluó con un sensor SunScan Canopy Analysis System (Delta-T Devices) y el NDVI con un sensor Trimble GreenSeeker® (NTech Industries, Inc.). Todas las mediciones se realizaron en días despejados desde 11:00 AM a 16:00 PM. En cada parcela se realizaron tres evaluaciones con el SunScan y una con el GreenSeeker, este último a una altura de 60 cm sobre el dosel del cultivo de la parcela. Para PAR interceptado, se promediaron las tres determinaciones. Las mediciones fueron realizadas en distintos estados de desarrollo desde macollaje (Z20) a madurez (Z90).

El NDVI se expresó en función del tiempo termal desde siembra. En el ajuste de la curva se incorporaron análisis de todas las parcelas de Santa Rosa y Carillanca, en las dos temporadas. Se realizó un ajuste de una función sigmoide y se determinó para cada cultivar cuatro parámetros de ajuste.

$$Y = N_{final} + N_{green_max} / (1 + \text{EXP}\left(-\frac{x - \text{TN50}}{TS}\right)) \quad (10)$$

donde Y, son los valores NDVI de las parcelas obtenidos en el campo, **N_{final}**, es el valor donde las plantas están totalmente senescentes (valor final NDVI), **N_{green_max}**, es la diferencia entre el valor NDVI máximo y el valor NDVI final (**N_{max} - N_{final}**), x representa el tiempo termal cuando se obtuvo la medición de campo, TN50 es el tiempo termal desde antes a 50% de senescencia del cultivo y TS es la tasa indicadora de senescencia, esto quiere decir es la tasa del cambio en la decadencia del NDVI del cultivo. Para modelar la curva se utilizó el asistente de regresiones no-lineales del programa Sigmaplot® ver. 11.0.

Para la obtención de la EUR, se utilizaron las mediciones del Sunscan. Con este equipo obtiene el PAR incidente del cultivo medido en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. El FPAR se obtuvo de mediciones de PAR sobre el dosel (PAR0) y bajo el dosel del cultivo (PARt):

$$\text{FPAR} = 1 - \left(\frac{\text{PARt}}{\text{PAR0}}\right) \quad (11)$$

Donde FPAR es la fracción del PAR interceptada por el cultivo, y los valores son entre 0 y 1. Así, el PAR interceptado por el cultivo corresponde a:

$$\text{PAR interceptado} = \text{FPAR} * \text{PARi} \quad (12)$$

Donde PARi es el PAR incidente. Para obtener la radiación solar diaria los datos fueron obtenidos por la página del INIA Agromet (Agromet, 2020) para las localidades donde se establecieron los ensayos. Con esto podemos obtener la eficiencia de uso de radiación EUR (ecuación 13)

$$\text{EUR} = \frac{\text{Biomasa aérea}}{\text{LI}} \quad (13)$$

Donde EUR es la eficiencia del uso de la radiación (g MJ^{-1}), la biomasa aérea esta medido por g m^{-2} y LI el PAR interceptado acumulado que esta medido por MJ m^{-2} .

5.4 Características fisiológicas

En madurez fue tomada la altura de la planta, desde el suelo hasta la espiga excluyendo las aristas (ALT) expresado en cm.

5.5 Rendimiento de granos y componentes

Fue cosechado un metro lineal de cada parcela para la determinación de los diferentes componentes del rendimiento e índice de cosecha. Se tomó el peso de la biomasa aérea total de la gavilla (paja más espigas), se contó el número de espigas y se expresó como espigas por m^2 (ESPM). De la trilla de estas espigas se obtuvo el peso de mil granos (PMG) y el número de granos por espiga (NUMG). El IC fue calculado con la relación entre el peso de la semilla y la biomasa aérea total (BIO). Por último, el rendimiento del grano (RDG) se obtuvo de la trilla de las 5 hileras centrales de cada parcela y se expresa en Mg ha^{-1} .

5.6 Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza por temporada que incluyó los cuatro sitios; esto permitió evaluar los efectos de genotipo (G), localidad (L) e interacción genotipo x localidad (GxL). Para las variables estudiadas BIO (Mg ha^{-1}), ALT (cm); RDG (Mg ha^{-1}), IC, ESPM, NUMG y PMG (g). Fue utilizado el programa estadístico Infostat versión estudiantil. Las localidades con respecto a cada temporada fueron abreviadas de la siguiente manera: Primera temporada (2018-2019); Santa Rosa (SR18), Carillanca (CA18), Purranque (PU18). Segunda temporada (2019-2020); Santa Rosa (SR19), Carillanca (CA19) y Máfil (MA19).

Se realizaron análisis de regresión entre los rasgos evaluados y año de liberación del cultivar. Además, se evaluó la matriz de correlación entre los rasgos evaluados.

6 RESULTADOS

6.1 Rasgos agronómicos

Se observaron diferencias significativas entre genotipos y entre localidades, para las variables analizadas (Tabla 3), a excepción de BIO y ESM el 2019-2020, en los que el efecto genotipo no fue significativo ($P > 0.05$), y ESM en 2018-2019 en que el efecto localidad no fue significativo (Tabla 3). La interacción G x L, sólo mostró diferencias estadísticas en ALT 2018-2019, IC y PMG. 2019-2020.

Tabla 3. Medias del rendimiento del grano (RDG), biomasa aérea total (BIO), altura de planta (ALT), índice de cosecha (IC), espigas por m² (ESPM), número de granos por espiga (NUG), peso de mil granos (PMG). Los valores corresponden a la media de los 13 genotipos de trigo invernal de las tres localidades en la primera temporada (2018-2019) y la media de los 14 genotipos de trigo invernal en la segunda temporada (2019-2020), en localidades de alto rendimiento al sur de Chile.

Rasgos	Año	G	L	G x L
RDG	2018-2019	11,64**	13,73**	1,08
	2019-2020	9,59**	108,98**	1,24
BIO	2018-2019	3,80*	7,25*	1,10
	2019-2020	0,87	119,84**	0,84
ALT	2018-2019	39,86**	15,97**	4,27**
	2019-2020	16,28**	34,91**	1,42
IC	2018-2019	22,34**	17,77**	2,74
	2019-2020	11,56**	43,62**	2,31*
ESM	2018-2019	7,13**	2,14	1,32
	2019-2020	1,41	20,20**	0,98
NUG	2018-2019	12,36**	30,25**	1,18
	2019-2020	4,26**	16,47**	1,24
PMG	2018-2019	8,16**	13,55**	1,96
	2019-2020	71,59**	283,08**	5,32**
gl	2018-2019	12	2	24
	2019-2020	13	2	26

gl. Grados de libertad. *Significancia valor $p < 0,05$. **Altamente significativa valor $p < 0,01$.

6.2 Rendimiento del grano

El RDG fue significativamente diferente para las variedades liberadas entre 1965 y 2020, y varió desde los 4,73 Mg ha⁻¹ del cv. Druchamp liberado en 1965 y 11,01 Mg ha⁻¹ del cv. Chevingnon liberado el 2020 (Tabla 4; Fig. 3). La regresión lineal entre el RDG y el año de liberación del cultivar fue positiva para cada localidad y temporada (Fig. 3). Durante la primera temporada los genotipos mostraron una ganancia genética (pendiente de la regresión) de 99 kg ha⁻¹ año⁻¹ en Santa Rosa, 70 kg ha⁻¹ año⁻¹ en Carillanca y 42 kg ha⁻¹ año⁻¹ en Purranque (Fig. 3a) o (en valores relativos) de 1.15%, 0.74% y 0.53%, respectivamente. Durante la segunda temporada la ganancia genética de las variedades en las tres localidades fue de 64 kg ha⁻¹ año⁻¹, 71 kg ha⁻¹ año⁻¹ y 70 kg ha⁻¹ año⁻¹ o (en valores relativos) 0,075% 0,097%. 0,059% en Santa Rosa, Carillanca y Mafil, respectivamente (Fig. 3b).

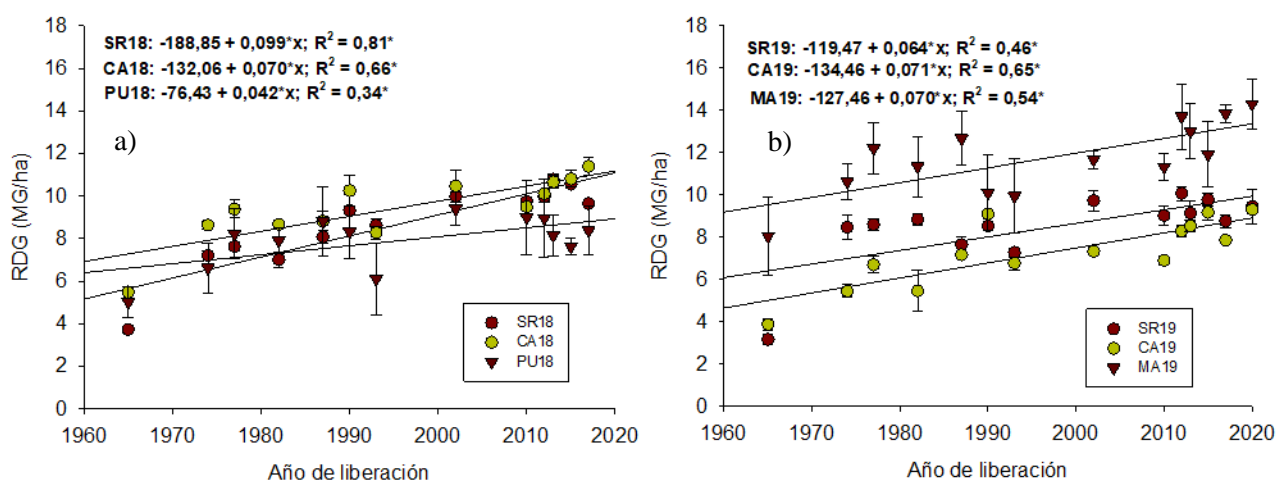


Figura 3. Relación entre el rendimiento de grano y el año de liberación de las variedades. Entre 1965 y 2017, en a) Santa Rosa (SR), Carillanca (CA) y Purranque (PU) en la temporada 2018-2019, y entre 1965 y 2020 en SR, CA y Mafil (MA) en la temporada 2019-2020. Valor p r²: (*) significativo p<0,05 (**) altamente significativo p< 0,01.

Tabla 4 Medias de rasgos agronómicos de trigos invernales evaluados en tres localidades y dos temporadas. a) 2018- 2019, 13 variedades y b) 2019-2020, 14 variedades. Rendimiento del grano (RDG), biomasa aérea total (BIO), altura de planta (ALT), índice de cosecha (IC), espigas por m² (ESPM), número de granos por espiga (NUG), peso de mil granos (PMG).

a) 2018 – 2019

Año de liberación	RDG (Mg ha ⁻¹)	BIO (Mg ha ⁻¹)	ALT (cm)	IC	ESM	NUG	PMG (g)
1965	4,73e	28,23a	142,08a	0,18e	470,42bcde	38,21d	40,98cde
1974	7,48d	23,0abc	102,50bcde	0,32d	571,67ab	52,59abc	38,29de
1977	8,41abcd	25,15ab	109,58b	0,32d	511,25abc	54,57abc	43,11bcde
1982	7,85bcd	23,59abc	109,17bc	0,33bcd	498,33abc	52,21bc	40,37cde
1987	8,57abcd	27,19ab	105,0bcd	0,33cd	599,17a	46,75c	43,69bcde
1990	9,29abcd	20,36bc	101,25bcdef	0,39ab	498,75abc	48,81c	45,64abc
1993	7,67cd	17,35c	107,08bcd	0,39abc	366,25e	49,07c	51,28a
2002	9,95a	26,09ab	94,58efg	0,41a	510,83abc	60,10ab	44,69abcd
2010	9,40abcd	23,50abc	99,17cdefg	0,39abc	478,75bcde	52,13bc	46,03abc
2012	9,68abc	22,40abc	90,83g	0,41a	382,50de	54,22abc	49,92ab
2013	9,86ab	22,54abc	90,83g	0,39abc	487,08abcd	60,72a	37,21e
2015	9,66abc	23,01abc	91,25fg	0,39ab	458,33cde	58,33ab	42,48cde
2017	9,80ab	26,14ab	98,75defg	0,34bcd	474,17bcde	50,07c	46,10abc

b) 2019 - 2020

Año de liberación	RDG (Mg ha ⁻¹)	BIO (Mg ha ⁻¹)	ALT (cm)	IC	ESM	NUG	PMG (g)
1965	5,02e	23,06	131,04a	0,23e	555,76	36,08d	37,77bc
1974	8,18cd	22,33	97,88bcd	0,30d	577,22	48,42abcd	32,95c
1977	9,16abcd	22,44	99,58bcd	0,35abcd	544,79	47,25abcd	41,03ab
1982	8,55bcd	22,38	101,04bc	0,36abcd	545,83	47,67abcd	39,16bc
1987	9,16abcd	22,22	96,46bcd	0,32cd	577,36	43,42bcd	38,42bc
1990	9,24abcd	22,01	100,0bcd	0,36abc	584,24	41,42bcd	41,61ab
1993	7,99d	20,99	108,54b	0,35abcd	522,22	37,92cd	46,66a
2002	9,57abcd	24,08	88,13cd	0,34abcd	571,88	51,08ab	39,24bc
2010	9,08abcd	23,19	91,46cd	0,33bcd	598,96	47,75abcd	38,19bc
2012	10,68ab	23,58	87,29d	0,40a	529,24	49,50abc	46,47a
2013	10,22abcd	24,10	87,92cd	0,38abc	562,15	48,75abc	33,40c
2015	10,29abc	24,15	92,29cd	0,38abc	588,26	42,92bcd	39,54bc
2017	10,15abcd	24,56	92,08cd	0,38abc	513,68	56,08a	42,29ab
2020	11,01a	24,08	92,92cd	0,39ab	584,79	50,25abc	38,34bc

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes, Test de Tukey (p<0,05).

6.3 Biomasa, altura de plantas e índice de cosecha

Durante la primera temporada se observaron diferencias en BIO entre las variedades (Tabla 3); la máxima acumulación fue de 28,23 Mg ha⁻¹ en el cv. Druchamp y el cultivar que presentó la menor acumulación de biomasa fue Tukan con 17,35 Mg ha⁻¹ (Tabla 4a). No se observó un aumento en BIO con el año de liberación de la variedad en la primera temporada (Fig. 4a), pero si en Carillanca en la segunda temporada, donde la ganancia genética fue de 70 kg/ha al año ($r^2= 0,64$; Fig. 4b).

La altura de planta disminuyó con el año de liberación en las tres localidades y los dos años, desde 142-131 cm en el cv. Druchamp a 91-92 cm en el cv Kiron (Tabla 4a, b). En la primera temporada, se observó una disminución de la altura de planta de 8,4 cm en SR, 7,9 cm en CA y 1,8 cm en PU (Fig. 4c). En la segunda temporada la reducción de la altura de planta por localidad fue de 6,5 cm SR, 4,6 cm CA y 2,7 cm en MA (Fig. 4d).

En las dos temporadas evaluadas, el cv Druchamp tuvo un IC de 0,18 y 0,23, mientras que el cv Maxwell mostró un IC de 0,41 y 0,40 (Tabla 4a, b). En las tres localidades evaluadas y en las dos temporadas la relación entre IC y el año de liberación no mostró una tendencia lineal (Fig. 4e, f). En las tres localidades se observa un aumento de los cvs liberados hasta antes del 2000, luego se observa una leve disminución (Fig. 4e) o una estabilización (Fig. 4f).

6.4 Componentes del rendimiento

ESM mostró diferencias estadísticas entre las variedades en la primera temporada (Tabla 3); la variedad con mayor ESM fue Laurel con 599, y la con menor Tukan con 366 (Tabla 4a, b). No se observó una ganancia genética asociada a este parámetro (Fig. 5a, b).

NUG varió entre 38,21 (cv. Druchamp) y 60,72 (cv. Tukan) en la primera temporada (Tabla 4a), en tanto en la segunda temporada entre 37,92 (cv Tukan) y los 56,08 (cv. Kiron) (Tabla 4b). La mayor ganancia genética en NUG se observó en Santa Rosa con un incremento de 0,31-0,4 granos por espiga por año en ambas temporadas (Fig. 5c, d), seguida de Carillanca en 2018 con 0,17 (Fig. 5c).

El PMG mostró una variación entre 37,21 g (cv Pionero) y 51,28 g (cv. Tukan), en la primera temporada (Tabla 4a), y entre 32,95 g (cv. Melifen) y 46,66 g (cv. Tukan) en la segunda temporada (Tabla 4b). El PMG mostró una ganancia genética de 1,9 g en Santa Rosa 2018 (Fig. 5e), pero en los otros ambientes no se reportó un cambio en este componente (Fig. 5e, f).

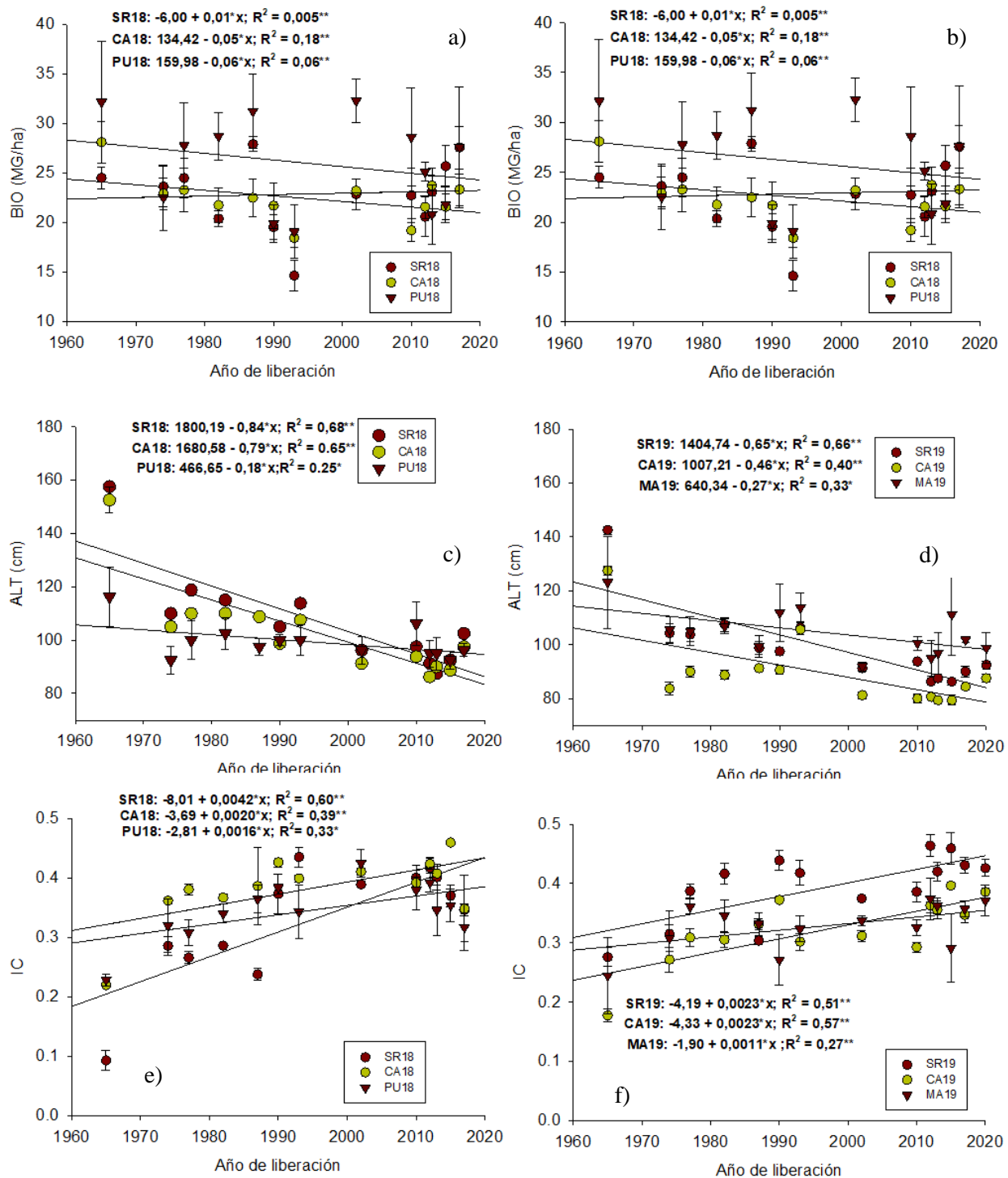


Figura 4. Relación entre el año de liberación de los genotipos y la biomasa total aérea BIO (a, b), altura de planta ALT (c, d), e índice de cosecha IC (e, f), en Santa Rosa (SR), Carillanca (CA) y Purranque en 2018-2019 (a, c, e) y SR, CA y Máfil (MA) en 2019-2020 (b, d, f). Valor p r²: (*) significativo p<0,05 (**) altamente significativo p< 0,01.

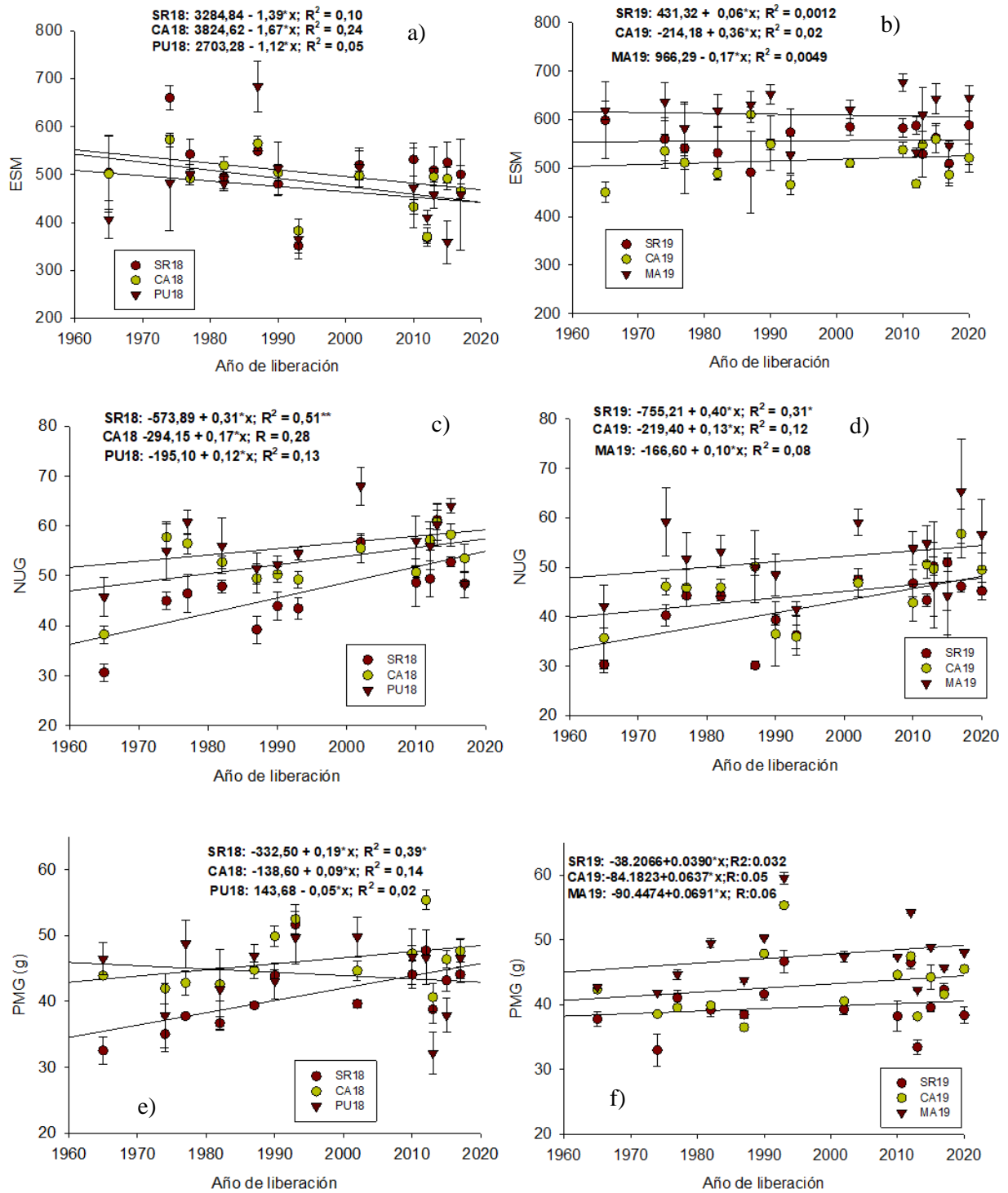


Figura 5. Relación entre el año de liberación y Número de espigas/m² ESM (a, b), Número de granos por espiga NUG (c, d) y peso de mil granos PMG (e, f) en Santa Rosa (SR), Carillanca (CA) y Purranque en 2018-2019 (a, c, e) y SR, CA y Máfil (MA) en 2019-2020 (b, d, f). Valor p r²: (*) significativo p<0,05 (**) altamente significativo p< 0,01.

6.5 Correlación entre el rendimiento y rasgos agronómicos.

Durante la primera temporada el RDG presentó correlaciones positivas y significativas con el IC ($r = 0,71$; $p < 0,01$), NUG ($r = 0,46$; $p < 0,01$) y PMG ($r = 0,42$; $p < 0,001$) (Tabla 5a). Durante la segunda temporada el RDG presentó correlaciones positivas y significativas con IC ($r = 0,47$; $p < 0,01$), NUG ($r = 0,48$; $p < 0,01$) y BIO ($r = 0,59$; $p < 0,001$) (Tabla 5b). Las correlaciones con ALT fueron negativas en ambas temporadas ($r = -0,51$; $p < 0,01$ en 2018-2019; $r = -0,51$; $p < 0,001$ en 2019-2020) (Tabla 5).

ALT se correlacionó negativamente con IC ($r = -0,60$; $p < 0,001$; $r = -0,53$; $p < 0,001$), y NUG ($r = -0,54$; $p < 0,001$; $r = -0,25$; $p < 0,001$) (Tabla 5) y PMG ($r = -0,18$; $p < 0,001$ solo en la primera temporada) (Tabla 5a). El IC fue correlacionado con el NUG en las dos temporadas ($r = 0,56$; $p < 0,001$) y ($r = 0,22$; $p < 0,001$) (Tabla 5) y con el PMG ($r = 0,51$; $p < 0,001$) solo en la primera temporada (Tabla 5a). El ESM, mostró una correlación positiva con la BIO en las dos temporadas ($r = 0,50$; $p < 0,001$; $r = 0,62$; $p < 0,001$) (Tabla 5).

Tabla 5. Coeficiente de correlación de Pearson's entre espigas por m^2 (ESM), altura de planta (ALT), rendimiento de grano (RDG), índice de cosecha (IC), peso de mil granos (PMG), biomasa aérea (BIO) y número de granos por espiga (NUG), de 13 genotipos de trigo invernal en la primera temporada (a) y 14 genotipos de trigo invernal segunda temporada (b), en localidades de alto rendimiento en el sur de Chile.

a) 2018-2019

	ESM	ALT	RDG	IC	PMG	BIO	NUG
ESM	1						
ALT	0,09	1					
RDG	0,18*	-0,51**	1				
IC	-0,05	-0,60**	0,71**	1			
PMG	-0,13	-0,18*	0,42**	0,50**	1		
BIO	0,50**	0,06	0,16*	-0,11	0,18*	1	
NUG	-0,005	-0,54**	0,46**	0,56**	0,24**	0,14	1

b) 2019-2020

	ESM	ALT	RDG	IC	PMG	BIO	NUG
ESM	1						
ALT	0,14	1					
RDG	0,29**	-0,28**	1				
IC	-0,04	-0,53**	0,47**	1			
PMG	0,06	0,15	0,35**	-0,03	1		
BIO	0,62**	0,27**	0,59**	-0,08	0,31**	1	
NUG	0,09	-0,25**	0,48**	0,22**	0,06	0,34**	1

**Correlación altamente significativa a un nivel de 0,01.

*Correlación significativa a un nivel del 0,05.

6.6 NDVI, PAR interceptado y eficiencia de uso de radiación (EUR)

Las mediciones para el análisis de estos parámetros fueron hechas en dos localidades (Santa Rosa y Carillanca), en las dos temporadas. La dinámica de la curva de senescencia de los valores del NDVI en función del tiempo termal para los 14 cultivares se muestra en la Fig. 6. El Ngreen_max, que corresponde a la diferencia entre el máximo valor de NDVI y el valor final del NDVI, varió en las diferentes variedades entre 0,27 y 0,78; la media de todas las variedades, exceptuando "Chevignon" fue de $0,41 \pm 0,089$, y el rango fue de 0,28 (cv. "Druchamp") – 0,60 (cv. "Tukan"). El valor de Ngreen_max para el cv. "Chevignon" resultó ser sobreestimado (Tabla 6). Ngreen_max se correlacionó positivamente con TN50 ($r = 0,99$; $p < 0,01$) y Nfinal ($r = 1,00$; $p < 0,01$), pero negativamente con TS ($r = -0,72$; $p < 0,01$) (Tabla 7).

Se observó que las variedades más antiguas necesitaron mayor cantidad de grados días (C°d) para alcanzar la espigadura (Fig. 6). Por ejemplo, "Druchamp" y "Melifen" liberados 1965 y 1977 necesitaron 1830,3 y 1814,7 C°d, respectivamente a espigadura, mientras que el cv. "Rocky" liberado el 2015 solo 1566,7 C°d (Fig. 6).

Para el rasgo TS, que es el indicador de la tasa de senescencia, la media de todos los cultivares fue de $-27,9 \pm -13,98$, y el rango fue de $-2,23$ (cv. "Druchamp") $-16,69$ (cv. "Maxwell"). La máxima tasa de senescencia fue del cv. "Tukan" ($-58,44$), seguido por el cv. "Laurel" ($-45,03$) (Tabla 6), exceptuando el cv. Chevignon ($-125,64$). TS se correlacionó negativamente con TN50 ($r = -0,72$; $p < 0,01$) y Nfinal ($r = -0,72$; $p < 0,01$).

El TN50, es el tiempo termal (C°d) cuando se encuentra 50% del Ngreenmax. La media de las variedades fue de $2112,8$ (C°d). El cv. "Druchamp" y el cv. "Kiron" fueron los que presentaron menor TN50 ($2007,52$ y $2026,4$ C°d, respectivamente), por lo tanto, son los cultivares que pierden más temprano el 50% del verdor del dosel. La variedad de mayor TN50 fue "Chevignon" con $3097,51$ C°d, seguida de "Talafen" con $2058,89$ C°d, siendo los cultivares que más se demoran en alcanzar el 50% de la senescencia (Fig. 7; Tabla 6). En los últimos 10 años el TN50 tiene una brecha de $20,15$ °Cd.

El Nfinal, es el valor NDVI de la última medición que se hicieron a las parcelas. La media de todas las variedades, exceptuando cv. "Chevignon", fue de $0,36$; el Nfinal más alto se observó en "Druchamp" y "Laurel" con $0,52$ y $0,48$, respectivamente, y los cvs. con los valores los más bajos fueron en "Tukan" y "Kona" con $0,18$ y $0,22$, respectivamente (Tabla 6). Entre las variedades liberadas desde los 60's hasta la fecha, existe una brecha de este rasgo de $0,34$ y mantiene una estrecha correlación con los demás rasgos de la curva de senescencia.

Para el análisis de la FPAR se utilizó un ajuste sigmoideo (Fig. 8). La FPAR aumenta a medida que se desarrolla el cultivo, hasta llegar una meseta y después empieza a decaer, de la misma manera que se produce en la curva del NDVI para medir la "permanencia de verdor" (Fig. 6; 7) En general, las nuevas variedades mostraron un aumento más rápido en FPAR desde el comienzo de la temporada.

El uso eficiente de radiación, EUR, se analizó en Santa Rosa y Carillanca, en las dos temporadas (Fig. 9). En ambos ambientes y temporadas se observó una ganancia genética en EUR que varió entre $0,0044$ y $0,0051$ g/MJ al año en Santa Rosa, en 2018 y 2019, respectivamente, y entre $0,0017$ y $0,0103$ g/MJ al año en Carillanca. Siendo solo Carillanca en la segunda temporada la que obtuvo un r significativo ($r=0,77$). La media de EUR de todas las variedades fue de $2,54 \pm 0,12$ g/MJ al año.

Finalmente, se encontró una relación lineal y positiva entre EUR y RDG y BIO de las 14 variedades (Fig. 10), lo que indica que las variedades más productivas fueron las que tuvieron una mayor eficiencia de uso de radiación.

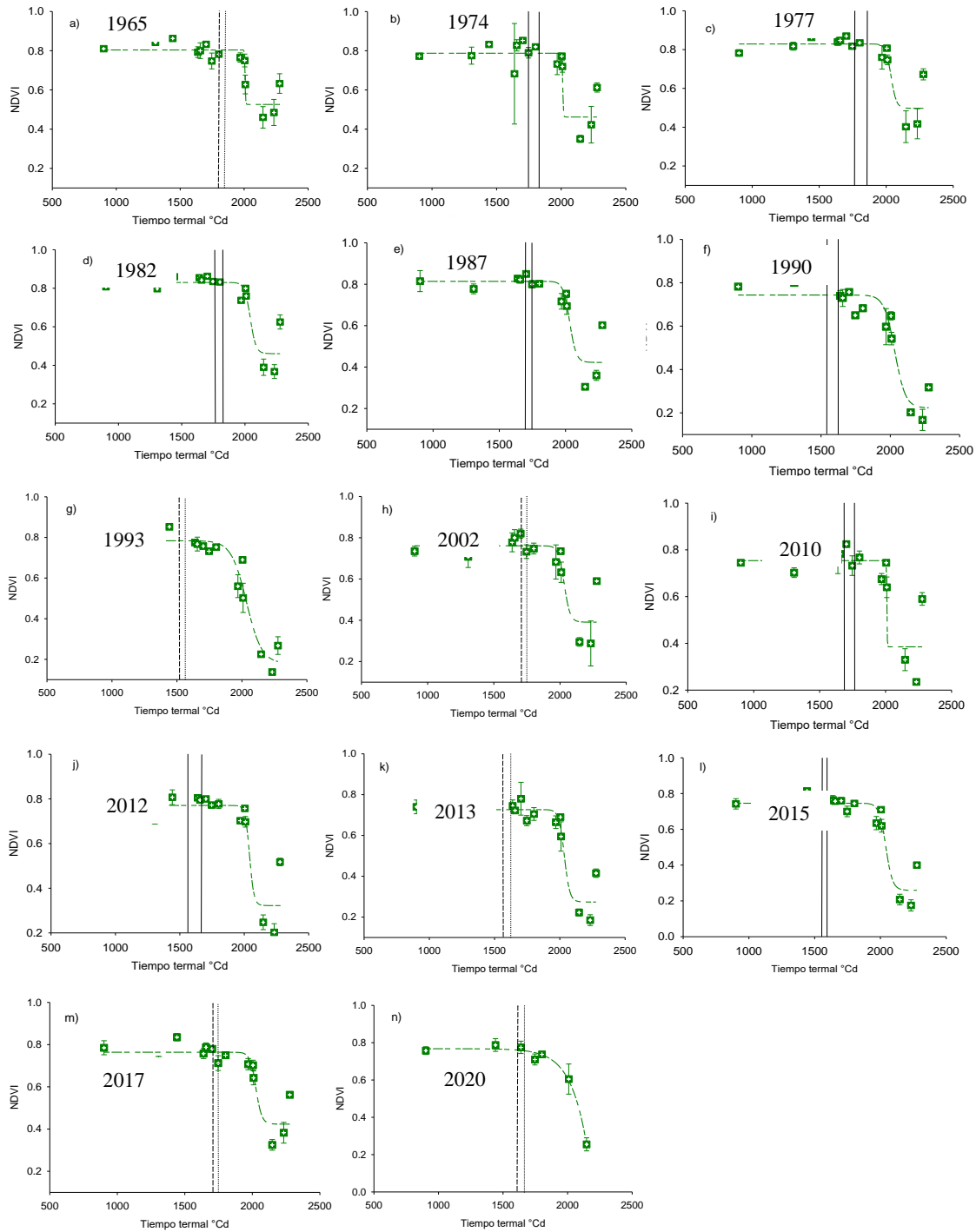


Figura 6. Cambio en el NDVI en función del tiempo termal desde siembra, en 14 cultivares de trigo invernal liberados entre 1965 y 2020, en dos localidades (Santa Rosa y Carillanca) y dos temporadas (2018-2019 y 2019-2010). Cada valor corresponde al promedio de cuatro repeticiones. Las líneas verticales indican el rango de GDA de la fase de espigadura.

Tabla 6. Parámetros de la función sigmoidea, de la relación entre el NDVI y el tiempo termal desde siembra para cada cultivar, medias de dos localidades y dos temporadas; Santa Rosa y Carillanca en 2018-2019 y 2019-2020. **N_{green_max}** es la diferencia del valor máximo del NDVI con respecto con su valor final; **TS** corresponde a la tasa; **TN50** es el tiempo termal (C°d) cuando el cultivo se encuentra 50% senescente; y **N_{final}** es cuando el cultivo se encuentra totalmente senescente (valor final NDVI).

Año	N _{green_max}	TS	TN50	N _{final}	R ²
1965	0,28±0,01	-2,23±0,9	2007,52 ± 0,9	0,52±0,01	0,81
1974	0,34±0,02	-20,37±29,7	2035,25 ± 43,3	0,46±0,02	0,80
1977	0,43±0,02	-27,87±11,5	2054,62±22,2	0,40±0,02	0,92
1982	0,48±0,01	-28,54±4,9	2058,89±9,9	0,37±0,01	0,98
1987	0,34±0,03	-45,03±36,8	2039,60±36,69	0,48±0,02	0,80
1990	0,52±0,02	-38,14±13,9	2032,98±14,6	0,22±0,024	0,90
1993	0,60±0,04	-58,44±14,8	2035,31±14,8	0,18±0,03	0,92
2002	0,37±0,03	-22,18±28,8	2032,03±35,9	0,39±0,02	0,74
2010	0,35±0,03	-35 ±47,8	2046,55±62,4	0,41±0,03	0,68
2012	0,39±0,02	-16,69±35,9	2037,47±66,08	0,38±0,02	0,82
2013	0,45±0,02	-20,74±21,2	2034,89±30,2	0,27±0,02	0,87
2015	0,48±0,02	-25,70±17,4	2041,43±25,9	0,25±0,02	0,90
2017	0,34±0,02	-22±18,5	2026,40±19,2	0,42±0,01	0,83
2020	987,10±0,01	-125,64±16,2	3097,51±122,1	-986,33±0,001	0,95

Tabla 7. Matriz de correlación del coeficiente de Pearson's entre los diferentes rasgos de la curva de senescencia de la permanencia de verdor con respecto el rendimiento del grano RDG.

	N _{greenmax}	TS	TN50	N _{final}	RDG
N _{greenmax}	1				
TS	-0,72**	1			
TN50	0,99**	-0,72**	1		
N _{final}	1,00**	-0,72**	0,99**	1	
RDG	0,38	-0,40	0,402	0,38	1

*: p < 0,05; **: p < 0,01

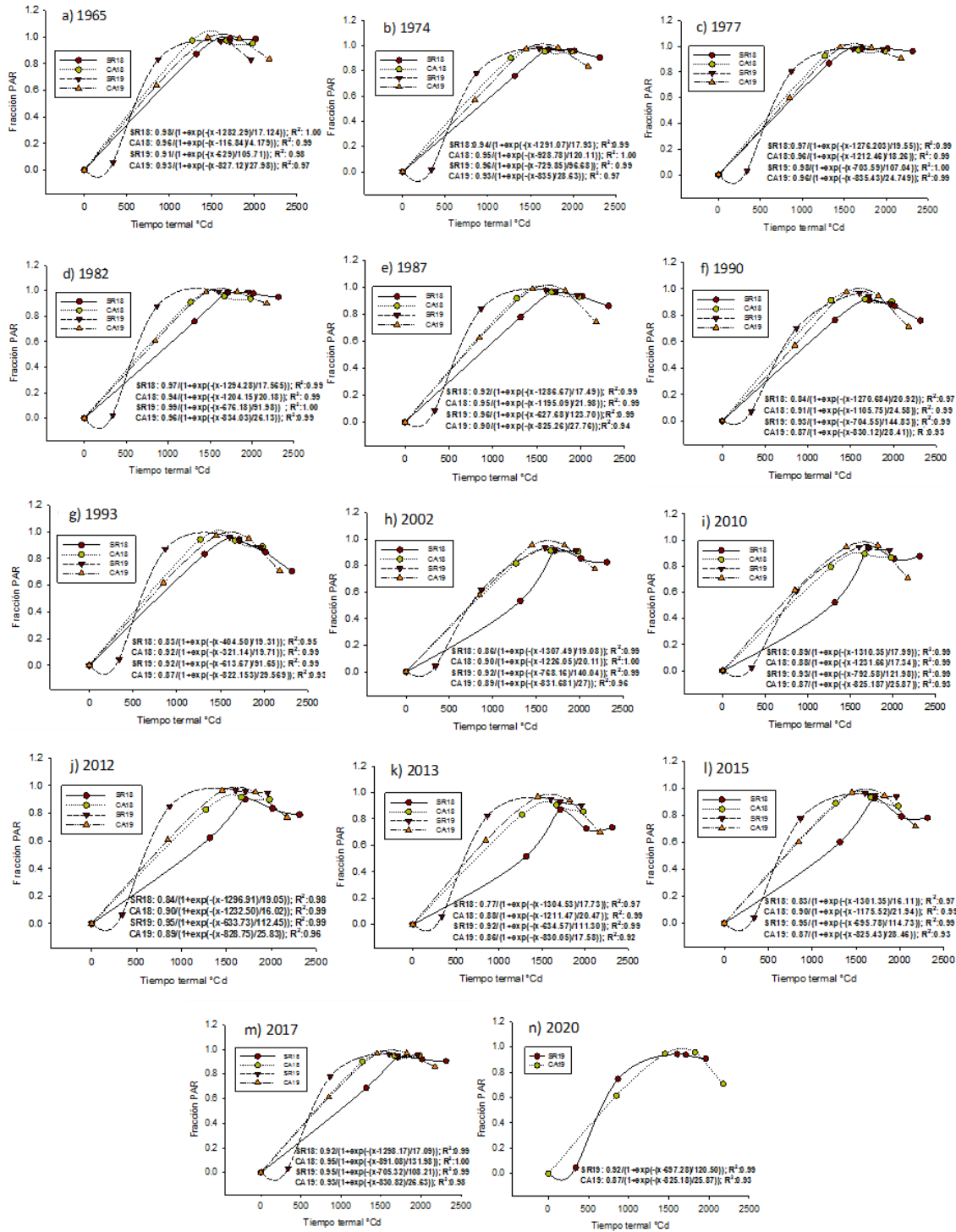


Figura 8. Relación entre la fracción de PAR interceptado por el dosel y el tiempo termal desde siembra, para los 13 - 14 cultivares liberados entre 1965 y 2020. Los valores corresponden a mediciones hechas en Santa Rosa y Carillanca en 2018-2019 (SR18, CA18) y en 2019-2020 (SR19, CA19).

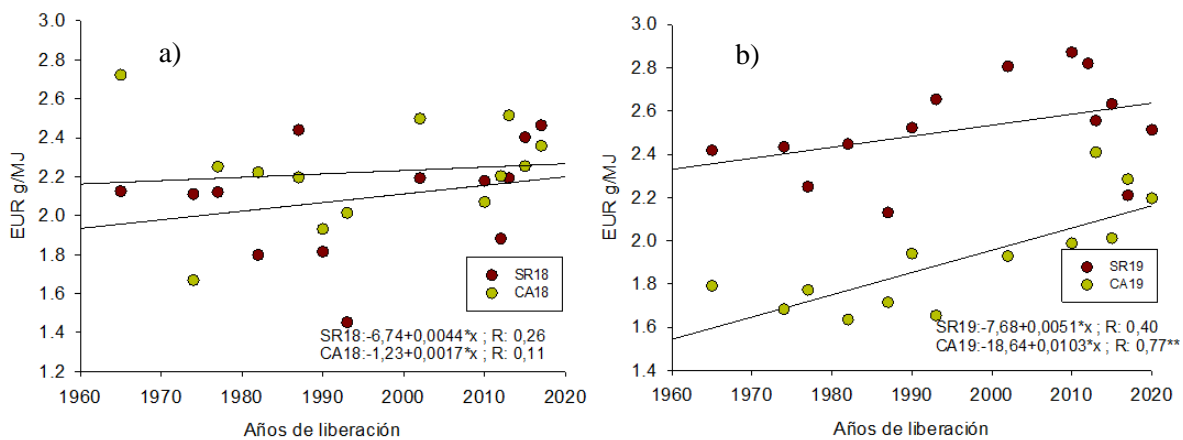


Figura 9. Relación entre la eficiencia de uso de radiación (EUR) y el año de liberación del cultivar, en Santa Rosa (SR18, SR19) y Carillanca (CA18, CA19), en dos temporadas a) 2018-2019 y b) 2019-2020. (*) significativo valor $p < 0,05$ (**) muy significativo valor $p < 0,01$.

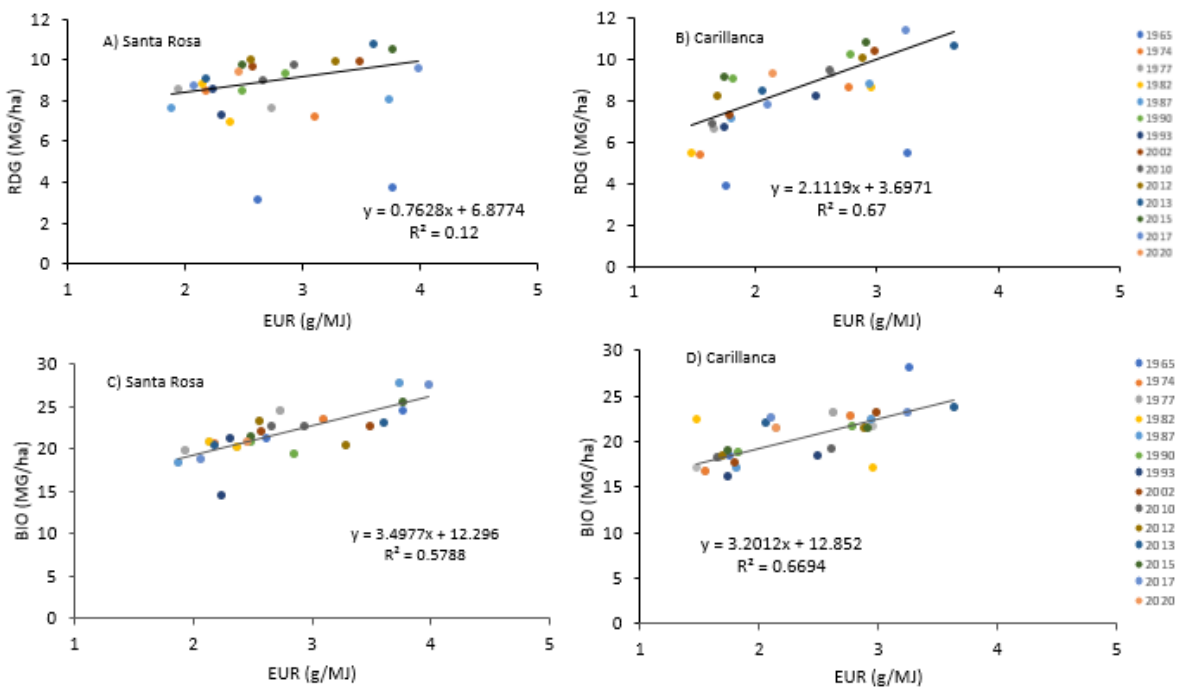


Figura 10. Relación entre la EUR y el rendimiento de grano RDG en A) Santa Rosa, B) Carillanca y la Biomasa aérea en C) Santa Rosa y D) Carillanca. La regresión lineal no está incluida el cultivar más antiguo.

7 DISCUSIÓN

Las evaluaciones de caracteres agronómicos y fisiológicos en cultivares liberados durante un periodo de tiempo, permite conocer la progresión genética en los diferentes programas de mejoramiento (Lopes et al., 2012; Aisawi et al., 2015; Gao et al., 2017). En el país se han realizado estudios en la evaluación de progresión genética en trigos invernales (Matus et al., 2012), trigos primaverales (del Pozo et al., 2014) y trigos duros (del Pozo et al., 2019). En el presente estudio se analizaron dos temporadas, con 13 y 14 cultivares de trigos invernales liberados desde los 60's a la actualidad por el programa de mejoramiento genético (PMG) del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), los cuales fueron evaluados en localidades de alto rendimiento en el sur de Chile, se analizaron rasgos agronómicos y características fisiológicas como la EUR, la permanencia de verdor entre otras.

7.1 Rendimiento y sus componentes

El rendimiento de grano de los trigos invernales de este estudio mostró una tasa media de progresión genética de 69,3 kg ha⁻¹ por año (Fig. 3), mayor a la reportada en trigos primaverales de 1964-2008; 43,5 kg ha⁻¹ año, evaluados en el Centro Experimental Santa Rosa (del Pozo et al., 2014). En variedades de trigos duros liberadas entre 1964 y 2010 el progreso genético fue 72,8 kg ha⁻¹ al año (del Pozo et al., 2019). En un estudio anterior realizado por Matus et al. (2012) en ensayos estándar del PMG reportaron que en trigos invernales entre 1965 y 1975 no hubo un incremento de rendimiento. Sin embargo, entre 1976 y 1998 el rendimiento aumentó a una tasa anual de 2,6%. Los componentes del rendimiento que más influenciaron sobre el rendimiento del grano fueron el número de granos por espiga (25,9%) e índice de cosecha (43,8%) estos porcentajes representan la media de todas las localidades y temporadas (Fig. 5). En Brasil, se obtuvo una ganancia de 29 kg ha⁻¹ al año en trigos primaverales (Beche et al., 2014) y en México, de 64,5 kg ha⁻¹ (Lopes et al., 2012). En trigo invernales en USA, la progresión genética ha sido de 81,3 kg ha⁻¹ al año para variedades liberadas entre 1958 y 2008 (Graybosch y Peterson, 2010) y de 57,5 kg ha⁻¹ al año entre 1950 y 2012 en China (Gao et al., 2017). En Australia, en trigos invernales liberados entre 1958 al 2007 el progreso genético del rendimiento fue de 25 ± 3.4 kg ha⁻¹ (Sadras y Lawson, 2011). En Alemania, la ganancia en el rendimiento fue de 24% (Laidig et al., 2017). Sin embargo, en trigos primaverales en Argentina (Lo Valvo et al., 2018) observó que la progresión genética ha disminuido en los últimos años de 51 kg ha⁻¹ en el periodo de (1940-1999) a 14 kg ha⁻¹ al año desde finales de los 90's al 2011. En China en las provincias de Hebei, Shandong, Beijing y Tianjin, también se ha observado una disminución del progreso en el rendimiento (Li et al., 2014). Esto quiere decir que cada vez los rendimientos están llegando una ralentización en el progreso genético viéndose en

diferentes regiones del planeta una meseta en la curva de los rendimientos (Grassini et al., 2013).

El IC en este estudio mostró una relación positiva con el año de liberación (Fig. 4e, f), asociado a un mayor rendimiento de granos en ambas temporadas (Tabla 5a, b). Esta asociación positiva es por los cambios en la distribución de biomasa (Brancourt-Hulmel et al., 2003; Tian et al., 2011). Asociaciones similares han sido reportadas en un panel de 117 cultivares de trigo invernal liberados entre 1920 y 2000 (Matus et al., 2012), en trigos primaverales liberados entre 1920 y 2000 (del Pozo et al., 2014) y en variedades de trigo candeal liberadas entre 1964 y 2010 (del Pozo et al., 2019). Un trabajo hecho en España bajo diferentes condiciones ambientales, evaluando un panel histórico de variedades liberadas entre 1940 y 1998, el IC aumentó en un 43% (Acreche et al., 2008). En Brasil, el IC ha aumentado en un 24% al año, con una correlación positiva con el rendimiento (Beche et al., 2014). En nuestro estudio, el IC desde mediados de los 60 a la actualidad ha aumentado 69%, esto es superior a lo reportado en un estudio anterior de trigos invernales hecho por Matus et al. (2012).

Sin embargo, en últimos años se ha observado un estancamiento o planicie en el IC (Fig. 4e, f). Algo similar ha sido reportado en la provincia de Shaanxi, China, donde hubo un aumento importante en IC desde 1940 hasta 1980, pero posteriormente no ha tenido grandes cambios y se ha mantenido en 0,40 (Sun et al., 2014). Los autores lo atribuyen a la mayor acumulación de carbohidratos en los tejidos de las raíces para tener una mejor tolerancia al estrés hídrico. Varios autores proponen que el límite biológico para el índice de cosecha en trigos es de un $\approx 0,60$ (Foulkes et al., 2009; Brisson et al., 2010; Grassini et al., 2013). Nuestro estudio muestra que es un carácter que se puede mejorar en el futuro.

La altura de la planta muestra una reducción de 34,6%, desde 142,08 a 87,29 cm en los últimos 50 años (Tabla 1; Fig. 2c, d). Esta disminución es asociada a la introgresión de genes enanizantes *Rht1* y *Rht2* en los programas de mejoramiento que inhiben la producción de ácido giberélico endógeno, que es el promotor de la elongación de las células internodales (Zapata et al., 2004; Fischer, 2011; Foulkes et al., 2011). En un estudio anterior, la comparación de 117 accesiones de trigos invernales separados en dos paneles (1920-1960 y 1960-2000), mostró una disminución de un 25,6% en la altura de planta de las accesiones modernas (después de 1960) (Matus et al., 2012). En trigos modernos, la altura apropiada para prevenir la tendadura es de 70 - 100 cm. Richards, (1992). Pasando este rango, la planta es más susceptible a la tendadura provocando la disminución del rendimiento del grano (Sun et al., 2014). El IC presentó una asociación negativa con la altura de planta (Tabla 5), lo que ha sido observado también en Francia (Brancourt-Hulmel et al., 2003), México (Lopes et al., 2012), Brasil (Beche et al., 2014) y China (Qin et al., 2015).

El número de espigas por unidad de área tuvo una alta correlación con la biomasa aérea de 50% y 62%, en las dos temporadas respectivamente (Tabla 4a, b), pero no se observó una asociación con el año de liberación de la variedad (Fig. 3a, b). Qin et al. (2015) observaron que el número de espigas por unidad de área no ha tenido mayor significancia en el progreso del rendimiento. Igualmente, Tian et al. (2011) observaron que ha disminuido

considerablemente la ganancia genética de este rasgo. Por el contrario, Xiaoyan y Zheming (1994) sugiere que el rendimiento del grano de trigo invernal en la provincia de Shaanxi, se incrementó de 740 kg ha⁻¹ desde 1940 al 1990, debido al mejoramiento del número de espigas por unidad de área.

El número de granos por espiga ha aumentado desde 37,2 en el cultivar liberado en el 1965 a 50,2 granos en el cultivar liberado en 2017, lo que representa un mejoramiento de 25,24%. Esto fue menor al observado en un estudio anterior donde compararon cultivares modernos y antiguos de trigo invernal, que mostró un aumento de 42,6% (Matus et al., 2012). El número de granos por espiga mostró una correlación positiva con el rendimiento (0,46 – 0,48) y una correlación negativa en la altura (-0,54 - -0,25), en la primera y segunda temporada, respectivamente. Similares tendencias se han visto en diferentes estudios tanto con estrés hídrico y sin estrés (Mwadzingeni et al., 2018) o en diferentes ambientes (Ferrante et al., 2017).

El PMG mostró una alta correlación con el año de liberación, de 0,42 en la primera temporada y 0,35 en la segunda temporada (Tabla 5a, b). En Santa Rosa, en la segunda temporada, fue el sitio que mostró una tendencia más clara en este componente con una tasa de crecimiento de 1,9 g al año (Fig. 5e); el cv. “Melifen” de 1974 tuvo un PMG de 32,9 g y el cv. “Tukan” de 1993 de 46,28 g (datos no mostrados). Sin embargo, en estudios anteriores de trigos invernales, Matus et al (2012) encontró que el PMG tenía una correlación negativa con respecto al año de liberación de -0,46. En trigos duros en Chile, se observó que no fue significativa la correlación con el año de liberación en el periodo de 1970-2000 (del Pozo et al., 2019). El mejoramiento de este rasgo puede ser positivo, negativo o nulo dependiendo de los objetivos de los programas de mejoramiento. En trigos facultativos de la provincia de Henan (China), el progreso en el rendimiento fue atribuido directamente al aumento del PMG, el que pasó desde 31,6 g a 51 g, entre 1981 y 1999, con una tasa de aumento anual de 0,4 g al año (Zhou et al., 2007; Zheng et al., 2011); esto puede ser debido al traspaso del gen 1B,1R que tiene la particularidad de tener granos de mayor tamaño. En México se evaluaron un set histórico de trigos primaverales (1977 a 1998) obtenidos del CIMMYT, en los que el PMG mostró una tasa de aumento de 0,21 g al año (Lopes et al., 2012). En trigos invernales en la provincia de Shaanxi en China, el PMG obtuvo un aumento de 32,1 g en los 40's hasta alcanzar 38,6 g en los 2000's (Sun et al., 2014). El PMG tiene una relación inversa con respecto al número de granos por espiga (Slafer et al., 2014). Además, se ha reportado que este rasgo tiene una asociación negativa bajo estrés de intenso calor (Sharma et al., 2008; Lopes y Reynolds, 2012).

La biomasa aérea, en la segunda temporada, no presentó diferencias estadísticas entre los diferentes cultivares liberados entre 1965 y 2020 (Tabla 4). Similares resultados han sido descritos en Francia, con cultivares de trigo invernal liberados entre 1946 al 1992, donde no se reportaron diferencias en la biomasa total aérea (Brancourt-Hulmel et al., 2003). En España, un panel histórico de ocho cultivares de trigo harinero liberado desde 1940 a 1998, la biomasa aérea no presentó una tendencia significativa con el año de liberación en los diferentes ensayos evaluados (Acreche et al., 2008). En China, se evaluó un panel histórico en condiciones de riego y de secano, no observaron una ganancia en la biomasa aérea

(Sun et al., 2014). Otro estudio, en trigo invernal, reportó un ligero cambio en la biomasa aérea en un panel histórico de 1960 al 2000 (Zhou et al., 2007). Los resultados indican que no ha habido un aumento de la biomasa total del cultivo, si no que ha cambiado la distribución hacia un mayor rendimiento de granos.

7.2 Intercepción del PAR, permanencia del verdor y eficiencia uso de radiación.

Con la introgresión de los genes enanizantes o semienanizantes se logró un cambio en el índice de cosecha, lo que se tradujo en aumentos en el rendimiento (Zapata et al., 2004). Sin embargo, en muchas regiones existe una disminución o un estancamiento en el rendimiento (Grassini et al., 2013). Por lo tanto, se necesitan otras rutas para incrementar el rendimiento. Una de estas es el mejoramiento del EUR y la otra es el carácter de mantener verde el dosel, conocido como *stay green* (Fischer et al., 2009; Christopher et al., 2014). Ambas son claves para capturar PAR incidente y mejorar la conversión en biomasa, lo que se traduce en aumentar el rendimiento.

El NDVI sirve como indicador indirecto de la concentración de la clorofila, área foliar y el rendimiento y se ha visto una saturación de NDVI alrededor de la floración (~0,92) y una disminución gradual hasta la maduración (~0,35) (Duan et al., 2017). En muchos años esta característica ha sido empíricamente incluida en la selección visual en los programas de mejoramiento de plantas que están interesados por tener una “permanencia del verdor” mucho más prolongado, incrementando la duración del llenado del grano (Christopher et al., 2014; Gaju et al., 2014; Magney et al., 2016).

En este estudio, la dinámica de la curva de senescencia varió entre los diferentes genotipos liberados de los 60's a los 2020 (Fig. 7, Tabla 6). Sin embargo, en los diferentes parámetros de la curva de permanencia del verdor, los valores de correlación con el rendimiento no alcanzaron a ser significativos ($p > 0,05$) (Tabla 7). Esto se podría deber a que el ajuste del modelo se hizo con los promedios de NDVI de cada genotipo, en cada ambiente, y en consecuencia el N es bajo ($N = 14$). También se ha visto en varios estudios que la permanencia del verdor en ambientes sin estrés hídrico no siempre se correlaciona con el rendimiento de trigo (Lopes y Reynolds, 2012; Christopher et al., 2016; Man et al., 2017), maíz y sorgo (Gregersen et al., 2013). En diferentes estudios se ha visto que la permanencia del verdor puede ser perjudicial en el rendimiento ya que ralentiza el transporte de los carbohidratos de la hoja al grano y dificulta la cosecha al retrasar la madurez (Gong et al., 2005; Yang y Zhang, 2006). Otra de las razones podría ser el tipo de “*stay-green*”; tipo A, esto se refiere la senescencia empieza tardía pero luego procede a un ritmo normal; tipo B, su senescencia es a la fecha prevista, pero su tasa es más lenta que la anterior; y tipo C que mantiene la clorofila por más tiempo o indefinidamente, pero sus procesos fisiológicos muestran una senescencia normal, por lo que se le denomina un *stay-green* “cosmético”

(Thomas y Howarth, 2000; Thomas y Ougham, 2014). Por ejemplo, en *Festuca pratensis*, el *stay-green* es independiente de fenología y se ha visto como carácter recesivo de la ruta de la degradación de la clorofila (Vicentini et al., 1995). Este es un tipo de *stay-green* tipo C, no es funcional, afecta en la degradación de la clorofila, pero no en otros aspectos de la mecánica de la senescencia (Thomas y Howarth, 2000; Sakuraba et al., 2015).

Sin embargo, los rasgos de la dinámica de la senescencia están muy correlacionados entre sí. El N_{max} , el TN_{50} y el N_{final} , tienen una correlación positiva con una alta significancia ($p < 0,05$), mientras el TS se encuentra negativamente correlacionado ($p < 0,05$) (Tabla 7). En otro estudio también se vio este comportamiento con respecto a los diferentes parámetros de la permanencia del verdor con una significancia de ($p < 0,05$) (Christopher et al., 2016).

La tasa de senescencia en diferentes estudios se ha visto que mientras mayor sea el rendimiento, la tasa de senescencia disminuye drásticamente (Lopes et al., 2014; Christopher et al., 2016). En este estudio las menores tasas de senescencia fue el cv “Bicentenario” y los cvs. “Melifen” y “Talafen” (Tabla 7). En una investigación realizada en México, Asia y África, en trigo de hábito primaveral liberados entre 1977 y 2008 por CIMMYT, se observó una correlación positiva con el NDVI hasta la madurez fisiológica y una correlación negativa con la tasa de senescencia. Otro estudio establecido en Inglaterra Adu et al. (2011) evaluaron trigos invernales modernos comparados con genotipos de tres trigos ancestrales (*Einkorn*, *Emmer*, *Spelt*), para buscar dentro de la alta variabilidad genética, rasgos que aumentarían la permanencia de verdor de los trigos modernos. Observaron que los trigos ancestrales se demoraban más en desarrollarse y permanecieron más tiempo verdes, en especial el *Spelt* cv. Oberkulmer, comparado con los trigos modernos, que tuvieron un desarrollo mucho más rápido de la biomasa aérea, junto con una mayor caída del verdor durante el llenado de granos.

Uno de los futuros desafíos de los programas de mejoramiento es incrementar la biomasa aérea mediante la optimización de la eficiencia del uso de la radiación EUR, que es uno de los principales cuellos de botella en el aumento de los rendimientos del trigo (Long et al., 2006; Molero et al., 2019). Sin embargo, es un carácter complejo, sumado a las interacciones en los diferentes estados fenológicos hace difícil para los mejoradores predecir y enfocarse en esta característica (Furbank et al., 2019; Robles-Zazueta et al., 2021). En este estudio se observó una tendencia positiva de este carácter con el año de liberación en casi todos los ambientes y temporadas (Fig. 9). Esto significa que existe una tendencia en el mejoramiento de este rasgo. Además, si el EUR lo comparamos con la biomasa aérea podemos ver una tendencia positiva; una relación directa entre el aumento de la eficiencia de la EUR con la biomasa aérea (Fig. 6). Un estudio hecho en España en trigos primaverales Acreche et al. (2009) observaron una alta variabilidad en EUR con respecto al año de liberación; los genotipos más antiguos presentaron en post-antesis una tasa de crecimiento y un EUR menores que sus contrapartes más modernas.

En la primera temporada no se observó ganancia genética en EUR, pero en la segunda temporada si se observó aumento. Un estudio de trigos invernales en UK reportó cambios genéticos y una relación significativa entre EUR en pre-antesis y el rendimiento de granos de 0.012 g MJ^{-1} al año, lo que se tradujo en un aumento de la biomasa aérea (Shearman et

al., 2005). Igualmente, sucedido un estudio hecho en Mexico Aisawi et al. (2015) concluyó que el progreso en el rendimiento fue por el aumento de la biomasa aérea. En este estudio, en la segunda temporada se observó una ganancia genética de 0.005 g MJ^{-1} al año y de 0.01 g MJ^{-1} en Santa Rosa y Carillanca, respectivamente (Fig. 9b). Estudios indican que el mejoramiento de la EUR podría aumentar hasta un 50% el rendimiento potencial (Reynolds et al., 2011), de ahí la importancia de incluir este carácter en la selección de nuevos genotipos para diversas condiciones de crecimiento de los cultivos.

Una ayuda a los programas de mejoramiento es la utilización de drones e instrumentos no destructivo para medir en NDVI que permitan acelerar y mejorar la predicción de los rendimientos y la calidad del trigo (Lopes et al., 2014; Magney et al., 2016).

8 CONCLUSIONES

El progreso genético de trigos invernales liberados por INIA entre 1965 y el 2020, muestran una clara disminución de la altura de planta. Los cambios en la arquitectura de las plantas se asocian a cambios en intercepción de PAR, a la eficiencia en el uso de radiación y tener un llenado de granos con hojas verdes por más tiempo. La biomasa aérea no mostró cambios en los cultivares estudiados, sin embargo, hubo una redistribución de ésta, lo que tradujo en aumento del índice de cosecha hasta comienzos de los 90s, para luego mantenerse en aproximadamente 0,38. La progresión genética en el rendimiento de grano fue asociada al aumento del índice de cosecha, del número de granos por espiga y peso de mil granos, y a un mejor uso de la radiación en los cultivares modernos.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Acreche, M. M., Briceño-Félix, G., Sánchez, J. A. M., & Slafer, G. A. (2008). Physiological bases of genetic gains in Mediterranean bread wheat yield in Spain. *European Journal of Agronomy*, 28(3), 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.07.001>.
- Acreche, M. M., Briceño-Félix, G., Sánchez, J. A. M., & Slafer, G. A. (2009). Radiation interception and use efficiency as affected by breeding in Mediterranean wheat. *Field Crops Research*, 110(2), 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.07.005>.
- Acreche, M. M., & Slafer, G. A. (2009). Grain weight, radiation interception and use efficiency as affected by sink-strength in Mediterranean wheats released from 1940 to 2005. *Field Crops Research*, 110(2), 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.07.006>.
- Adu, M. O., Sparkes, D. L., Parmar, A., & Yawson, D. O., (2011). 'Stay Green' in Wheat: Comparative Study of Modern Bread Wheat and Ancient Wheat Cultivars. *ARNP J Agric Biol Sci*, 6, 16-24. www.arnpjournals.com.
- Aisawi, K. A. B., Reynolds, M. P., Singh, R. P., & Foulkes, M. J. (2015). The physiological basis of the genetic progress in yield potential of CIMMYT spring wheat cultivars from 1966 to 2009. *Crop Science*, 55(4), 1749–1764. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.09.0601>.
- AGROMET (Red agrometeorológica de INIA). (2020) Disponible online: <<https://agrometeorologia.cl/>>. Consultado el: 04 de marzo 2020.
- Arjona, J. M., Royo, C., Dreisigacker, S., Ammar, K., & Villegas, D. (2018). Effect of Ppd-A1 and Ppd-B1 Allelic Variants on Grain Number and Thousand Kernel Weight of Durum Wheat and Their Impact on Final Grain Yield. *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00888>.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T., & Hatfield, J. L. (1984). Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat. *Agronomy Journal*, 76(2), 300-306. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020029x>.
- Ballesteros-Rodríguez, E., Martínez-Rueda, C. G., Morales-Rosales, E. J., Estrada-Campuzano, G., & González, G. F. (2019). Changes in Number and Weight of Wheat and Triticale Grains to Manipulation in Source-Sink Relationship. *International Journal of Agronomy*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7173841>.
- Beche, E., Benin, G., da Silva, C. L., Munaro, L. B., & Marchese, J. A. (2014). Genetic gain in yield and changes associated with physiological traits in Brazilian wheat during the 20th century. *European Journal of Agronomy*, 61, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.08.005>.
- Bogard, M., Jourdan, M., Allard, V., Martre, P., Perretant, M. R., Ravel, C., Heumez, E., Orford, S., Snape, J., Griffiths, S., Gaju, O., Foulkes, J., & Le Gouis, J. (2011). Anthesis date mainly explained correlations between post-anthesis leaf senescence, grain yield, and grain protein

concentration in a winter wheat population segregating for flowering time QTLs. *Journal of Experimental Botany*, 62(10), 3621-3636. <https://doi.org/10.1093/jxb/err061>.

Borrás, L., Slafer, G. A., & Otegui, M. E. (2004). Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: A quantitative reappraisal. *Field Crops Research*, 86(2–3), 131–146. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.08.002>.

Brancourt-Hulmel, M., Doussinault, G., Lecomte, C., Bérard, P., Le Buanec, B., & Trottet, M. (2003). Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Science*, 43(1), p. 37-45. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.3700>.

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F. X., & Huard, F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research*, 119(1), 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.012>.

Bustos, D. V., Hasan, A. K., Reynolds, M. P., & Calderini, D. F. (2013). Combining high grain number and weight through a DH-population to improve grain yield potential of wheat in high-yielding environments. *Field Crops Research*, 145, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.01.015>.

Calderini, D. F., & Slafer, G. A. (1998). Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Field Crops Research*, 57(3), 335–347. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00080-X).

Camargo, A. V., & Lobos, G. A. (2016). Latin America: A Development Pole for Phenomics. *Frontiers in plant science*, 7, 1729. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01729>.

Campillo, R., Jobet, C., & Undurraga, P. (2010). Effects of Nitrogen on Productivity, Grain Quality, and Optimal Nitrogen Rates in Winter Wheat cv. Kumpa-INIA in Andisols of Southern Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 70(1), 122-131. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392010000100013>.

Cargnin, A., De Souza, M. A., & Fronza, V. (2008). Progress in breeding of irrigated wheat for the Cerrado region of Brazil. *Embrapa Soja-Artigo em periódico indexado (ALICE)*, 8(1), 39–46. <https://doi.org/10.12702/1984-7033.v08n01a06>.

Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241-252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1).

Chakwizira, E., Meenken, E. D., George, M. J., & Fletcher, A. L. (2015). Can we use photography to estimate radiation interception by a crop canopy? *Plant Biology*, 17(2), 574-582. <https://doi.org/10.1111/plb.12240>.

Christopher, J. T., Veyradier, M., Borrell, A. K., Harvey, G., Fletcher, S., & Chenu, K. (2014). Phenotyping novel stay-green traits to capture genetic variation in senescence dynamics. *Functional Plant Biology*, 41(11), 1035–1048. <https://doi.org/10.1071/FP14052>.

- Christopher, J. T., Christopher, M. J., Borrell, A. K., Fletcher, S., & Chenu, K. (2016). Stay-green traits to improve wheat adaptation in well-watered and water-limited environments. *Journal of Experimental Botany*, 67(17), 5159–5172. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw276>.
- Collard, B. C., Jahufer, M. Z. Z., Brouwer, J. B., & Pang, E. C. K. (2005). An introduction to markers, quantitative trait loci (QTL) mapping and marker-assisted selection for crop improvement: The basic concepts. *Euphytica*, 142(1–2), 169–196. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2568-4_6.
- Cooper, R. (2015). Re-discovering ancient wheat varieties as functional foods. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 5(3), 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2015.02.004>.
- Crain, J., Mondal, S., Rutkoski, J., Singh, R. P., & Poland, J. (2018). Combining high-throughput phenotyping and genomic information to increase prediction and selection accuracy in wheat breeding. *The plant genome*, 11(1), 170043. <https://doi.org/10.3835/plantgenome2017.05.0043>.
- Crespo-Herrera, L. A., Crossa, J., Huerta-Espino, J., Autrique, E., Mondal, S., Velu, G., Vargas, M., Braun, H. J., & Singh, R. P. (2017). Genetic yield gains in CIMMYT'S international elite spring wheat yield trials by modeling the genotype x environment interaction. *Crop Science*, 57(2), 789-801. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.06.0553>.
- De la Fuente-González, M. C., & González-Urbina, J. A. (2016). Evaluación de impacto del Mejoramiento Genético de Trigo del INIA período (1997 - 2012). *Boletín INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias* N° 319,1–414.
- Del Pozo, A., Matus, I., Serret, M. D., & Araus, J. L. (2014). Agronomic and physiological traits associated with breeding advances of wheat under high-productive Mediterranean conditions. The case of Chile. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.016>.
- Del Pozo, A., Matus, I., Ruf, K., Castillo, D., Méndez-Espinoza, A. M., & Serret, M. D. (2019). Genetic advance of durum wheat under high yielding conditions: The case of Chile. *Agronomy*, 9(8), 454. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080454>.
- Desheva, G., & Cholakov, T. (2014). Variability, heritability and genetic progress for some yield components in common winter wheat genotypes (*Triticum aestivum* L.). *Genetics and Plant Physiology*, 4(3-4), 191–200.
- Du, Y., Chen, L., Wang, Y., Yang, Z., & Saeed, I., Daoura, B. G., & Hu, Y. G. (2018). Field Crops Research The combination of dwarfing genes Rht4 and Rht8 reduced plant height , improved yield traits of rainfed bread wheat (*Triticum aestivum* L .). *Field Crops Research*, 215, 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.10.015>.
- Duan, T., Chapman, S. C., Guo, Y., & Zheng, B. (2017). Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research*, 210, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.025>.

- Duchemin, B., Maisongrande, P., Boulet, G., & Benhadj, I. (2008). A simple algorithm for yield estimates: Evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index. *Environmental Modelling and Software*, 23(7), 876–892. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.10.003>.
- Engler, A., & del Pozo, A. (2013). Assessing long- and short-term trends in cereal yields: the case of Chile between 1929 and 2009. *Cien. Inv. Agr.* 40(1), 55–67. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 40(1), 55-68 <https://doi.org/10.4067/S0718-16202013000100005>.
- FAOSTAT. (2019). FAOSTAT Statistics Database. In FAOSTAT Statistics Database - Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.1002/embj.201488027>.
- Ferrante, A., Cartelle, J., Savin, R., & Slafer, G. A. (2017). Yield determination, interplay between major components and yield stability in a traditional and a contemporary wheat across a wide range of environments. *Field Crops Research*. 203, 114-127. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.028>.
- Fischer, R. (1983). Growth and Yield of Field Crops (Wheat). In *Symposium on Potential Productivity of Field Crops Under Different Environments*. http://books.irri.org/9711041146_content.pdf.
- Fischer, R. A. (2007). Understanding the physiological basis of yield potential in wheat. *The Journal of Agricultural Science*, 145(2), 99–113. <https://doi.org/10.1017/S0021859607006843>.
- Fischer, R. A. (2008). The importance of grain or kernel number in wheat: A reply to Sinclair and Jamieson. *Field Crops Research*, 105(1-2), 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.04.002>.
- Fischer, R., Byerlee, D., & Edmeades, G. (2009). *Can technology deliver on the yield challenge to 2050?* (No. 138-2016-2032).
- Fischer, R. A. (2011). Wheat physiology: A review of recent developments. *Crop and Pasture Science*, 62(2), 95–114. <https://doi.org/10.1071/CP10344>.
- Fischer, R. A., Byerlee, D., & Edmeades, G. (2014). *Crop yields and global food security*. ACIAR: Canberra, ACT, 8-11.
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., ... & Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>.
- Foulkes, M. J., Snape, J. W., Shearman, V. J., Reynolds, M. P., Gaju, O., & Sylvester-Bradley, R. (2007). Genetic progress in yield potential in wheat: Recent advances and future prospects. *The Journal of Agricultural Science*, 145(1), 17–29. <https://doi.org/10.1017/S0021859607006740>.

- Foulkes, M. J., Reynolds, M. P., & Sylvester-bradley, R. (2009). Genetic Improvement of Grain Crops : Yield Potential. *Crop physiology: Applications for genetic improvement and agronomy* (No. CIS-5658. CIMMYT.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374431-9.00015-3>.
- Foulkes, M. J., Slafer, G. A., Davies, W. J., Berry, P. M., Sylvester-Bradley, R., Martre, P., Calderini, D. F., Griffiths, S., & Reynolds, M. P. (2011). Raising yield potential of wheat. III. Optimizing partitioning to grain while maintaining lodging resistance. *Journal of Experimental Botany*, *62*(2), 469–486. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq300>.
- Fu, Y. B. (2015). Understanding crop genetic diversity under modern plant breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, *128*(11), 2131-2142. <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2585-y>.
- Furbank, R. T., & Tester, M. (2011). Phenomics - technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in plant science*, *16*(12), 635–644. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.09.005>.
- Furbank, R. T., Jimenez-Berni, J. A., George-Jaeggli, B., Potgieter, A. B., & Deery, D. M. (2019). Field crop phenomics: enabling breeding for radiation use efficiency and biomass in cereal crops. *New Phytologist*, *223*(4), 1714-1727. <https://doi.org/10.1111/nph.15817>.
- Gaju, O., Allard, V., Martre, P., Le Gouis, J., Moreau, D., Bogard, M., Hubbart, S., & Foulkes, M. J. (2014). Nitrogen partitioning and remobilization in relation to leaf senescence, grain yield and grain nitrogen concentration in wheat cultivars. *Field Crops Research*, *155*, 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.003>.
- Gambín, B. L., & Borrás, L. (2010). Resource distribution and the trade-off between seed number and seed weight: A comparison across crop species. *Annals of Applied Biology*, *156*(1), 91-102. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00367.x>.
- Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummalu, N., & Christy, A. (2015). Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis - A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*, *57*, 1199–1210. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415>.
- Gao, F., Ma, D., Yin, G., Rasheed, A., Dong, Y., Xiao, Y., Xia, X., Wu, X., & He, Z. (2017). Genetic progress in grain yield and physiological traits in Chinese wheat cultivars of southern Yellow and Huai Valley since 1950. *Crop Science*, *57*(2), 760–773. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.05.0362>.
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., ... & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, *327*(5967), 812–818. <https://doi.org/10.1109/CIS.2016.52>.
- Gong, Y. H., Zhang, J., Gao, J. F., Lu, J. Y., & Wang, J. R. (2005). Slow export of photoassimilate from stay-green leaves during late grain-filling stage in hybrid winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, *191*(4), 292–299. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2005.00173.x>.

- Grassini, P., Eskridge, K. M., & Cassman, K. G. (2013). Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. *Nature Communications*, 4,(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/ncomms3918>.
- Graybosch, R. A., & Peterson, C. J. (2010). Genetic improvement in winter wheat yields in the Great Plains of North America, 1959-2008. *Crop Science*, 50(5), 1882-1890. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.11.0685>.
- Gregersen, P. L., Culetic, A., Boschian, L., & Krupinska, K. (2013). Plant senescence and crop productivity. *Plant Molecular Biology*, 82(6), 603–622. <https://doi.org/10.1007/s11103-013-0013-8>.
- Guo, Z., Slafer, G. A., & Schnurbusch, T. (2016). Genotypic variation in spike fertility traits and ovary size as determinants of floret and grain survival rate in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 67(14), 4221–4230. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw200>.
- Hipps, L. E. (1983). Assessing the Interception of Photosynthetically. *Agricultural Meteorology*, 28(82), 253–259.
- Heisey, P., & Day-Rubenstein, K. (2015). Using Crop Genetic Resources to Help Agriculture Adapt to Climate Change: economics and policy. *USDA-ERS Economic Information Bulletin*, (139). <https://doi.org/10.2139/ssrn.2709190>.
- Hulme, M. F., Vickery, J. A., Green, R. E., Phalan, B., Chamberlain, D. E., Pomeroy, D. E., Nalwanga, D., Mushabe, D., Katebaka, R., Bolwig, S., & Atkinson, P. W. (2013). Conserving the Birds of Uganda’s Banana-Coffee Arc: Land Sparing and Land Sharing Compared. *PLoS one*, 8(2), e54597. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054597>.
- Hunter, M. C., Smith, R. G., Schipanski, M. E., Atwood, L. W., & Mortensen, D. A. (2017). Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification. *BioScience*, 67(4), 386–391. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>.
- Jia, Y., & Jannink, J. L. (2012). Multiple-trait genomic selection methods increase genetic value prediction accuracy. *Genetics*, 192(4), 1513–1522. <https://doi.org/10.1534/genetics.112.144246>.
- Jobet, C., & Hewstone, C. (2003). Kumpa-INIA: New winter wheat variety for Southern Chile. *Agricultura Técnica*, 63(1), 81–86.
- Jobet, C., Matus, I., Madariaga, R., Campillo, R., Zuñiga, J., Mejías, J., & Garcia, J. C. (2015). Konde INIA: first doubled haploid winter wheat cultivar for southern Chile. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences, Ex Agro-Ciencia*, 31(3), 234-238.
- Jobet, C., Madariaga, R., Matus, I., Campillo, R., & Zuñiga, J. (2017). Maxwell: El Cultivar De Trigo Que Ha Superado Las Barreras Productivas En El Sur De Chile. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 33(1), 39–44. <https://doi.org/10.4067/s0719-38902017000100105>.

- Kichey, T., Hirel, B., Heumez, E., Dubois, F., & Le Gouis, J. (2007). In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers. *Field Crops Research*, 102(1), 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.01.002>.
- Khoury, C. K., Bjorkman, A. D., Dempewolf, H., Ramirez-Villegas, J., Guarino, L., Jarvis, A., Rieseberg, L. H., & Struik, P. C. (2014). Increasing homogeneity in global food supplies and the implications for food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(11), 4001–4006. <https://doi.org/10.1073/pnas.1313490111>.
- Laidig, F., Piepho, H. P., Rentel, D., Drobek, T., Meyer, U., & Huesken, A. (2017). Breeding progress, environmental variation and correlation of winter wheat yield and quality traits in German official variety trials and on-farm during 1983–2014. *Theoretical and Applied Genetics*, 130(1), 223–245. <https://doi.org/10.1007/s00122-016-2810-3>.
- Lantican, M. A., Dubin, H. J., & Morris, M. L. (2005). *Impacts of international wheat breeding research in the developing world, 1988-2002*, Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo (CIMMYT).
- Lee, E. A., & Tollenaar, M. (2007). Physiological basis of successful breeding strategies for maize grain yield. *Crop Science*, 47, S-202. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.04.0010IPBS>.
- Lephuthing, M. C., Baloyi, T. A., Sosibo, N. Z., & Tsilo, T. J. (2017). Progress and Challenges in Improving Nutritional Quality in Wheat. *Wheat Improvement, Management and Utilization*, 345.
- Li, K., Yang, X., Liu, Z., Zhang, T., Lu, S., & Liu, Y. (2014). Low yield gap of winter wheat in the North China Plain. *European Journal of Agronomy*, 59, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.04.007>.
- Lo Valvo, P. J., Miralles, D. J., & Serrago, R. A. (2018). Genetic progress in Argentine bread wheat varieties released between 1918 and 2011: Changes in physiological and numerical yield components. *Field Crops Research*, 221, 314-321. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.014>.
- Long, S. P., Zhu, X. G., Naidu, S. L., & Ort, D. R. (2006). Can improvement in photosynthesis increase crop yields?. *Plant, cell & environment*, 29(3), 315-330. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01493.x>.
- Lopes, M. S., Reynolds, M. P., Manes, Y., Singh, R. P., Crossa, J., & Braun, H. J. (2012). Genetic yield gains and changes in associated traits of CIMMYT spring bread wheat in a “Historic” set representing 30 years of breeding. *Crop Science*, 52(3), 1123-1131. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.09.0467>.
- Lopes, M. S., & Reynolds, M. P. (2012). Stay-green in spring wheat can be determined by spectral reflectance measurements (normalized difference vegetation index) independently from

phenology. *Journal of experimental botany*, 63(10), 3789-3798.
<https://doi.org/10.1093/jxb/ers071>.

Lopes, M. S., Saglam, D., Ozdogan, M., & Reynolds, M. (2014). Traits associated with winter wheat grain yield in Central and West Asia. *Journal of Integrative Plant Biology*, 56(7), 673–683.
<https://doi.org/10.1111/jipb.12172>.

Mackay, I., Horwell, A., Garner, J., White, J., McKee, J., & Philpott, H. (2011). Reanalyses of the historical series of UK variety trials to quantify the contributions of genetic and environmental factors to trends and variability in yield over time. *Theoretical and Applied Genetics*, 122(1), 225-238. <https://doi.org/10.1007/s00122-010-1438-y>.

Magney, T. S., Eitel, J. U. H., Huggins, D. R., & Vierling, L. A. (2016). Proximal NDVI derived phenology improves in-season predictions of wheat quantity and quality. *Agricultural and Forest Meteorology*, 217, 46–60. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.009>.

Maich, R. H., & Di Rienzo, J. A. (2014). Genotype × tillage interaction in a recurrent selection program in wheat. *Cereal Research Communications*, 42(3), 525–533.
<https://doi.org/10.1556/CRC.2013.0069>.

Man, J., Yu, Z., & Shi, Y. (2017). Radiation Interception, Chlorophyll Fluorescence and Senescence of Flag leaves in Winter Wheat under Supplemental Irrigation. *Scientific Reports*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07414-2>.

Marti, J., Bort, J., Slafer, G. A., & Araus, J. L. (2007). Can wheat yield be assessed by early measurements of Normalized Difference Vegetation Index?. *Annals of Applied Biology*, 150(2) 253-257. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00126.x>.

Matus, I., Mellado, M., Pinares, M., Madariaga, R., & Del Pozo, A. (2012). Genetic progress in winter wheat cultivars released in Chile from 1920 to 2000. *Chilean Journal of agricultural research*, 72(3), 303–308. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392012000300001>.

Mellado, M. (2007). *El trigo en Chile: Cultura, ciencia y tecnología*. Colección Libros INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Quilamapu.

Mera, M., Lizana, X. C., & Calderini, D. F. (2015). Cropping systems in environments with high yield potential of southern Chile. In *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy: Second Edition*. (pp. 111-140). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00006-6>

Miralles, D. J., & Slafer, G. A. (2007). Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced?. *Journal of Agricultural Science*, 2007, vol. 145, núm. 2 p. 139-149.
<https://doi.org/10.1017/S0021859607006843>.

Miralles, D., González, F., Abeledo, L., Serrago, R., Alzueta, I., & García, G. (2014). Manual De Trigo Y Cebada Para El Cono Sur: procesos fisiológicos y bases de manejo. 56 p. *Orientación Gráfica, Buenos Aires, Argentina*.

- Molero, G., Joynson, R., Pinera-Chavez, F. J., Gardiner, L. J., Rivera-Amado, C., Hall, A., & Reynolds, M. P. (2019). Elucidating the genetic basis of biomass accumulation and radiation use efficiency in spring wheat and its role in yield potential. *Plant Biotechnology Journal*, 17(7), 1276-1288. <https://doi.org/10.1111/pbi.13052>.
- Montazeaud, G., Karatoğma, H., Öztürk, I., Roumet, P., Ecartot, M., Crossa, J., Özer, E., Özdemir, F., & Lopes, M. S. (2016). Predicting wheat maturity and stay-green parameters by modeling spectral reflectance measurements and their contribution to grain yield under rainfed conditions. *Field Crops Research*, 196, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.06.021>.
- Monteith, J. L., & Moss, C. J. (1977). Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(980), 277–294. <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>.
- Moriondo, M., Maselli, F., & Bindi, M. (2007). A simple model of regional wheat yield based on NDVI data. *European Journal of Agronomy*, 26(3), 266-274. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.10.007>.
- Mwadzingeni, L., Shimelis, H., & Tsilo, T. J. (2018). Combining ability and gene action controlling yield and yield components in bread wheat (*Triticum aestivum* L) under drought-stressed and nonstressed conditions. *Plant Breeding*, 137(4), 502-513. <https://doi.org/10.1111/pbr.12609>.
- Odepa. (2020). Presentación de la Comisión nacional del trigo. Reunión Comité de Comercialización, 24. <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2020/07/Presentacion-RCCT-27.05.2020.pdf>
- Pask, A. J. D., Pietragalla, J., Mullan, D. M., & Reynolds, M. P. (2012). *Physiological breeding II: a field guide to wheat phenotyping*. In Alistair J.D. Pask, J. Pietragalla, D. Mullan, & M. Reynolds (Eds.), Cimmyt.
- Peltonen-Sainio, P., Kangas, A., Salo, Y., & Jauhiainen, L. (2007). Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: Evidence based on 30 years of multi-location trials. *Field Crops Research*, 100(2–3), 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.002>.
- Phalan, B., Balmford, A., Green, R. E., & Scharlemann, J. P. W. (2011). Minimising the harm to biodiversity of producing more food globally. *Food Policy*, 36, S62-S71. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.008>.
- Pingali, P. L. (2001). *Milestones in impact assessment research in the CGIAR, 1970-1999*. CIMMYT. http://www.cimmyt.org/Research/economics/map/impact_studies/milestones/pdfs/milestones.pdf

- Pradhan, P., Fischer, G., Van Velthuis, H., Reusser, D. E., & Kropp, J. P. (2015). Closing yield gaps: How sustainable can we be?. *PLoS one*, *10*(6) e0129487. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129487>.
- Qin, X., Zhang, F., Liu, C., Yu, H., Cao, B., Tian, S., Liao, Y., & Siddique, K. H. M. (2015). Wheat yield improvements in China: Past trends and future directions. *Field Crops Research*, *177*, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.013>.
- Rahman, M. M., Lamb, D. W., & Samborski, S. M. (2019). Reducing the influence of solar illumination angle when using active optical sensor derived NDVIAOS to infer fAPAR for spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Computers and Electronics in Agriculture*, *156*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.007>.
- Rajaram, S., Van Ginkel, M., & Fischer, R. A. (1993). CIMMYT's wheat breeding mega-environments (ME). *In Proceedings of the 8th International wheat genetic symposium* (pp. 19-24).
- Ramos Garmiño, F. (2013). *Maíz, trigo y arroz: Los cereales que alimentan al mundo* (No. 5). Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://eprints.uanl.mx/3649/1/maiztrigoarroz.pdf>.
- Rawson, H. M., & Macpherson, H. G. (2001). *Trigo regado: Manejo del cultivo* (No. Sirsi) i9789253044887). FAO
- Ray, D. K., Ramankutty, N., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley, J. A. (2012). Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nature Communications*, *3*(1), 1293–1297. <https://doi.org/10.1038/ncomms2296>.
- Reynolds, M., Foulkes, M. J., Slafer, G. A., Berry, P., Parry, M. A. J., Snape, J. W., & Angus, W. J. (2009). Raising yield potential in wheat. *Journal of experimental botany*, *60*(7), 1899–1918. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp016>.
- Reynolds, M., Bonnett, D., Chapman, S. C., Furbank, R. T., Manés, Y., Mather, D. E., & Parry, M. A. J. (2011). Raising yield potential of wheat. I. Overview of a consortium approach and breeding strategies. *Journal of Experimental Botany*, *62*(2), 439–452. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq311>.
- Reynolds, M. P., Pask, A. J. D., & Mullan, D. M. (2012a). *Physiological Breeding I: Interdisciplinary approaches to improve crop adaptation* (CIMMYT).
- Reynolds, M., Foulkes, J., Furbank, R., Griffiths, S., King, J., Murchie, E., Parry, M., & Slafer, G. (2012b). Achieving yield gains in wheat. *Plant, cell & environment*, *35*(10), 1799–1823. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02588.x>.
- Richards, R. A. (1992). The effect of dwarfing genes in spring wheat in dry environments. I. Agronomic characteristics. *Australian Journal of Agricultural Research*, *43*(3), 517–527. <https://doi.org/10.1071/AR9920517>.

- Richards, R. A. (2006). Physiological traits used in the breeding of new cultivars for water-scarce environments. *Agricultural water management*, 80(1-3), 197–211. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.013>.
- Richards, R. A., Cavanagh, C. R., & Riffkin, P. (2019). Selection for erect canopy architecture can increase yield and biomass of spring wheat. *Field Crops Research*, 244, 107649. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107649>.
- Robles-Zazueta, C. A., Molero G., Pinto, F., Foulkes, M. J., Reynolds, M. P., & Murchie, E. H. (2021). Field based remote sensing models predict radiation use efficiency in wheat. *Journal of Experimental Botany*. <http://dx.doi.org/10.1080/07853890.2020.1840620>.
- Rutkoski, J., Poland, J., Mondal, S., Autrique, E., Pérez, L. G., Crossa, J., Reynolds, M., & Singh, R. (2016). Canopy temperature and vegetation indices from high-throughput phenotyping improve accuracy of pedigree and genomic selection for grain yield in wheat. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 6(9), 2799–2808.
- Sadras, V. O., & Lawson, C. (2011). Genetic gain in yield and associated changes in phenotype, trait plasticity and competitive ability of South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *Crop and Pasture Science*, 62(7), 533–549. <https://doi.org/10.1071/CP11060>.
- Sadras, V. O., & Slafer, G. A. (2012). Environmental modulation of yield components in cereals: Heritabilities reveal a hierarchy of phenotypic plasticities. *Field Crops Research*, 127, 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.014>.
- Sadras, V. O., & Calderini, D. F. (2015). *breeding and agronomy Crop physiology: applications for breeding and agronomy*. In *Crop Physiology* (Second Edi, Issue 2012). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6/00001-7>.
- Sinclair, T. R., & Muchow, R. C. (1999). Radiation Use Efficiency. *Advances in Agronomy*, 65, 215–265.
- Sakuraba, Y., Park, S. Y., & Paek, N. C. (2015). The divergent roles of STAYGREEN (SGR) Homologs in chlorophyll degradation. *Molecules and Cells*, 38(5), 390–395. <https://doi.org/10.14348/molcells.2015.0039>.
- Sharma, R. C., Tiwary, A. K., & Ortiz-Ferrara, G. (2008). Reduction in kernel weight as a potential indirect selection criterion for wheat grain yield under terminal heat stress. *Plant Breeding*, 127(3), 241–248. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2007.01460.x>.
- Shearman, V. J., Scott, R. K., & Foulkes, M. J. (2005). CROP PHYSIOLOGY & METABOLISM Physiological Processes Associated with Wheat Yield Progress in the UK. *Crop science*, 45(1), 175-185.
- Shewry, P. R., & Hey, S. J. (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*, 4(3), 178–202.

- Slafer, G. A., Araus, J. L., & Richards, R. A. (1999). Physiological traits that increase the yield potential of wheat. *Wheat: ecology and physiology of yield determination.*, 379-415.
- Slafer, G. A. (2003). Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. *Annals of Applied Biology*, 142(2), 117–128. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2003.tb00237.x>.
- Slafer, G. A., Savin, R., & Sadras, V. O. (2014). Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Research*, 157, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.004>.
- Slafer, G. A., Elia, M., Savin, R., García, G. A., Terrile, I. I., Ferrante, A., Miralles, D. J., & González, F. G. (2015). Fruiting efficiency: An alternative trait to further rise wheat yield. *Food and Energy Security*, 4(2), 92-109. <https://doi.org/10.1002/fes3.59>.
- Spano, G., Di Fonzo, N., Perrotta, C., Platani, C., Ronga, G., Lawlor, D. W., Napier, J. A., & Shewry, P. R. (2003). Physiological characterization of “stay green” mutants in durum wheat. *Journal of Experimental Botany*. 54(386), 1415-1420. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg150>.
- Stapper, M., & Fischer, R. A. (1990). Genotype, sowing date and plant spacing influence on high-yielding irrigated wheat in southern New South Wales. III.* Potential yields and optimum flowering dates. *Australian Journal of Agricultural Research*, 41(6), 1021-1041. <https://doi.org/10.1071/AR9901043>.
- Steltzer, H., & Welker, J. M. (2006). Modeling the effect of photosynthetic vegetation properties on the NDVI-LAI relationship. *Ecology*, 87(11), 2765–2772. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2006\)87\[2765:MTEOPV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2006)87[2765:MTEOPV]2.0.CO;2).
- Sun, Y., Wang, X., Wang, N., Chen, Y., & Zhang, S. (2014). Changes in the yield and associated photosynthetic traits of dry-land winter wheat (*Triticum aestivum* L.) from the 1940s to the 2010s in Shaanxi Province of China. *Field Crops Research*, 167, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.002>.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology*. Sinauer. Inc., Sunderland, MA.
- Tang, Y., Wu, X., Li, C., Yang, W., Huang, M., Ma, X., & Li, S. (2017). Yield, growth, canopy traits and photosynthesis in high-yielding, synthetic hexaploid-derived wheats cultivars compared with non-synthetic wheats. *Crop and Pasture Science*, 68(2), 115–125. <https://doi.org/10.1071/CP16072>.
- Tester, M., & Langridge, P. (2010). Breeding Technologies to Increase crop production in a changing world. *Science*, 327(5967), 818-822 <https://doi.org/10.1126/science.1183700>.
- Tang, Y., Wu, X., Li, C., Yang, W., Huang, M., Ma, X., & Li, S. (2017). Yield, growth, canopy traits and photosynthesis in high-yielding, synthetic hexaploid-derived wheats cultivars compared with non-synthetic wheats. *Crop and Pasture Science*, 68(2), 115–125. <https://doi.org/10.1071/CP16072>.

- Thomas, H., & Howarth, C. J. (2000). Five ways to stay green. *Journal of Experimental Botany*, 51(suppl_1), 329–337. https://doi.org/10.1093/jexbot/51.suppl_1.329.
- Thomas, H., & Ougham, H. (2014). The stay-green trait. *Journal of Experimental Botany*, 65(14), 3889–3900. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru037>.
- Tian, Z., Jing, Q., Dai, T., Jiang, D., & Cao, W. (2011). Effects of genetic improvements on grain yield and agronomic traits of winter wheat in the Yangtze River Basin of China. *Field Crops Research*, 124(3), 417–425. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.07.012>.
- Tottman, D. R., Makepeace, R. J., & Broad, H. (1979). An explanation of the decimal code for the growth stages of cereals, with illustrations. *Annals of Applied Biology*, 93(2), 221–234.
- Vicentini, F., Hörtensteiner, S., Schellenberg, M., Thomas, H., & Matile, P. (1995). Chlorophyll breakdown in senescent leaves identification of the biochemical lesion in a stay-green genotype of *Festuca pratensis* Huds. *New Phytologist*, 129(2), 247–252. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb04294.x>.
- Vijayalakshmi, K., Fritz, A. K., Paulsen, G. M., Bai, G., Pandravada, S., & Gill, B. S. (2010). Modeling and mapping QTL for senescence-related traits in winter wheat under high temperature. *Molecular Breeding*, 26(2), 163–175. <https://doi.org/10.1007/s11032-009-9366-8>.
- Wu, W., Li, C., Ma, B., Shah, F., Liu, Y., & Liao, Y. (2014). Genetic progress in wheat yield and associated traits in China since 1945 and future prospects. *Euphytica*, 196(2), 155–168. <https://doi.org/10.1007/s10681-013-1033-9>.
- Xiaoyan, Z., & Zheming, S. (1994). Evolutionary changes and future prospects in characters of wheat cultivars in Central Shaanxi Plain. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 14(4), 295–302.
- Yang, J., & Zhang, J. (2006). Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytologist*, 169(2), 223–236. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01597.x>.
- Xiao, Y. G., Qian, Z. G., Wu, K., Liu, J. J., Xia, X. C., Ji, W. Q., & He, Z. H. (2012). Genetic gains in grain yield and physiological traits of winter wheat in Shandong Province, China, from 1969 to 2006. *Crop Science*, 52(1), 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.011>.
- Yao, Y., Lv, L., Zhang, L., Yao, H., Dong, Z., Zhang, J., ... & Wang, H. (2019). Genetic gains in grain yield and physiological traits of winter wheat in Hebei Province of China, from 1964 to 2007. *Field Crops Research*, 239, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.011>.
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415–421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>.
- Zapata T., C., Silva C., P., & Acevedo H., E. (2004). Comportamiento De Isolíneas De Altura En Relación Con El Rendimiento Y Distribución De Asimilados En Trigo. *Agricultura Técnica*, 64(2), 139–155. <https://doi.org/10.4067/s0365-28072004000200003>.

- Zheng, T. C., Zhang, X. K., Yin, G. H., Wang, L. N., Han, Y. L., Chen, L., Huang, F., Tang, J. W., Xia, X. C., & He, Z. H. (2011). Genetic gains in grain yield, net photosynthesis and stomatal conductance achieved in Henan Province of China between 1981 and 2008. *Field Crops Research*, 122(3), 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.03.015>.
- Zhou, Y., He, Z. H., Sui, X. X., Xia, X. C., Zhang, X. K., & Zhang, G. S. (2007). Genetic improvement of grain yield and associated traits in the Northern China Winter Wheat Region from 1960 to 2000. *Crop Science*, 47(1), 245–253. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.03.0175>.
- Zhou, B., Elazab, A., Bort, J., Sanz-Sáez, A., Nieto-Taladriz, M. T., Serret, M. D., & Araus, J. L. (2016). Agronomic and physiological responses of Chinese facultative wheat genotypes to high-yielding Mediterranean conditions. *The journal of Agricultural Science*, 154(5), 870–889. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000817>.
- Zhuang, Q. S. (2003). Chinese wheat improvement and pedigree analysis. Chinese.) *China Agriculture Press, Beijing, China*.