

Nitrógeno y azufre en cebada cervecera: efecto sobre las brechas de rendimiento y calidad

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,
Área Ciencias Agropecuarias*

Federico Manuel Gómez
Ingeniero Agrónomo
Universidad de Buenos Aires - 2016

Director: Flavio Hernán Gutiérrez Boem
Co-directora: Leonor Gabriela Abeledo

Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes
INBA-CONICET
Facultad de Agronomía
Universidad de Buenos Aires



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Flavio Hernán Gutiérrez Boem

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor of Philosophy (University of Kentucky)

Co-director

Leonor Gabriela Abeledo

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)

Doctora en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO DE TESIS

JURADO

Walter Daniel Carciochi

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO

Jorge Luis Mercau

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Magister scientiae en Recursos Naturales (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

Juan Pablo Monzon

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Doctor en Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Fecha de defensa de la tesis: 10/04/2023

DEDICATORIA

A mis padres y abuelos

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que de manera directa o indirecta colaboraron para la realización de esta tesis, los cuales menciono a continuación.

Antes que nada, agradecer a mi comité consejero. A Flavio Gutiérrez-Boem y a Gabriela Abeledo, por haberme brindado la oportunidad de trabajar con ellos, por el acompañamiento y la paciencia otorgada. Quiero agradecer también a Pablo Prystupa que, si bien no formó parte del comité, trabajó a la par de sus miembros.

A los responsables de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes y al INBA, lugares donde permitieron desarrollar mi trabajo: Roberto Álvarez y Gerardo Rubio.

A la Cátedra de Microbiología Agrícola, que me permitió acceder libremente al agua destilada de forma de mantener el flujo de procesamiento de muestras en el laboratorio durante las noches oscuras de destiladores quemados: Olga Correa, Carla Caputo, Victoria Criado, Mariela Echeverría, Matias Vinacour y Jimena Vogrig.

Al INTA Bordenave, que a partir de los vínculos formados permitieron llevar adelante las determinaciones de variables de calidad industrial: Verónica Conti, Federico Moreyra y Fernando Giménez.

A los integrantes de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes y becarios que pasaron por allí, quienes presentaron siempre una buena predisposición a colaborar, me acompañaron, aconsejaron y aguantaron durante este tiempo: Helena, Haydeé, Carina, Vanina, Patricia, Cecilia, Mónica, Raúl, Agustina, Daniela y Lorena. En especial a Ana Muzlera y Sonia Cabrera, con quienes compartimos mates y charlas varias.

A Matías Schrauf, gran amigo y compañero de cata de parrillas, de discusión de datos, trabajos, metodologías estadísticas y la vida misma.

A María Caffaro, quien me acompañó durante el desarrollo de mi tesis, capacitó y colaboró en el laboratorio y ayudó tanto en viajes de muestreo como en el procesamiento de muestras. Además, las charlas, mates y tiempo compartidos.

A José Boero y Florencia Galotta, quienes colaboraron con los muestreos durante la experimentación. A Sebastián Bavestrello, quien me ayudó con la trilla de muestras en momentos complicados. A Nahuel Reussi Calvo por la predisposición a colaborar a través del intercambio de información y de las determinaciones realizadas en muestras de suelo. A Guillermo García por compartir su experiencia con la utilización del modelo de simulación Apsim.

A los productores agropecuarios y asesores, quienes colaboraron con nosotros durante la experimentación: G. Herrá (Nutrien Ag Solutions), A. Alegre, C. Gutiérrez, E. Secreto, G. Franco, M. Sabbione, J. Álvarez, N. Casella, S. Arias, R. Falconi, G. Longinotti, I. Alzueta, P. Laffan, E. Marré, R. Carral, J. Gotta.

A CONICET y UBA por el financiamiento otorgado, con el cual pude realizar esta tesis.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia y a mis amigxs, por el apoyo irrestricto e incondicional brindado.

DECLARACIÓN

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

Federico Manuel Gómez

PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTA TESIS

Gómez, F.M., Prystupa, P., Boero, J.J., Gutiérrez-Boem, F.H. 2021. Sulfur partitioning and grain concentration differed from that for nitrogen in malting barley. *Field Crops Research*, 263: 108053. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108053>.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE CUADROS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ABREVIATURAS.....	xx
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
CAPÍTULO 1. Introducción general.....	23
1.1. Planteo del problema y revisión de antecedentes.....	24
1.1.1. Cebada cervecera en la región pampeana: el rol del N y el S.....	24
1.1.2. Brecha de rendimiento y proteína por nutrición (N y S).....	25
1.1.3. Absorción, partición, removilización y concentración de N y S en granos.....	31
1.1.4. Calidad industrial y la relación N:S en granos.....	35
1.2. Objetivos e hipótesis.....	37
1.3 Estructura de la tesis.....	38
CAPÍTULO 2. Brecha de rendimiento y proteína debido a N y S en el centro-norte de Buenos Aires.....	39
2.1. Introducción.....	40
2.2. Materiales y métodos.....	42
2.2.1. Experimentos a campo.....	42
2.2.2. Mediciones.....	43
2.2.3. Modelo de simulación.....	44
2.2.4. Cálculo de brechas y variables complementarias.....	47
2.2.5. Análisis de datos.....	49
2.3. Resultados.....	50
2.3.1. Rendimiento en grano.....	50
2.3.1.1. Rendimiento en grano logrado y potencial.....	50
2.3.1.2. Brecha de rendimiento en grano y limitaciones por N y S.....	52
2.3.2. Proteína en grano.....	56
2.3.2.1. Proteína en grano lograda y potencial según la industria maltera.....	56
2.3.2.2. Brecha de proteína en grano y limitaciones por N y S.....	57
2.3.3. Relación entre rendimiento y proteína en grano.....	60
2.3.3.1. Relación entre proteína y rendimiento en grano.....	60
2.3.3.2. Brecha de rendimiento y de proteína en grano.....	60
2.4. Discusión.....	63
2.5. Conclusiones.....	69
CAPÍTULO 3. Partición a grano y removilización de N y S.....	70

3.1. Introducción.....	71
3.2. Materiales y métodos.....	73
3.2.1. Experimentos a campo.....	73
3.2.2 Mediciones.....	73
3.2.3 Análisis de datos.....	74
3.3. Resultados.....	75
3.3.1. N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano.....	75
3.3.2. Concentración de N y S en grano.....	78
3.3.3. Índice de cosecha de N y S.....	78
3.3.4 Removilización y eficiencia de removilización de N y S.....	80
3.3.5. Relación N:S en grano y estequiometría.....	81
3.4. Discusión.....	83
3.5. Conclusiones.....	86
CAPÍTULO 4. Relación N:S en grano y calidad maltera.....	87
4.1. Introducción.....	88
4.2. Materiales y métodos.....	89
4.2.1. Experimentos a campo.....	89
4.2.2. Rendimiento, calibre, concentración de N y S en grano.....	90
4.2.3. Micromalteo y análisis de malta.....	90
4.2.4. Cuantificación de hordeínas.....	91
4.2.5. Análisis de datos.....	91
4.3. Resultados.....	92
4.3.1. Relaciones N:S en grano.....	92
4.3.2. Extracto de malta.....	94
4.3.3. Friabilidad de malta.....	96
4.3.4. Tiempo de sacarificación.....	98
4.3.5. Tiempo de filtración.....	100
4.3.6. Hordeínas y relación N:S en grano.....	101
4.4. Discusión.....	106
4.5. Conclusiones.....	108
CAPÍTULO 5. Discusión general.....	110
5.1. Contexto de la problemática abordada.....	111
5.2. Aportes al conocimiento científico realizados en esta tesis.....	112

5.3. Aplicaciones prácticas derivadas a partir de la tesis.....	122
5.4. Interrogantes surgidos y futuras líneas de investigación.....	127
BIBLIOGRAFÍA.....	129
MATERIAL SUPLEMENTARIO.....	144

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Estadísticas de resumen de las dosis de fertilización nitrogenada y azufrada utilizada por los productores.....	43
Cuadro 2.1. Estadísticas de resumen de variables e índices asociados a rendimiento en grano.....	51
Cuadro 2.2. Estadísticas de resumen de variables e índices asociados a la concentración proteica de los granos.....	56
Cuadro 3.1. Estadísticas descriptivas.....	76
Cuadro 3.2. Parámetros ajustados a las funciones de borde superior (Q95), mediana (Q50) y de borde inferior (Q05) para la relación entre rendimiento y la cantidad de nutriente absorbido. Los valores entre paréntesis corresponden a los intervalos de confianza de los parámetros a un nivel de 95%.....	77
Cuadro 4.1. Estadísticas de resumen.....	93
Cuadro S.2.1. Parámetros del modelo modificados durante el proceso de calibración del cv. 'Andreia'.....	144
Cuadro S.2.2. Variables descriptivas de cada experimento.....	145
Cuadro S.2.3.1. Efecto del agregado de N, S e interacción N-S sobre el rendimiento en grano y la concentración proteica de los granos para cada experimento (Exp). Se indica la magnitud del efecto en caso de encontrarse diferencias (al nivel de significancia de $\alpha = 0.05$), caso contrario, se indica sólo el valor- <i>p</i>	152
Cuadro S.2.3.2. Contrastes entre tratamientos para los experimentos que presentaron interacción N-S para el rendimiento en grano y la concentración proteica de los granos. Se indica la magnitud del efecto en caso de encontrarse diferencias (al nivel de significancia de $\alpha = 0.05$), caso contrario, se indica sólo el valor- <i>p</i>	154
Cuadro S.2.4. Pendiente estimada, intervalo de confianza al 95 % (IC 95 %) y valor- <i>p</i> de la relación entre la concentración proteica y el rendimiento en grano en cada experimento. El valor- <i>p</i> corresponde a la evaluación de la hipótesis nula donde el valor de la pendiente es cero (nivel de significancia de $\alpha = 0.05$).....	155
Cuadro S.2.5. Parámetros estimados de las funciones de borde superior, mediana y de borde inferior ajustadas a la relación entre rendimiento en grano y la cantidad de N absorbido (RG90, RG50 y RG10) y a la relación lineal entre la concentración proteica en grano y la cantidad de N absorbido (GP90, GP50 y GP10).....	157
Cuadro S.3.2. Información de sitio, cultivar y fertilización realizada por el productor en los experimentos.....	159
Cuadro S.3.3. Modelos logarítmicos ajustados a través del método de ejes principales estandarizados (SMA) para la relación entre la cantidad de N absorbido y la cantidad de S absorbido, en grano y en biomasa aérea. Los valores entre paréntesis corresponden a los intervalos de confianza de los parámetros a un nivel de 95%.....	164
Cuadro S.4.2. Predictores lineales (η) y BIC de los modelos multinomiales ajustados para tiempo de sacarificación, en relación a la concentración proteica de granos, la relación N:S (como variable cuantitativa) y el calibre de granos. Para el ajuste de los modelos se consideró el conjunto de datos completo y el subconjunto correspondiente al rango de concentraciones proteicas en grano entre 9.5 y 13 %.....	165
Cuadro S.4.3. Predictores lineales (η) y BIC de los modelos ajustados que relacionaban el tiempo de filtración y los grupos de relaciones N:S en grano conformados. Para el ajuste de los modelos se consideró el conjunto de datos completo y el subconjunto correspondiente al rango de concentraciones proteicas en grano entre 9.5 y 13 %. El grupo 'N:S < 10.1' se consideró como nivel de referencia del factor (grupo) cuando se	

analizó el conjunto de datos completo, mientras que el nivel de referencia fue el grupo 'N:S 10.1-17.7' cuando se analizó el subconjunto. Los coeficientes ajustados para cada nivel expresan la diferencia respecto al nivel de referencia..... 165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Evolución en el tiempo de a) la superficie sembrada, b) la producción y c) el rendimiento en grano medio para cebada cervecera en Argentina durante el periodo 1990 a 2021 y para el subperiodo 2003 a 2021 (inserto en c). En c) la línea discontinua indica el punto de quiebre que separa los subperiodos de tiempo (i.e. año 2002) y las líneas rojas corresponden al rendimiento medio nacional de cada etapa (i.e. 2372 kg ha ⁻¹ durante 1990-2002 y 3541 kg ha ⁻¹ durante 2003-2021). El punto de quiebre se determinó utilizando el paquete strucchange en el software R (Zeileis et al., 2003). Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2023).....	25
Figura 1.2. Factores definitorios, limitantes y reductores del rendimiento de un cultivo anual. Adaptado en base a van Ittersum y Rabbinge (1997); Lobell et al. (2009); van Ittersum et al. (2013); Grassini et al. (2015); van Bussel et al. (2015) y Sadras et al. (2015). PAR: radiación fotosintéticamente activa, DPV: déficit de presión de vapor....	27
Figura 1.3. Esquema de rendimiento en grano esperado en cada uno de los tratamientos de los experimentos factoriales completos realizados y rendimientos en grano simulados (Yw y Yp). En el esquema se consideró que la respuesta del rendimiento en grano al agregado de N y S presenta interacción sinérgica (i.e. la aplicación de N y S en conjunto incrementa el rendimiento en grano por encima del incremento que provoca el agregado de estos nutrientes individualmente). Las líneas punteadas delimitan la brecha de rendimiento en grano estimada. WLI: índice de limitación hídrica sobre el rendimiento en grano. Las flechas dobles indican la magnitud de la limitación del rendimiento debido a S (flechas anaranjadas), a N (flechas verdes), a N y S en conjunto (flecha roja), a factores no contemplados en el diseño experimental (flecha negra) y a la disponibilidad hídrica (flecha violeta). Los factores no contemplados en los ensayos realizados hacen referencia a limitaciones impuestas por adversidades bióticas y abióticas no evaluadas en el diseño experimental (e.g. P y micronutrientes, enfermedades, plagas y malezas).....	30
Figura 1.4. Esquema de la concentración proteica en el grano esperada en cada uno de los tratamientos de los experimentos factoriales completos realizados. Se consideró que la respuesta de la concentración proteica de los granos sólo respondió al agregado de N (i.e. la aplicación S no modificaba la concentración proteica de los granos). Las líneas punteadas delimitan la brecha de proteína en grano estimada. Las flechas dobles indican la magnitud de la limitación de la concentración proteica de los granos debido a N (flechas verdes), a N y S en conjunto (flecha roja), a factores no contemplados en el diseño experimental (flecha negra). Los factores no contemplados en los ensayos realizados hacen referencia a limitaciones impuestas por adversidades bióticas y abióticas no evaluadas en el diseño experimental (e.g. P y micronutrientes, enfermedades, plagas y malezas). GPi corresponde al límite de referencia de concentración proteica en grano establecido (i.e. 11 %) en base al requerimiento promedio de la industria cervecera (i.e. 9.5 - 13 %).....	31
Figura 1.5. Esquema de la relación entre el rendimiento en grano y la cantidad de N absorbido por un cultivo.....	32
Figura 2.1. Mapa del centro norte de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Los símbolos rojos corresponden a los experimentos (combinación de sitio-año). Los símbolos amarillos refieren a las estaciones meteorológicas y a la localidad a la cual pertenecen.....	43
Figura 2.2. Evaluación del modelo de simulación Apsim Next Generation (versión 2021.1.20.5937) calibrado para el cv. ‘Andreia’ de cebada cervecera. a) Días a	

- floración, b) Rendimiento en grano. Los modelos lineales fueron ajustados a través de mínimos cuadrados ponderados (WLS, por sus siglas en inglés). Se indica el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio relativo (nRMSE) y el número de observaciones (n). Las líneas punteadas refieren a la relación 1:1 y las líneas discontinuas refieren a ± 5 y 20 % respecto a la relación 1:1, en a) y b), respectivamente. En b) cada símbolo corresponde al valor medio resultante de la combinación experimento-tratamiento y las barras verticales corresponden al error estándar.....45
- Figura 2.3. Precipitación acumulada y temperatura media para el periodo junio a noviembre en distintos años. Cada símbolo corresponde a un año. Los símbolos llenos refieren a los años en los que se realizaron los ensayos experimentales, los símbolos vacíos refieren a los restantes años de la serie en cada estación meteorológica. Las líneas discontinuas horizontales corresponden a la precipitación acumulada mediana, mientras que las líneas verticales indican las temperaturas medias medianas, correspondientes a la serie de años en cada estación meteorológica (Junín: 1995-2019, Nueve de Julio: 2003-2018, Pergamino: 1995-2019).....46
- Figura 2.4. Frecuencia relativa acumulada de rendimiento en grano logrado (Y_a), rendimiento en grano tratamiento '+N' (Y_N), rendimiento en grano potencial de secano (Y_w) y rendimiento en grano potencial (Y_p). La línea discontinua indica la probabilidad acumulada del 50 %. Y_a corresponde al rendimiento en grano obtenido por el productor en las combinaciones de sitio-año (i.e. experimentos), Y_w e Y_p fueron calculados mediante el modelo de simulación Apsim Next Generation (versión 2021.1.20.5937).. 52
- Figura 2.5. a) Frecuencia relativa acumulada de la brecha de rendimiento (Y_g), el índice de limitación del rendimiento en grano por disponibilidad hídrica (WLI), S ($Y-SLI$), N ($Y-NLI$) y N y S combinados ($Y-NSLI$). WLI se relativizó respecto a Y_p , mientras que Y_g , $Y-SLI$, $Y-NLI$ y $Y-NSLI$ fueron relativizados respecto a Y_w . b) Frecuencia relativa acumulada de la proporción de limitación del rendimiento en grano debida a N y S, atribuible a cada uno de estos nutrientes. La línea discontinua indica la probabilidad acumulada del 50 %. c) Relación entre los índices de limitación del rendimiento en grano por N o S y el rendimiento obtenido en cada lote. d) Relación entre los índices de limitación del rendimiento en grano por N o S y el rendimiento potencial en secano (Y_w). e) Relación entre el índice de limitación del rendimiento en grano por disponibilidad hídrica (WLI) y los índices de limitación del rendimiento en grano por N o S. Cada símbolo corresponde a la media de cada variable en cada experimento..... 54
- Figura 2.6. Relación entre el índice de limitación por N predicho a través del modelo de árboles de regresiones aleatorios (random forest) y a) la dosis de fertilización nitrogenada aplicada por el productor, b) el contenido de humedad del suelo a un metro de profundidad (mm), c) el contenido de materia orgánica en el estrato 0-20 cm. Relación entre el índice de limitación por S predicho a través del modelo de árboles de regresiones aleatorios (random forest) y d) el rendimiento obtenido en el tratamiento '+N', e) el contenido de humedad del suelo a un metro de profundidad (mm), f) el contenido de materia orgánica en el estrato 0-20 cm. Las curvas corresponden a las regresiones locales ajustadas (LOESS, por sus siglas en inglés). Los predichos obtenidos a partir del árbol de regresiones se calcularon en base a los efectos parciales (marginales) de las variables predictoras..... 55
- Figura 2.7. Frecuencia relativa acumulada de la concentración proteica en grano lograda por los productores (GPa) y la correspondiente al tratamiento '+N' (GP_N). La línea discontinua horizontal indica la probabilidad acumulada del 50 %. Las líneas verticales discontinuas corresponden a las concentraciones proteicas de 9.5 y 13 % (i.e. límite

- inferior y superior de los requerimientos de la industria), mientras que la línea sólida corresponde al requerimiento medio de la industria (i.e. GPi, 11 %). 57
- Figura 2.8. a) Frecuencia relativa acumulada de la brecha de proteína (GPg), el índice de limitación de la concentración proteica por S (GP-SLI), N (GP-NLI) y N y S combinados (GP-NSLI). b) Frecuencia relativa acumulada de la proporción de limitación de la concentración proteica de los granos debida a N y S, atribuible a cada uno de estos nutrientes. La línea discontinua indica la probabilidad acumulada del 50 %. c) Relación entre los índices de limitación por N y S y la concentración proteica obtenida en cada lote. d) Relación entre los índices de limitación de concentración proteica por N y S y el rendimiento en grano potencial en seco. e) Relación entre el índice de limitación del rendimiento en grano por disponibilidad hídrica (WLI) y los índices de limitación de concentración proteica en grano por N o S. Cada símbolo corresponde a la media de cada variable en cada experimento. 59
- Figura 2.9. a) Relación entre la concentración proteica y el rendimiento en grano. Las líneas corresponden a los ajustes lineales en cada experimento. Las líneas discontinuas azules refieren ajustes no significativos y las líneas sólidas rojas corresponden a los ajustes lineales significativos para un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. El valor- p y el R^2 corresponden al modelo lineal ajustado. b) Efecto de los tratamientos aplicados sobre los residuales de la relación proteína-rendimiento en grano. En b) letras distintas indican diferencias entre tratamientos (al nivel de significancia de $\alpha = 0.05$). 60
- Figura 2.10. a) Relación entre la brecha de proteína y la brecha de rendimiento de cada lote. La línea punteada corresponde a la relación 1:1. Los símbolos corresponden al valor medio de las variables en cada experimento. Relación entre b) el rendimiento y c) la concentración de proteína en grano con el nitrógeno absorbido por el cultivo a madurez. d) Relación entre el rendimiento y la concentración proteica en grano en condiciones medianas, y la cantidad de nitrógeno absorbido por el cultivo (RG50 y GP50). En b) las funciones esféricas ajustadas corresponden a los cuantiles 90, 50 y 10 % (funciones RG90, RG50 y RG10, respectivamente). Los símbolos sobre las funciones indican el punto donde se alcanza el rendimiento máximo (y la cantidad de N absorbida requerida para ello). En c) las funciones lineales ajustadas corresponden a los cuantiles 90, 50 y 10 % (funciones GP90, GP50 y GP10, respectivamente). Los símbolos sobre las funciones indican el punto donde se alcanza la una concentración proteica en grano del 11 % (y la cantidad de N absorbida requerida para ello). Las situaciones correspondientes a GP10 no alcanzaron la concentración proteica en grano del 11 %. En b) y c), los colores de los símbolos corresponden a los tratamientos aplicados. Los parámetros estimados de las funciones ajustadas se presentan en el cuadro S.2.5 del material suplementario. En d) la línea roja corresponde a la función RG50, mientras que la amarilla corresponde a la función GP50. En c) y d), la línea discontinua horizontal indica el requerimiento de concentración proteica en grano de referencia de la industria (i.e. GPi, 11 %). 62
- Figura 2.11. Relación entre el rendimiento y la concentración de proteína en grano (inserto) con el N absorbido por el cultivo a madurez. Los colores de los símbolos corresponden al 50 % de las observaciones con menor concentración proteica en grano (\leq GP50) (símbolos llenos) y al 50 % de las observaciones con mayor concentración proteica en grano ($>$ GP50) (símbolos vacíos). 63
- Figura 3.1. Relación entre el rendimiento en grano y a) la cantidad de nitrógeno absorbido, y b) la cantidad de azufre absorbido. El color de los símbolos indica el tratamiento. Las líneas llenas indican los modelos ajustados a cada cuantil (Q95: 95%, Q50: 50 % y Q05: 5 %). Los parámetros de los modelos ajustados a cada cuantil, para N

- y S, se muestran en el Cuadro 3.2. Cada símbolo corresponde al valor medio de cada combinación experimento-tratamiento..... 77
- Figura 3.2. Relación entre a) la concentración de nitrógeno en grano y la cantidad de nitrógeno absorbido por unidad de rendimiento en grano, b) la concentración de azufre en grano y la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano, c) el índice de cosecha de nitrógeno y la cantidad de nitrógeno absorbido por unidad de rendimiento en grano, d) el índice de cosecha de azufre y la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano. El color de los símbolos indica el tratamiento. Cada símbolo corresponde al valor medio de cada combinación experimento-tratamiento..... 79
- Figura 3.3. Relación entre a) la concentración de nitrógeno en grano relativa y la cantidad de nitrógeno absorbido por unidad de rendimiento en grano relativa, b) la concentración de azufre en grano relativa y la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano relativa, c) el índice de cosecha de nitrógeno relativo y la cantidad de nitrógeno absorbido por unidad de rendimiento en grano relativa, d) el índice de cosecha de azufre relativo y la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano relativa. La concentración de N y S en grano relativa es relativa al mínimo valor predicho para CNG y CSG, respectivamente. El índice de cosecha de N y S relativo es relativo al valor del plateau para el ICN y el ICS, respectivamente. La cantidad de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano relativa es relativa al valor mínimo observado de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano, respectivamente. Cada símbolo corresponde al valor medio relativo de cada combinación experimento-tratamiento..... 80
- Figura 3.4. Relación entre a) la cantidad de nitrógeno removilizado y la cantidad de nitrógeno absorbido en anthesis, b) la cantidad de azufre removilizado y la cantidad de azufre absorbido en anthesis. En a), símbolos y línea amarillos indican baja cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento en grano, símbolos y línea verdes indican alta cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento en grano. En b) símbolos y línea celeste indican baja cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento en grano, símbolos y línea anaranjados indican alta cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento en grano. La línea punteada corresponde a la línea 1:1. Las categorías de bajo y alto para la cantidad de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano corresponden a observaciones por debajo y por encima de la mediana de cada uno de estos nutrientes. Cada símbolo corresponde al valor medio de cada combinación experimento-tratamiento..... 81
- Figura 3.5. Relación entre la relación N:S en grano y a) la cantidad de nitrógeno absorbido por unidad de rendimiento en grano, b) la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano. El color de los símbolos indica el tratamiento. Ambas relaciones fueron significativas ($p < 0.05$). Cada símbolo corresponde al valor medio de cada combinación experimento-tratamiento..... 82
- Figura 3.6. Relación entre a) la cantidad de N absorbido en grano y la cantidad de S absorbido en grano, b) la cantidad de N absorbido en biomasa aérea y la cantidad de S absorbido en biomasa aérea. Diferentes modelos ajustados corresponden a diferencias entre grupos. Símbolos amarillos indican bajo N y bajo S absorbido por unidad de rendimiento en grano, símbolos anaranjados indican bajo N y alto S absorbido por unidad de rendimiento en grano, símbolos violetas indican alto N y alto S absorbido por unidad de rendimiento en grano. La línea negra sólida indica el modelo ajustado a estos tres grupos. Los símbolos y la línea verdes indican alto N y bajo S absorbido por unidad de rendimiento en grano. La línea punteada indica la línea 10:1. Los grupos se formaron por la combinación de las clases de N y S absorbido por unidad de rendimiento en

grano. Las categorías individuales de baja y alta cantidad de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano corresponden a las observaciones por debajo y por encima de la mediana de cada uno de estos nutrientes, respectivamente. Los modelos ajustados (en escala logarítmica, \log_{10}) y sus correspondientes parámetros y estadísticos se presentan en el Cuadro S.3.2 del material suplementario. Cada símbolo corresponde al valor medio de cada combinación experimento-tratamiento.....	83
Figura 4.1. a) Relación entre la concentración de N y la concentración de S en grano. b) Relación entre la relación N:S y la concentración proteica en grano. Los colores de los símbolos corresponden a los grupos de relación N:S en grano al cual pertenece cada situación o muestra. En a) las líneas punteadas corresponden a las funciones lineales por cuantiles ajustadas y se indican las distintas relaciones N:S en grano (pendientes de las funciones ajustadas).....	94
Figura 4.2. a) Relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos. b) Relación entre el extracto de malta y el calibre de los granos.....	94
Figura 4.3. a) Relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos, en todo el conjunto de datos. Los colores de los símbolos refieren a los grupos inter-cuantiles de relación N:S en grano. b) Curvas de frecuencia acumulada de extracto de malta, en el subconjunto de datos correspondiente al rango de concentración proteica en grano de 9.5 - 13 %. La línea sólida negra corresponde al ajuste para relaciones N:S < 10.1, la línea azul al ajuste para el rango de relaciones N:S 10.1 a 17.7 y la línea roja para las relaciones N:S en grano > 17.7. La línea discontinua corresponde a la probabilidad acumulada del 50 %. Los modelos ajustados son: i) N:S < 10.1: $y = 82.193 - 0.032x$ (línea negra); ii) N:S 10.1 - 17.7: $y = 85.759 - 0.470x$ (línea azul); iii) N:S > 17.7: $y = 84.443 - 0.463x$ (línea roja). El R^2 del modelo global es 0.43.....	96
Figura 4.4. a) Relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos. b) Relación entre la friabilidad de malta y el calibre de los granos. Los modelos ajustados corresponden al predictor lineal (η , ver materiales y métodos para más detalles).....	97
Figura 4.5. a) Relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos, en todo el conjunto de datos. Los colores de los símbolos refieren a los grupos inter-cuantiles de relación N:S en grano. b) Curvas de frecuencia acumulada de friabilidad de malta, en el subconjunto de datos correspondiente al rango de concentración proteica en grano de 9.5 - 13 %. La línea sólida negra corresponde al modelo ajustado para relaciones N:S < 10.1, la línea azul al modelo ajustado para el rango de relaciones N:S 10.1 a 17.7 y la línea roja al modelo ajustado para las relaciones N:S en grano > 17.7. La línea discontinua corresponde a la probabilidad acumulada del 50 %. Los modelos ajustados fueron: i) N:S < 10.1: $\eta = 3.708 + 0.009x$ (línea negra); ii) N:S 10.1 - 17.7: $\eta = 5.918 - 0.359x$ (línea azul); iii) N:S > 17.7: $\eta = 2.132 - 0.092x$ (línea roja). El R^2 del modelo global es 0.49. Los modelos ajustados corresponden al predictor lineal (i.e. η , ver materiales y métodos para más detalles).....	98
Figura 4.6. Probabilidad de ocurrencia de cada categoría de tiempo de sacarificación (en minutos), en relación a a) y d) la concentración proteica de los granos (%); b) y e) la relación N:S en grano (g N g S-1, como variable cuantitativa); c) y f) el calibre de los granos (%). El panel superior refiere a todo el conjunto de datos, mientras que el panel inferior refiere al subconjunto de datos correspondientes al rango de concentración proteica en grano de 9.5 - 13 %. El relleno del área de los gráficos corresponde a categorías de tiempo de sacarificación: el relleno vacío corresponde a 5 a 10 minutos, el gris a 10-15 minutos y el negro a 15 a 20 minutos. Las líneas verticales sobre el eje de abscisas representan las observaciones. Los modelos ajustados se presentan en el Cuadro S.4.1 del material suplementario.....	100

Figura 4.7. Probabilidad de ocurrencia de tiempo de filtración mayor a 60 minutos en distintos grupos de relación N:S en grano ($g N g S^{-1}$), a) en el conjunto de datos completo y b) en el subconjunto de datos correspondientes al rango de concentración proteica en grano de 9.5 - 13 %. Los círculos llenos indican el valor medio de probabilidad estimada y las barras verticales el intervalo de confianza de la misma. Los modelos ajustados se presentan en el Cuadro S.4.2 del material suplementario.....	101
Figura 4.8. a) Relación entre el contenido total de hordeínas y la concentración proteica de los granos. b) Relación entre la concentración de hordeínas-B y C y la concentración proteica de los granos. Los símbolos vacíos refieren a las hordeínas-B, mientras que los círculos llenos a las hordeínas-C. La línea punteada corresponde al modelo ajustado a las hordeínas-B, mientras que la línea sólida al modelo ajustado para las hordeínas-C. c) Relación entre la relación de hordeínas B:C y la concentración proteica de los granos. d) Relación entre la relación de hordeínas B:C y la relación N:S en grano.....	102
Figura 4.9. a) Relación entre la concentración de N en grano y la concentración de S en grano. La línea punteada corresponde a la relación N:S de 17.7 (i.e. pendiente de la función correspondiente al cuantil 72 %). b) Relación entre la cantidad de hordeínas-B y la cantidad de hordeínas-C. La línea punteada corresponde a la relación de hordeínas B:C de 1.2 (i.e. pendiente de la función correspondiente al cuantil 28 %). En a) los colores de los símbolos refieren a los grupos de relación N:S en grano. Los símbolos celestes corresponden a las observaciones de granos con relación N:S < 17.7 y los símbolos rojos corresponden a las observaciones de granos con relación N:S \geq 17.7. En b) los colores de los símbolos refieren a los grupos de relación de hordeínas B:C en grano. Los símbolos celestes corresponden a las observaciones de granos con relación de hordeínas B:C \geq 1.2 y los símbolos rojos corresponden a las observaciones de granos con relación de hordeínas B:C < 1.2.....	103
Figura 4.10. a) Relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos, según grupos de relación N:S en grano. b) Relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos, según grupos de relación de hordeínas B:C. c) Relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos, según grupos de relación N:S en grano. d) Relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos, según grupos de relación de hordeínas B:C. En a) y c) los colores de los símbolos refieren a los grupos de relación N:S en grano. Los símbolos celestes corresponden a las observaciones de granos con relación N:S < 17.7 y los símbolos rojos corresponden a las observaciones de granos con relación N:S \geq 17.7. En a) los modelos ajustados son: i) N:S < 17.7: $y = 84.758 - 0.436x$ (línea celeste); ii) N:S \geq 17.7: $y = 82.867 - 0.436x$ (línea roja). El R^2 para el modelo global es 0.58 y el BIC es 289.4. En c) los modelos ajustados son: i) N:S < 17.7: $\eta = 4.584 - 0.237x$ (línea celeste); ii) N:S \geq 17.7: $\eta = 3.244 - 0.237x$ (línea roja). El R^2 para el modelo global es 0.66 y el BIC es -188.9. En b) y d) los colores de los símbolos refieren a los grupos de relación de hordeínas B:C en grano. Los símbolos celestes corresponden a las observaciones de granos con relación de hordeínas B:C \geq 1.2 y los símbolos rojos corresponden a las observaciones de granos con relación de hordeínas B:C < 1.2. En b) los modelos ajustados son: i) B:C < 1.2: $y = 83.222 - 0.498x$ (línea roja); ii) B:C \geq 1.2: $y = 85.384 - 0.498x$ (línea celeste). El R^2 para el modelo global es 0.65 y el BIC es 276.9. En d) los modelos ajustados son: i) B:C < 1.2: $\eta = 5.229 - 0.445x$ (línea roja); ii) N:S \geq 1.2: $\eta = 6.494 - 0.445x$ (línea celeste). El R^2 para el modelo global es 0.69 y el BIC es -204.7. En c) y d) los modelos ajustados corresponden al predictor lineal (i.e. η , ver materiales y métodos para más detalles).....	105
Figura 5.1. Esquema de las interrelaciones entre las variables más relevantes evaluadas.	112

- Figura 5.2. Esquema de variables analizadas en el capítulo 2. Se presentan los valores medios de las brechas de rendimiento y proteína en grano. Además, se incluyó la relación entre el rendimiento y la concentración proteica en grano y la cantidad de N absorbido por el cultivo a madurez..... 115
- Figura 5.3. Esquema de relaciones evaluadas en el capítulo 3. Las líneas discontinuas corresponden a variables y/o procesos no evaluados. El tamaño de la flecha indica el nivel o grado que influencia de una variable sobre otra. En las relaciones evaluadas de mayor relevancia se adicionó la representación gráfica de los resultados..... 118
- Figura 5.4. Esquema de relaciones evaluadas en el capítulo 4. El tamaño de la flecha indica el nivel o grado que influencia de una variable sobre otra. En las relaciones evaluadas de mayor relevancia se adicionó la representación gráfica de los resultados. 121
- Figura 5.5. a) Relación entre el rendimiento en grano y la cantidad de N absorbido a madurez por el cultivo. b) Relación entre la concentración proteica de los granos y la cantidad de N absorbido a madurez por el cultivo. La línea discontinua corresponde al requerimiento medio de concentración proteica de la industria maltera. c) Relación entre la cantidad de N absorbido por el cultivo a madurez y la cantidad de N disponible (i.e. N suelo + N fertilizante) en los primeros 60 cm de profundidad del suelo. d) Relación entre la cantidad de nutriente absorbido por tonelada de grano y la concentración proteica en grano. Los datos utilizados para ajustar estas funciones son los correspondientes a los utilizados en el capítulo 3 e incluye más cultivares que los ensayos utilizados en el capítulo 2, en el que los experimentos utilizados fueron aquellos en los que el cultivar utilizado fue Andreia..... 123
- Figura 5.6. a) Relación N:S en grano según los tratamientos utilizados en la experimentación. La línea horizontal discontinua corresponde a la relación N:S en grano de 17.7. Cada símbolo corresponde al valor medio del tratamiento en un experimento. El color de los símbolos corresponde a cada tratamiento. b) Relación entre la variación relativa de la relación N:S en grano y la relación N:S en grano inicial. La variación relativa se calculó como el cociente del tratamiento fertilizado con S respecto al par no fertilizado con S (i.e. tratamiento '+S' / tratamiento 'Productor', tratamiento '+NS' / tratamiento '+N'). La relación N:S en grano inicial corresponde al tratamiento ubicado en el divisor del cociente (i.e. tratamiento 'Productor' y '+N', para los cocientes +S/Productor y +NS/+N, respectivamente). Cada símbolo corresponde al cociente entre pares de tratamientos azufrados y no azufrados, en cada experimento. Los símbolos azules corresponden a tratamientos sin agregado adicional de N (i.e. 'Productor' y '+S'), mientras que los símbolos rojos corresponden a tratamientos nitrogenados ('+N', '+NS'). Los números ubicados en la proximidad de los símbolos indican la codificación de los experimentos utilizados en el capítulo 3..... 125
- Figura 5.7. Relación entre el rendimiento en grano relativo y la relación N:S en grano. La separación de grupos se realizó en base a Cate y Nelson (1971). Las líneas discontinuas corresponden a los umbrales críticos que separan los grupos. Cada símbolo representa el valor medio del cociente entre el rendimiento en grano del tratamiento sin agregado de S y el par con agregado de S ($RR = \text{rendimiento en grano '+S'}/\text{rendimiento en grano 'Productor'}$; $RR = \text{rendimiento en grano '+NS'}/\text{rendimiento en grano '+N'}$). Los símbolos negros corresponden a tratamientos sin agregado adicional de N ('Productor' y '+S'), mientras que los símbolos rojos corresponden a tratamientos nitrogenados ('+N', '+NS')..... 127
- Figura S.2.1. Diferencia entre el rendimiento en grano logrado por el productor y el rendimiento en grano medio anual del departamento al cual pertenece (i.e. Ya - rendimiento en grano medio departamental). En a) efecto aleatorio año, en b) efecto

aleatorio departamento anidado en año. Los símbolos corresponden al valor medio del efecto aleatorio y las barras horizontales corresponden al intervalo de confianza estimado (IC 95 %). Símbolos y barras azules corresponden a valores medios positivos, mientras que símbolos y barras rojas corresponden a valores medios negativos. Los efectos aleatorios se estimaron a través de un modelo de efectos aleatorios en el que se consideró el año y la localidad anidado en el año como factores aleatorios. Los lotes de producción fueron asociados a una localidad por sus coordenadas geográficas.....	150
Figura S.2.2. Calibración del modelo de simulación Apsim Next Generation (versión 2021.1.20.5937) para el cv. ‘Andreia’ de cebada cervecera. a) Días a floración, b) Rendimiento en grano. Los modelos lineales fueron ajustados a través de mínimos cuadrados ponderados (WLS, por sus siglas en inglés). Se indica el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio relativo (nRMSE) y el número de observaciones (n). Las líneas punteadas refieren a la relación 1:1 y las líneas discontinuas refieren a ± 5 y 20 % respecto a la relación 1:1, en a) y b), respectivamente. En b) cada símbolo corresponde al valor medio resultante de la combinación experimento-tratamiento y las barras verticales corresponden al error estándar.....	151
Figura S.2.3. Relación entre la radiación solar incidente de datos medidos en 10 estaciones meteorológicas y las estimaciones de radiación solar incidente obtenidas de The POWER Project (NASA). Se indica el sesgo, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la raíz del error cuadrático medio relativo (nRMSE) con sus respectivas unidades. La línea punteada refiere a la relación 1:1. El modelo ajustado fue un modelo lineal mixto, en el que se consideró a la radiación solar incidente estimada como efecto fijo, mientras que la estación meteorológica y la interacción entre la radiación solar incidente estimada en cada estación meteorológica como efecto aleatorio. Además, se tuvo en cuenta la presencia de heterocedasticidad. R^2 marginal = 0.925, R^2 condicional = 0.929 (Nakagawa y Schielzeth, 2013).....	157
Figura S.2.4. Parcelas correspondientes al tratamiento ‘+N’ (i.e. 250 kg N ha ⁻¹ , izquierda) y ‘+NS’ (250 kg N ha ⁻¹ y 20 kg S ha ⁻¹ , derecha) en anthesis del cultivo, en el experimento 30 realizado en 2017.....	158

ABREVIATURAS

CNG	Concentración de nitrógeno en grano (g kg^{-1})
CSG	Concentración de azufre en grano (g kg^{-1})
EI	Eficiencia de utilización interna ($\text{kg grano kg nutriente absorbido}^{-1}$)
EIN	Eficiencia de utilización interna de nitrógeno ($\text{kg grano kg N}^{-1}$)
EIS	Eficiencia de utilización interna de azufre ($\text{kg grano kg S}^{-1}$)
GP-NLI	Limitación de la concentración proteica en grano N (% Y_w)
GP-NSLI	Limitación de la concentración proteica en grano debida a N, S y su interacción (% Y_w)
GP-SLI	Limitación de la concentración proteica en grano S (% Y_w)
GP _a	Concentración proteica en grano lograda, obtenida por el productor (%)
GP _g	Brecha de proteína (% de concentración proteica en grano o % de GP _i)
GP _i	Concentración proteica en grano promedio requerida por la industria (i.e. 11 %)
GP _N	Concentración proteica en grano del tratamiento '+N' (%)
GP _{NS}	Concentración proteica en grano del tratamiento '+NS' (%)
GP _S	Concentración proteica en grano del tratamiento '+S' (%)
ICN	Índice de cosecha de nitrógeno
ICS	Índice de cosecha de azufre
Nabs/R	Cantidad de nitrógeno absorbido por unidad de rendimiento en grano (kg Mg^{-1})
Sabs/R	Cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano (kg Mg^{-1})
WLI	Índice de limitación hídrica (% Y_p)
Y-NLI	Limitación del rendimiento en grano debida a N (% Y_w)
Y-NSLI	Limitación del rendimiento en grano debida a N, S y su interacción (% Y_w)
Y-SLI	Limitación del rendimiento en grano debida a S (% Y_w)
Y _a	Rendimiento en grano logrado, obtenido por el productor (Mg ha^{-1})
Y _g	Brecha de rendimiento en grano (Mg ha^{-1} o % de Y_w)
Y _N	Rendimiento en grano del tratamiento '+N' (Mg ha^{-1})
Y _{NS}	Rendimiento en grano del tratamiento '+NS' (Mg ha^{-1})
Y _p	Rendimiento potencial (Mg ha^{-1})
Y _S	Rendimiento en grano del tratamiento '+S' (Mg ha^{-1})
Y _w	Rendimiento potencial en condiciones de secano (Mg ha^{-1})

RESUMEN

Nitrógeno y azufre en cebada cervecera: efecto sobre las brechas de rendimiento y calidad

El rendimiento y la calidad industrial de los granos define el éxito productivo de cebada cervecera. Una gran proporción de la calidad está asociada a la cantidad de proteína que poseen los granos y a su composición. Las proteínas de reserva en cebada (denominadas hordeínas) difieren en cuanto a su contenido de S, por lo que la calidad de los granos estaría relacionada a su concentración de N y S, y por consiguiente, a su relación N:S. El objetivo de esta tesis fue determinar el efecto de la nutrición nitrogenada y azufrada en el cultivo de cebada cervecera sobre: i- la brecha de rendimiento y proteína, ii- la relación entre absorción, partición, removilización y concentración de N y S en grano, y iii- la calidad industrial de los granos. Para ello, se realizaron experimentos a campo y se utilizó un modelo de simulación agronómico. Los resultados obtenidos destacan la relevancia de la limitación nitrogenada sobre el rendimiento y la concentración proteica en grano. Para obtener una adecuada concentración proteica en grano el cultivo requirió absorber una cantidad de N superior a la necesaria para maximizar el rendimiento en grano. La concentración de N en grano fue más sensible a modificaciones en la disponibilidad de este nutriente respecto a S, debido a una mayor partición de S hacia rastrojo frente al incremento en su disponibilidad, comparado con N. La relación N:S en grano fue un indicador de la composición proteica de los granos, comportándose los principales indicadores de calidad industrial (extracto y friabilidad de malta) de manera similar en granos clasificados en grupos de relación N:S y de relación de hordeínas B:C similares. Si bien la economía interna del N y S no comparten su dinámica, condicionaron la brecha de rendimiento y la calidad de los granos en cebada cervecera.

Palabras claves: *Hordeum vulgare* L., nitrógeno, azufre, brecha de rendimiento en grano, brecha de proteína, concentración de nutriente en grano, índice de cosecha de nutriente, relación N:S en grano, calidad maltera, extracto de malta

ABSTRACT

Nitrogen and sulfur in malting barley: effect on yield gap, grain and malt quality

Barley grain quality for brewing is associated with both the amount of grain protein and its composition. The storage proteins in barley (called hordeins) differ in terms of their S content, so grain quality would be related to their N and S concentration and, therefore, to their N:S ratio. The objective of this thesis was to determine the effect of nitrogen and sulfur nutrition of malting barley on: i- the grain yield and protein gap, ii- the relationship between N and S uptake, partitioning, remobilization and grain concentration, and iii- malt quality. For this purpose, field experiments were carried out and a crop simulation model was used. The obtained results highlight the importance of nitrogen limitation on grain yield and grain protein concentration. To achieve adequate grain protein concentration, the crop needed to uptake a higher amount of N than that required to maximize grain yield. Grain N concentration was more sensitive to changes in grain N availability (N uptake per unit grain yield) than S. This was due to a higher partitioning of S to stover compared to N. Grain N:S stoichiometry was only modified under high N and low S availability conditions. Grain N:S ratio was an adequate indicator of grain protein composition, because the main industrial quality indicators (malt extract and malt friability) showed similar behavior in grains classified in groups of similar grain N:S ratio and B:C hordein ratio. Although the internal plant N and S economies do not share their dynamics, they conditioned grain yield gap and grain quality in malting barley.

Keywords: *Hordeum vulgare* L., nitrogen, sulfur, grain yield gap, protein gap, nutrient grain concentration, nutrient harvest index, grain N:S ratio, malt quality, malt extract

CAPÍTULO 1. Introducción general

1.1. Planteo del problema y revisión de antecedentes

1.1.1. Cebada cervecera en la región pampeana: el rol del N y el S

En la región Pampeana, la histórica falta de reposición de los nutrientes exportados con las cosechas y la erosión condujeron a una disminución en su disponibilidad en los suelos (Sainz Rozas et al., 2013). En la actualidad, los nutrientes que más frecuentemente limitan la producción de los cultivos de granos son el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el azufre (S). En el caso del N y el P, las deficiencias se conocen desde hace décadas (Lavado y Taboada, 2009). Las deficiencias de S se han convertido en una limitante importante de la producción agrícola en diversas regiones del mundo debido a la disminución de los aportes atmosféricos (por una menor emisión a la atmósfera desde las industrias), su exportación por cosechas en planteos agrícolas, la disminución del contenido de materia orgánica de los suelos y al menor uso de fertilizantes nitrogenados y fosforados que contienen S (Schnug y Haneklaus, 1998). En la región pampeana, a fines de la década del '90 se registraron las primeras respuestas a la fertilización con este nutriente en cultivos de granos (Rubio et al., 1996; Martínez y Cordone, 1998). Desde entonces se han observado respuestas a la fertilización azufrada en cebada y otros cultivos de granos en esta región (Gutiérrez Boem et al., 2007; Reussi Calvo et al., 2008; Salvagiotti y Miralles, 2008; Salvagiotti et al., 2012; Carciochi et al., 2016; Prystupa et al., 2016).

La cebada cervecera se ha convertido en los últimos años en una alternativa de creciente interés como cultivo de invierno dentro de región pampeana, presentando rendimientos en grano medios iguales o superiores a los de trigo (Cossani et al., 2009). Tanto la superficie sembrada como la producción total del país de este cultivo ha aumentado notoriamente aproximadamente en 2010 y luego se estabilizó (Fig. 1.1.a y b). A su vez, el rendimiento en grano medio nacional de cebada cervecera ha incrementado con el tiempo, de manera que para el periodo comprendido entre 1990 y 2021 pueden distinguirse dos etapas en función del rendimiento promedio de cada una de ellas: la primera etapa se encuentra ubicada entre 1990 y 2002, mientras que la segunda comprende el periodo entre 2003 y 2021. El rendimiento en grano medio de la segunda etapa fue un 49.2 % superior al de la primera etapa (i.e. 2372 y 3541 kg ha⁻¹, para 1990-2002 y 2003-2021, respectivamente) (Fig. 1.1.c). La tasa de incremento anual del rendimiento en grano durante 2003 - 2021 fue de 47.6 kg ha⁻¹ año⁻¹, equivalente a un incremento del 1.3 % respecto al rendimiento en grano medio de ese periodo de tiempo (Fig. 1.1.c inserto). La mayor parte de la producción nacional está concentrada, históricamente, en la provincia de Buenos Aires (i.e. más del 80 % de la producción nacional desde 1997). El área promedio cultivada con cebada cervecera durante el periodo 2008 a 2021 en la provincia de Buenos Aires representó un área equivalente al 51.2 % del área destinada a trigo (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2023). Entre los factores que determinaron el aumento de la superficie sembrada con este cultivo se destacan las mejoras en el sistema de producción, condiciones comerciales favorables, el mayor consumo local de cerveza, una mayor demanda internacional de cebada y malta, y la menor duración del ciclo de este cultivo en comparación con trigo. Esta menor duración permite la implantación más temprana de soja de segunda, mejorando su productividad (Calviño et al., 2003) y su rentabilidad frente a la alternativa trigo/soja (Tosi, 2013).

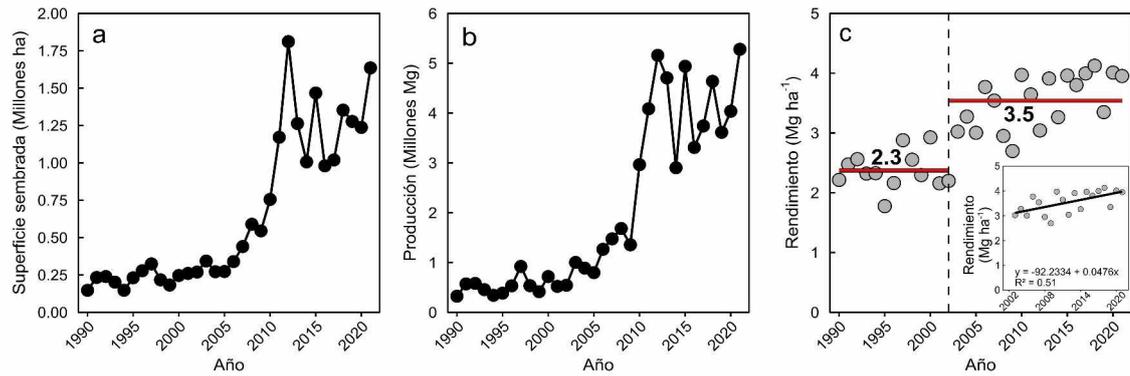


Figura 1.1. Evolución en el tiempo de a) la superficie sembrada, b) la producción y c) el rendimiento en grano medio para cebada cervecera en Argentina durante el periodo 1990 a 2021 y para el subperiodo 2003 a 2021 (inserto en c). En c) la línea discontinua indica el punto de quiebre que separa los subperiodos de tiempo (i.e. año 2002) y las líneas rojas corresponden al rendimiento medio nacional de cada etapa (i.e. 2372 kg ha⁻¹ durante 1990-2002 y 3541 kg ha⁻¹ durante 2003-2021). El punto de quiebre se determinó utilizando el paquete strucchange en el software R (Zeileis et al., 2003). Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2023).

Para alcanzar el objetivo de alta productividad y calidad en cebada cervecera, es necesaria una regulación precisa de la concentración proteica sin detrimento del rendimiento en grano. En Argentina, el destino tradicional del cultivo de cebada es la industria maltero-cervecera, en contraposición a lo que ocurre a nivel mundial donde su destino prioritario es como alimento forrajero. La industria maltera y cervecera es altamente exigente en términos de concentración proteica: se requieren valores de referencia de entre 10 y 12%. Valores de proteína del grano menores a 10% limitan el crecimiento de las levaduras encargadas de la fermentación durante el proceso de elaboración de cerveza (Briggs et al., 2004). Concentraciones elevadas de proteína en grano se asocian a una menor degradación del almidón durante el proceso de malteado (Palmer, 2006). En los cultivos de cebada de la región pampeana, la concentración proteica de los granos se encuentra frecuentemente en valores cercanos o menores al 10% (Prystupa et al., 2018). Las proteínas del endosperma del grano de cebada se pueden clasificar según su solubilidad en cuatro fracciones: hordeínas, glutelinas, albúminas y globulinas. Las hordeínas son las proteínas de reserva del grano de cebada y comprenden ~ 30-50% del contenido proteico total del grano (Howard et al., 1996; Palmer, 2006). Además de la concentración, se ha propuesto que el tipo de proteínas también influye en la calidad industrial de los granos (Zhao et al., 1999a, b; Shewry et al., 2001; Shewry, 2011). Aunque el rol de las diferentes subunidades de hordeínas no es todavía claro, se ha reportado que una elevada proporción de hordeínas-B o un incremento en la relación entre las hordeínas B:C incrementan el extracto de malta (Peltonen et al., 1994; Molina-Cano et al., 2002; Prystupa et al., 2019). Las diversas fracciones de hordeínas en el grano de cebada se caracterizan por tener diferentes contenidos de S: las fracciones B y γ son ricas en S mientras que la fracción C es pobre en este elemento (Shewry et al., 2001).

1.1.2. Brecha de rendimiento y proteína por nutrición (N y S)

El incremento de la producción de cultivos se puede lograr a partir de dos vías, el incremento del área sembrada (i.e. expansión de la frontera agrícola) y la intensificación del uso de la tierra (i.e. incremento del rendimiento por unidad de tiempo y superficie). Esta última vía puede estar dada por factores asociados al manejo de un cultivo anual

durante su época de crecimiento, o bien, al incremento en el número de cultivos realizados en un año (Cassman, 1999). Durante el periodo comprendido entre 1960 y 2005, el incremento del área sembrada con cultivos anuales fue ~ 31% en la región Pampeana, mientras que en la subregión correspondiente a la pampa ondulada fue de ~ 90%, acompañado por un proceso de intensificación (Viglizzo et al., 2011). Respecto a la intensificación del uso de la tierra, los sistemas de doble cultivo (invierno-verano) permiten un mayor aprovechamiento de los recursos y, por tanto, incrementan la productividad anual total respecto a la obtenida cuando se realiza un solo cultivo de verano en la estación de crecimiento (Caviglia et al., 2013; Andrade et al., 2015; Caviglia et al., 2019).

En la estación de crecimiento de un cultivo anual, el rendimiento del mismo puede ser evaluado de acuerdo a los limitantes bióticos y/o abióticos que se consideren (van Ittersum y Rabbinge 1997). El rendimiento logrado (Y_a , por sus siglas en inglés) es el rendimiento medio obtenido de un cultivo en una zona agrícola, el cual representa el estado actual de suelos y clima de la región, los conocimientos medios de los productores y el nivel medio de la tecnología utilizada (van Ittersum et al., 2013). Está determinado por las prácticas de manejo promedio que realizan los productores en el cultivo (i.e. fecha de siembra, cultivar seleccionado, densidad de siembra, dosis de fertilización, control de malezas, plagas y enfermedades) y la disponibilidad hídrica (van Ittersum y Rabbinge, 1997; Sadras et al., 2015). El rendimiento potencial limitado por agua o de secano (Y_w , por sus siglas en inglés) es el rendimiento de un cultivo creciendo bajo condiciones de secano, sin limitaciones nutricionales, ni restricciones por enfermedades, malezas o plagas (Lobell et al., 2009; van Ittersum et al., 2013). En el caso del rendimiento potencial de secano cobran importancia, además de variables como temperatura, radiación solar y duración del día; características del suelo asociadas al almacenamiento de agua (van Ittersum et al., 2013, Sadras et al., 2015) y también la cantidad y distribución de las precipitaciones durante la estación de crecimiento (van Bussel et al., 2015). El rendimiento potencial (Y_p , por sus siglas en inglés) es el rendimiento de un cultivo cuando crece sin limitaciones hídricas ni nutricionales y con control eficaz de plagas, enfermedades y malezas, y sin la ocurrencia de otras adversidades (i.e. heladas) (van Ittersum et al., 2013) (Fig. 1.2).

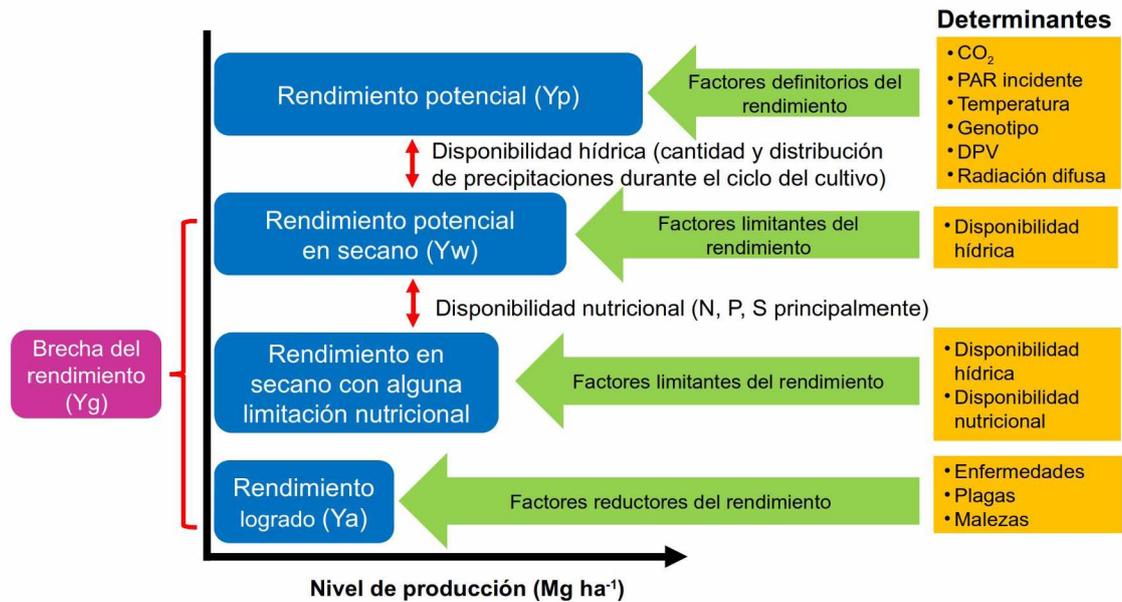


Figura 1.2. Factores definitorios, limitantes y reductores del rendimiento de un cultivo anual. Adaptado en base a van Ittersum y Rabbinge (1997); Lobell et al. (2009); van Ittersum et al. (2013); Grassini et al. (2015); van Bussel et al. (2015) y Sadras et al. (2015). PAR: radiación fotosintéticamente activa, DPV: déficit de presión de vapor.

En sistemas agrícolas de secano, donde la provisión de agua no siempre satisface la demanda del cultivo, la brecha de rendimiento (Y_g, por sus siglas en inglés) se estima como la diferencia entre el rendimiento potencial de secano y el rendimiento logrado ($Y_g = Y_w - Y_a$), la cual representa la brecha por deficiencias nutricionales en sistemas sin restricciones bióticas (Fig. 1.2). La brecha de rendimiento da una idea de la capacidad de producción no utilizada (Lobell et al., 2009), aunque habitualmente se considera que el rendimiento alcanzable representa un 80% del rendimiento potencial de secano debido a la relación de precios insumo/producto de un insumo determinado (van Ittersum et al., 2013; Sadras et al., 2015). A nivel regional y nacional, Aramburu Merlos et al. (2015) determinaron Y_g en Argentina para los cultivos de maíz, trigo y soja utilizando modelos de simulación, pero no hay antecedentes para cebada cervecera. En un estudio a nivel global, Mueller et al. (2012) estimaron la brecha de rendimiento de cebada en la Argentina en un 31% del rendimiento alcanzable, lo que equivalía a 1.08 Mg ha⁻¹ (expresado en rendimientos del año 2000), y señalaron como principal causa de esta brecha a las deficiencias nutricionales. Varios autores han señalado la poca relevancia que estos estudios a nivel global tienen para determinar brechas y sus causas a nivel local, debido a errores tanto en la estimación del rendimiento potencial de secano como del rendimiento logrado (van Ittersum et al., 2013). La estimación de la brecha de rendimiento, e interpretación de sus causas, constituye un objetivo prioritario a nivel mundial con vistas a incrementar los volúmenes de producción, tal como lo muestra la ejecución del Atlas mundial de la brecha de rendimiento (GYGA, 2016).

Los materiales genéticos han sido seleccionados sobre la base del máximo rendimiento logrado, lo que ha influido en la concentración proteica de los granos (i.e. efecto de dilución) en cultivos de trigo (Calderini et al., 1995; De Vita et al., 2007), cebada (Abeledo et al., 2003; Abeledo et al., 2008), maíz (Duvick y Cassman, 1999; Ciampitti y Vyn, 2013; DeBruin et al., 2017) y soja (de Felipe et al., 2016). Es probable que, en los últimos años, la brecha de rendimiento del cultivo de cebada haya aumentado por la introducción de cultivares con rendimiento potencial más elevado. Este cambio en los cultivares de cebada cervecera utilizados en el país llevaron a grandes aumentos del

rendimiento logrado. El rendimiento en grano promedio del periodo 2003 - 2021 fue un 49.2 % superior al de los doce años anteriores, con rendimientos medios superiores a los del cultivo de trigo (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2023). Es probable también que, en la actualidad, una parte relevante de la brecha de rendimiento se deba a deficiencias nutricionales, ya que la mayor demanda de nutrientes debido al aumento de los rendimientos logrados obtenidos no habría sido acompañada por un aumento proporcional en el uso de fertilizantes (en particular N). Angus (2001) indicó, para Australia, que incrementos en la fertilización nitrogenada mejoraron el rendimiento del cultivo de trigo en un sistema con alta deficiencia hídrica; de forma tal que identificar la brecha de rendimiento por deficiencias nutricionales, y su reducción mediante aumentos en la fertilización, contribuiría a incrementar el rendimiento del cultivo aún ante condiciones hídricas limitantes. En un relevamiento de la campaña 2012/13, se determinó que la dosis media de N aplicado como fertilizante en cebada a nivel nacional fue de 31 kg ha⁻¹ (Brihet, 2015). Un indicio de que la oferta de N no ha acompañado la demanda del cultivo es que un semillero y productor de Baigorrita destaca que el problema de calidad comercial más frecuente en los últimos años es la baja concentración de proteína en el grano (Casella, com. per.). La mayoría de las variedades actualmente empleadas en nuestro país suelen presentar concentraciones de proteínas excesivamente bajas, desde el punto de vista de su calidad maltera. A diferencia de otros cereales (trigo, maíz), el cultivo de cebada cervecera se caracteriza por poseer una acotada disponibilidad de materiales disponibles en el mercado y la prevalencia de un material por sobre los otros (Cattaneo, 2021), debido a los estrictos requerimientos impuestos por la industria maltera. Andreia ha sido durante los últimos años el cultivar dominante en región pampeana. La implantación del cultivar Andreia ha tenido un incremento notorio en los últimos años, representando ~ 25 % de la superficie sembrada con este cultivo en el año 2014, hasta alcanzar un máximo del 80 % en 2018 y luego disminuir al 70 % en 2019 (Cattaneo, 2021).

Análogamente a la brecha de rendimiento, se puede plantear en el cultivo de cebada la existencia de una brecha de proteína (GPg, por sus siglas en inglés). La brecha de proteína, en términos fisiológicos, puede ser entendida como la diferencia entre la concentración de proteína del grano obtenida por los productores (GPa, por sus siglas en inglés) y la que se podría obtener con el cultivo sólo limitado por agua (GPw, por sus siglas en inglés). Sin embargo, la industria maltera tradicionalmente demandó en Argentina una concentración proteica comprendida entre 10 - 12%, ampliándose recientemente el rango al 9.5 - 13 % (Res. 27/2013, SENASA). Por lo tanto, la brecha de proteína debe ser entendida como la diferencia entre la concentración proteica media requerida por la industria (GPi, por sus siglas en inglés) y la concentración proteica obtenida por el productor (i.e. GPg = GPi - GPa). Considerando que la disponibilidad de N en el suelo necesaria para alcanzar niveles de proteína deseables para la industria (~ 11%) es superior a la necesaria para alcanzar máximos rendimientos (Prystupa et al., 2016), es esperable que la magnitud relativa de la brecha de proteína sea superior a la de rendimiento en la mayoría de los casos. Cuantificar esta brecha, e identificar sus causas, aportaría información con la cual apoyar recomendaciones de cambios en el manejo del cultivo y colaboraría a definir estrategias de los programas de mejoramiento. Pese a la relevancia de la calidad como modulador del éxito de cebada como especie cultivable, el concepto de brecha de proteína y de los factores que lo definen no ha sido desarrollado en la literatura.

En los estudios que calcularon brechas de rendimiento en cultivos, el rendimiento logrado se estimó basado en los rendimientos medios por distrito reportados por

instituciones gubernamentales (e.g. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca) o internacionales (FAO). Si bien se considera que son valores confiables para trabajar a escala de distrito (Sadras et al., 2014), cuando se interpolan estos valores medios hacia niveles de organización de menor jerarquía es probable que se encuentren grandes variaciones entre distintas unidades de manejo (i.e. lote). Esta variabilidad en los rendimientos logrados dentro de una misma zona se puede deber a diferencias en las tecnologías utilizadas por distintos productores, en los suelos de distintas unidades de manejo (incluso de un mismo productor), y en las condiciones climáticas (en especial precipitaciones) de distintas unidades de manejo en un mismo año, o de la misma unidad en distintos años (Beza et al., 2017; Silva et al., 2017). Estimaciones recientes señalaron que la dosis media de N aplicado como fertilizante en el cultivo de cebada fue de 75 y 63 kg N ha⁻¹ en el norte y centro de la provincia de Buenos Aires, respectivamente (Brihet, 2015). Sin embargo, la dosis media de N estimada en cada región presenta mayor variabilidad según el nivel tecnológico adoptado por el productor (Brihet, 2015). Si se quiere avanzar en la identificación de las causas de la brecha de rendimiento, de forma tal de poder realizar recomendaciones de cambios en el manejo del cultivo para reducirla, se hace necesario medir el rendimiento logrado y estimar el rendimiento potencial de secano a escalas más bajas que las utilizadas en los estudios regionales. Tanto el rendimiento potencial de secano como el rendimiento logrado se pueden determinar para un lote y año en particular o para escalas espaciales y temporales más grandes, dependiendo del objetivo del estudio (van Ittersum et al., 2013). Estudios locales, donde el rendimiento logrado se basa en rendimientos medidos a nivel de unidad de manejo y el rendimiento potencial de secano en base a una simulación para ese sitio y año, son más apropiados cuando se quiere evaluar el impacto de determinadas prácticas agronómicas sobre la brecha de rendimiento (Grassini et al., 2011). Los modelos de simulación proveen una adecuada precisión en la estimación del rendimiento potencial y el rendimiento potencial de secano (Lobell et al., 2009, van Ittersum et al., 2013) como así también en la evaluación de prácticas de manejo (Chenu et al., 2017). La forma de estimar el rendimiento logrado también puede ser una limitante en la estimación de la brecha de rendimiento, dependiendo de la fuente de información utilizada (van Ittersum et al., 2013).

Una aproximación a la inferencia de la brecha tanto de rendimiento como de proteína en grano y a la cuantificación de la limitación por N y S a escala de lote de producción, puede realizarse a través de la implementación de modelos de simulación y la realización de experimentos a campo en forma conjunta. Mientras que Y_p y Y_w pueden estimarse a través de modelos de simulación (e.g. DSSAT, Apsim), el nivel de limitación impuesta por N, S y su interacción N-S depende de observaciones provenientes de los lotes de producción, a partir de tratamientos donde se considere que se alcanza la saturación de la respuesta del rendimiento en grano al agregado de N y S (Fig. 1.3). En la figura 1.3 se amplió el marco conceptual de brecha de rendimiento en grano esquematizado en la figura 1.2, con el fin de introducir las limitaciones de N, S y su interacción (N x S). A partir de la utilización de un modelo de simulación se estiman Y_p y Y_w y, con ellos, estimar WLI (i.e. $WLI = Y_p - Y_w$, lo cual indica la limitación hídrica que tuvo un cultivo, flecha violeta en la Fig. 1.3). Utilizando, además, la información obtenida mediante la realización de experimentos a campo puede estimarse Y_g (i.e. $Y_w - Y_a$). La proporción de Y_g atribuible a nutrientes (en este caso N, S y su interacción) y factores no asociados a la nutrición nitrogenada o azufrada del cultivo se desprende de la determinación de efectos o diferencias de medias entre tratamientos. La diferencia entre Y_w y Y_{NS} comprende a la limitación del rendimiento en grano debida a factores que no fueron evaluados en los experimentos realizados. La diferencia entre

Y_{NS} y Y_a contiene el efecto del N, del S y su interacción (en el caso que el efecto de estos nutrientes no sea aditivo) sobre el rendimiento en grano. En un experimento con diseño factorial completo (i.e. están presentes todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores evaluados), el cálculo del efecto de un factor surge como promedio del efecto de ese factor comparado con los niveles del otro factor. En el caso de N y S, el efecto de N sobre el rendimiento en grano se calcula como el promedio de la diferencia entre Y_{NS} y Y_S y la diferencia entre Y_N y Y_a (Efecto N = $[(Y_{NS} - Y_S) + (Y_N - Y_a)] / 2$, flechas verdes en la Fig. 1.3). Análogamente, el efecto de S sobre el rendimiento en grano se calcula como el promedio de la diferencia entre Y_{NS} y Y_N y la diferencia entre Y_S y Y_a (Efecto S = $[(Y_{NS} - Y_N) + (Y_S - Y_a)] / 2$, flechas anaranjadas en la Fig. 1.3).

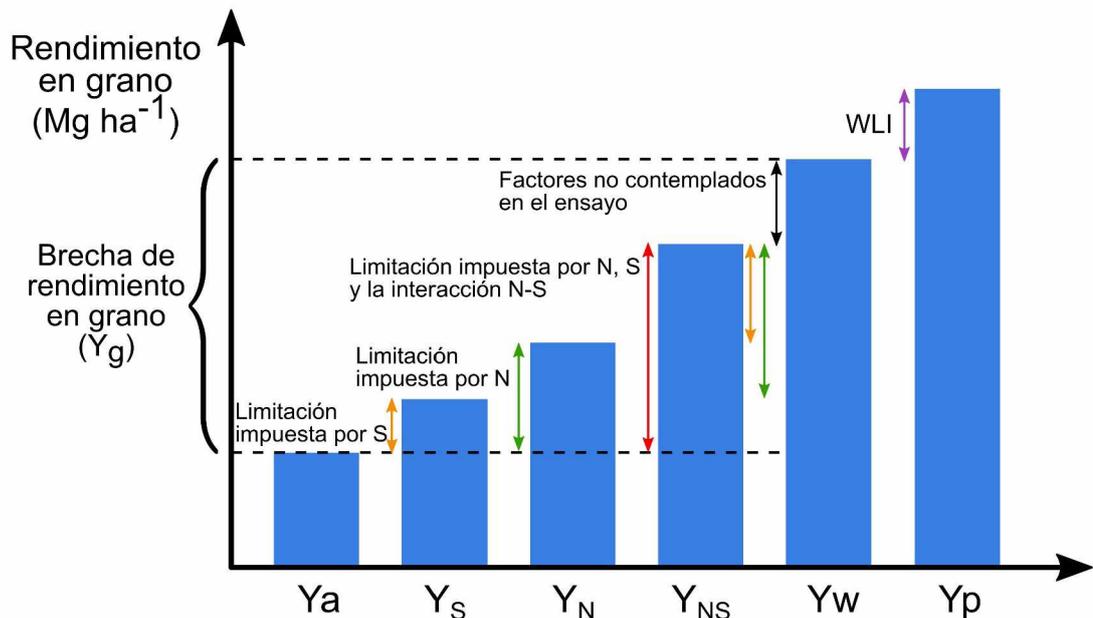


Figura 1.3. Esquema de rendimiento en grano esperado en cada uno de los tratamientos de los experimentos factoriales completos realizados y rendimientos en grano simulados (Y_w y Y_p). En el esquema se consideró que la respuesta del rendimiento en grano al agregado de N y S presenta interacción sinérgica (i.e. la aplicación de N y S en conjunto incrementa el rendimiento en grano por encima del incremento que provoca el agregado de estos nutrientes individualmente). Las líneas punteadas delimitan la brecha de rendimiento en grano estimada. WLI: índice de limitación hídrica sobre el rendimiento en grano. Las flechas dobles indican la magnitud de la limitación del rendimiento debido a S (flechas anaranjadas), a N (flechas verdes), a N y S en conjunto (flecha roja), a factores no contemplados en el diseño experimental (flecha negra) y a la disponibilidad hídrica (flecha violeta). Los factores no contemplados en los ensayos realizados hacen referencia a limitaciones impuestas por adversidades bióticas y abióticas no evaluadas en el diseño experimental (e.g. P y micronutrientes, enfermedades, plagas y malezas).

Análogamente a la descomposición de Y_g en términos nutricionales, puede plantearse para GP_g , a partir de lo esquematizado en la figura 1.2. En el caso de la concentración proteica en grano, sería esperable que la única o la mayor limitación sea debida a N. Esto se debe a que, generalmente, la respuesta del rendimiento en grano al agregado de S en distintos cultivos en la región pampeana es moderada, por lo que no se esperaría observar un efecto dilución de N en el grano. Por lo tanto, tampoco se esperaría

encontrar un incremento de la concentración proteica en grano frente al agregado de S respecto a la concentración proteica obtenida por el productor (GP_a), ni en el caso del agregado de ambos nutrientes (GP_{NS}) respecto al tratamiento con agregado de N individualmente (GP_N) (Fig. 1.4), sin que ello no implique modificaciones en la calidad maltera por cambios en el perfil proteico ante el agregado de S.

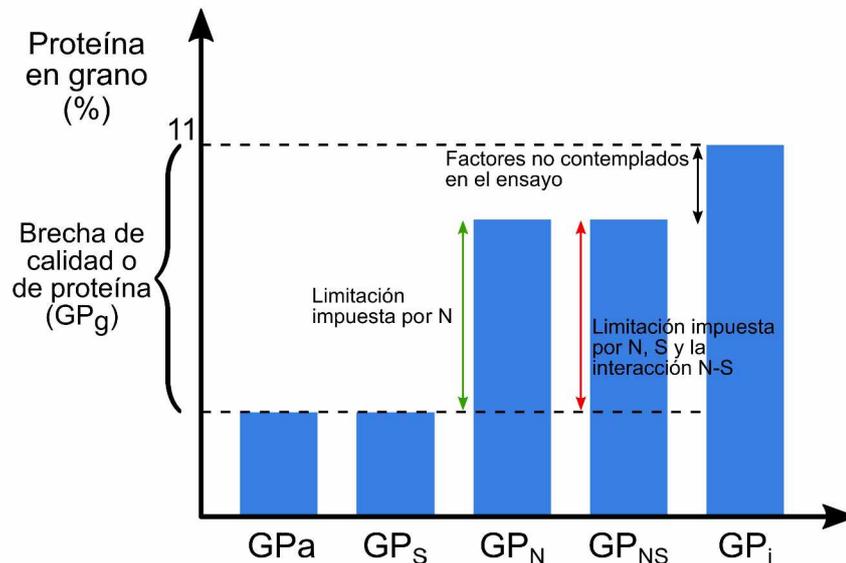


Figura 1.4. Esquema de la concentración proteica en el grano esperada en cada uno de los tratamientos de los experimentos factoriales completos realizados. Se consideró que la respuesta de la concentración proteica de los granos sólo respondió al agregado de N (i.e. la aplicación S no modificaba la concentración proteica de los granos). Las líneas punteadas delimitan la brecha de proteína en grano estimada. Las flechas dobles indican la magnitud de la limitación de la concentración proteica de los granos debido a N (flechas verdes), a N y S en conjunto (flecha roja), a factores no contemplados en el diseño experimental (flecha negra). Los factores no contemplados en los ensayos realizados hacen referencia a limitaciones impuestas por adversidades bióticas y abióticas no evaluadas en el diseño experimental (e.g. P y micronutrientes, enfermedades, plagas y malezas). GP_i corresponde al límite de referencia de concentración proteica en grano establecido (i.e. 11 %) en base al requerimiento promedio de la industria cervecera (i.e. 9.5 - 13 %).

1.1.3. Absorción, partición, removilización y concentración de N y S en granos

En experimentos llevados a cabo en la región pampeana se ha observado que la concentración proteica de los granos se asoció positivamente con la disponibilidad de N y negativamente con el rendimiento en grano (Prystupa et al., 2018). Para alcanzar una concentración proteica en grano entre el 10 y el 12% (rango estricto deseable en las malterías, como se mencionó en la sección anterior) se debe contar en el suelo con 22 y 40 kg ha⁻¹ de N disponible por tonelada de grano de rendimiento (Prystupa et al., 2008). Es escasa la información para cebada y cultivos afines (i.e. trigo) respecto de la relación entre disponibilidad o absorción de S por el cultivo y la concentración de S en el grano.

La pendiente de la relación entre el rendimiento en grano y la cantidad de nutriente absorbido se conoce como eficiencia de utilización interna ($EI = \text{Rendimiento}/\text{Nutriente absorbido}$; Janssen, 1998) (Fig. 1.5).

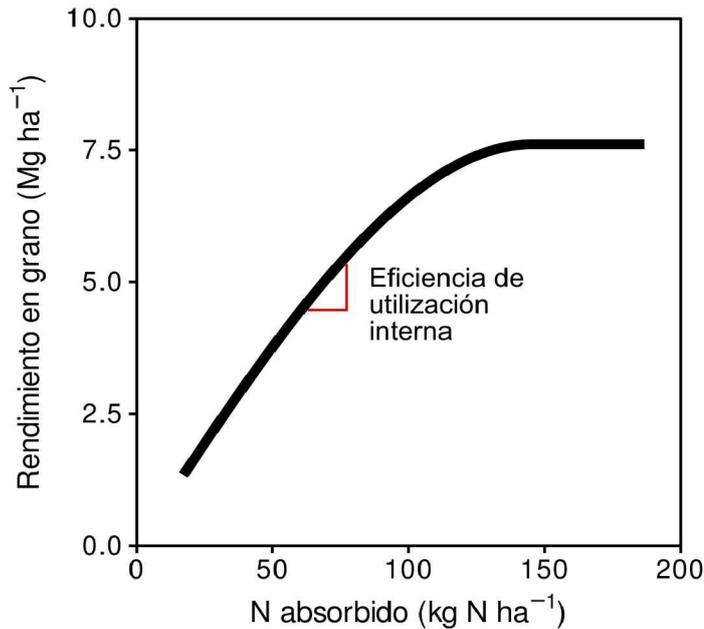


Figura 1.5. Esquema de la relación entre el rendimiento en grano y la cantidad de N absorbido por un cultivo.

La EI puede ser afectada por el nivel de rendimiento alcanzado. Esta se asume lineal y constante cuando el rendimiento no está cerca del potencial del sitio y disminuye por encima del 70-80% del rendimiento máximo (Dobermann y Cassman, 2002). La EI también puede disminuir con alta disponibilidad del nutriente en el suelo, que lleva a un aumento en la absorción sin un aumento proporcional en el rendimiento en grano (i.e. consumo de lujo), o por estreses ambientales, particularmente al final del ciclo del cultivo que afectan más el rendimiento en grano que la absorción (van Keulen y van Heermst, 1982). Las EI más altas, cercanas a la máxima dilución del nutriente en la biomasa, están asociadas a situaciones de deficiencia del nutriente (Janssen, 1998).

La inversa de la EI es la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano. Este cociente puede dividirse en dos componentes con sentido agronómico: la concentración del nutriente en el grano y el índice de cosecha del nutriente (Sadras, 2006).

$$\frac{\text{Nutriente absorbido}}{\text{Rendimiento}} = \frac{\text{Nutriente en grano}}{\text{Rendimiento}} * \frac{\text{Nutriente absorbido}}{\text{Nutriente en grano}} \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

donde: 'Nutriente absorbido' es la cantidad de nutriente absorbido presente en la biomasa aérea (kg ha⁻¹), 'Rendimiento' es el rendimiento en grano (kg ha⁻¹), 'Nutriente en grano' es la cantidad de nutriente absorbido presente en los granos a madurez (kg ha⁻¹) y 'Nutriente absorbido/Rendimiento' es la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano (kg Mg⁻¹). Reordenando estos términos en la ecuación 1.2:

$$\frac{\text{Nutriente absorbido}}{\text{Rendimiento}} = \frac{\text{Concentración de nutriente en grano}}{\text{IC de nutriente}} \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

donde: 'Concentración de nutriente en grano' es la concentración del nutriente en el grano e 'IC de nutriente' es el índice de cosecha del nutriente.

Esta relación implica que un aumento de la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano llevaría a tener una mayor concentración del nutriente en el grano, siempre y cuando el IC del nutriente se mantuviera constante.

Sadras (2006) observó que, para un mismo cultivo, una gran proporción de la variabilidad de la eficiencia de utilización interna de nitrógeno (EIN) se debía a variaciones en índice de cosecha de nitrógeno (ICN) y, en menor medida, a modificaciones en la concentración de N en el grano (CNG). Cambios en el IC de un nutriente conllevarían a cambios en la relación entre la cantidad absorbida y la concentración en el grano de un nutriente (Ec. 1.2). A su vez, la EIN en cebada también ha aumentado por mejoramiento genético, lo cual se asoció al incremento en el ICN (Abeledo et al., 2008).

En estudios previos de nuestro grupo de trabajo, se determinó que la concentración de N en el grano estuvo relacionada con la cantidad de N disponible en el suelo por unidad de rendimiento alcanzado (Prystupa et al., 2008). Para un mismo cultivo y variedad, el N aplicado y absorbido presentan una asociación positiva (van Keulen y van Heemst, 1982). Esta relación puede ser curvilínea debido a que, en rangos de valores elevados de N aplicado, disminuye la eficiencia de recuperación de este nutriente (i.e. la relación entre N absorbido y N aplicado) (de Wit, 1992; Dobermann, 2007). Dado esta correlación positiva entre N aplicado y absorbido, en los rangos de valores de fertilización normalmente utilizados (van Keulen y van Heemst, 1982), sería esperable hallar una correlación entre la concentración proteica en grano y la cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento en grano (i.e. la inversa de la EIN) en cebada.

En un experimento de fertilización de cebada con N y S se observó que, a diferencia del N, la concentración de S en el grano fue poco sensible a cambios en la cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento en grano, debido a grandes cambios en el índice de cosecha del azufre (Gutierrez Boem et al., 2014). Esto pudo deberse a que el cultivo se hallaba en una situación de consumo de lujo de S (i.e. el rendimiento del cultivo respondió a la aplicación de N y no a la de S), o a que la relación entre la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento y la concentración del nutriente en el grano es distinta para N y S. Estudios previos observaron, en cultivos de trigo y cebada, una disminución de la relación N:S en grano debido al incremento de la concentración de S en grano provocado por la fertilización con S (Flæte et al., 2005; Zhao et al., 2006; Reussi Calvo et al., 2011; Holopainen et al., 2015). Sin embargo, en estos estudios también observaron un incremento de la concentración de S frente al agregado de N. Análogamente, Lerner et al. (2006) observaron en dos ensayos realizados en el cultivo de trigo, que el agregado de N produjo un incremento en la concentración de N en grano mayor que el observado para S, lo cual conllevaba a un incremento en la relación N:S en grano. Lerner et al. (2006) no observaron efecto del agregado de S sobre la concentración de este nutriente en grano. Si bien, Reussi Calvo et al. (2011) observaron un incremento en la concentración de S en grano por el agregado de este nutriente en el cultivo de trigo, otros estudios sólo observaron este efecto esporádicamente (i.e. sólo en un ensayo) (Holopainen et al., 2015; Arata et al., 2017). Si la concentración de S en el grano fuera poco sensible a cambios en la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano, sería muy difícil intentar cambiar la concentración de S (y la relación N:S) del grano vía fertilización azufrada en condiciones de suficiencia o 'consumo de lujo' de S (i.e. la relación N:S en grano se mantendría constante en condiciones de suficiencia de ambos nutrientes).

El N y S que se encuentran en el grano a la cosecha puede provenir tanto de la absorción directa del suelo durante el llenado de los granos como de la removilización del N y S absorbido previamente (Anderson y Fitzgerald, 2003; Hirel et al., 2007; Gregersen, 2011). La removilización cobra mayor importancia cuando la disponibilidad en el suelo durante el llenado de granos es baja, o la absorción durante ese período se ve limitada por bajo contenido de agua del suelo. Si bien el metabolismo del N y S están relacionados entre sí (Hawkesford, 2012), la regulación de su removilización durante el llenado de los granos difiere, por lo que cambios en la disponibilidad relativa de N y S pueden tener distintos efectos sobre la concentración de estos nutrientes en el grano (Anderson y Fitzgerald, 2003; Howarth et al., 2008).

El análisis vegetal puede ser utilizado para diagnosticar el estado nutricional de un cultivo. Como la concentración de un nutriente en particular varía con el órgano muestreado o el estado fenológico del cultivo, los sistemas de diagnóstico basados en concentraciones críticas estandarizan el momento y órgano muestreado. Una alternativa para contemplar la variación en la concentración es considerar la concentración crítica como función de la biomasa del cultivo (curva de dilución) (Greenwood et al., 1991; Justes et al., 1994). Otra es utilizar la relación entre nutrientes, que suele ser más estable que la concentración de un nutriente específico a lo largo del ciclo de un cultivo. Las relaciones entre nutrientes también se pueden utilizar para monitorear el estatus nutricional de más de un nutriente, ya que es frecuente en una zona agrícola que los cultivos se encuentren co-limitados por varios nutrientes. Ha habido varias aproximaciones en la forma de utilizar las relaciones entre nutrientes, como desarrollar índices basados en las relaciones observadas en cultivos de alto rendimiento (e.g. sistema DRIS, Sumner, 1977), o establecer relaciones entre rendimiento y la cantidad de nutrientes absorbidos contemplando la interacción entre varios nutrientes (e.g. modelo QUEFTS, el cual simula el rendimiento en función de las condición química de un suelo; Janssen et al., 1990; Sattari et al., 2014). La estequiometría considera las relaciones cuantitativas de los elementos (e.g. nutrientes) en los seres vivos, y este concepto ha sido utilizado en ecología para estudiar los cambios en la relación C:N:P a distintos niveles de organización en distintos ecosistemas (Elser et al., 2000a;b), para caracterizar las relaciones entre nutrientes en las plantas (Sadras, 2006), o vincular la relación C:N:P a la tasa de crecimiento de las plantas u otros organismos (Niklas, 2006; Greenwood et al., 2008).

Desde el punto de vista del diagnóstico de la nutrición del cultivo, las relaciones útiles son las que cambian sólo con la deficiencia de un nutriente, permitiendo distinguir poblaciones deficientes de las que no lo son. En este sentido, algunos autores han señalado que la capacidad que tienen los cultivos de absorber nutrientes por encima de sus requerimientos (i.e. consumo de lujo), dependiendo de la disponibilidad relativa de los nutrientes en el suelo, lleva a una gran variabilidad en las relaciones entre nutrientes en biomasa aérea, limitando su utilidad como indicadores (Lemarie y Gastal, 2009). La relación de dos nutrientes en biomasa aérea también puede ser afectada por la interacción entre nutrientes. La aplicación de un nutriente deficiente puede aumentar la absorción de otro por mayor crecimiento radical. Por ejemplo, Duru et al. (1997) observaron que la aplicación de P a pastizales mejoraba su crecimiento y su índice de nutrición nitrogenada.

En la actualidad, son muy escasos los sistemas de diagnóstico de la nutrición del cultivo (o de la fertilidad del suelo) basados en el análisis de grano. Esto es lógico ya que su resultado se obtiene luego de la cosecha, cuando ya no se puede resolver la

deficiencia nutricional en el cultivo analizado. Sin embargo, este tipo de diagnóstico puede ser útil para identificar sitios deficientes en un nutriente o para cambiar el manejo nutricional de los cultivos subsecuentes en la rotación así como para analizar el impacto de dicha deficiencia sobre variables asociadas al establecimiento del rendimiento y la calidad. Sistemas basados en relaciones N:S han sido propuestos en trigo (Randall et al., 1981; Reussi Calvo et al., 2011), en soja (Hitsuda et al., 2004; Salvagiotti et al., 2012; Divito et al., 2015) y maíz (Pagani et al., 2012, Carciochi et al., 2019) para el diagnóstico de deficiencias azufradas.

1.1.4. Calidad industrial y la relación N:S en granos

Los granos de cebada están conformados por la cáscara, el pericarpo, la testa, la capa de aleurona, el tejido endospermático y el embrión. El tejido endospermático es el principal constituyente del grano (77-82% del peso seco) (Briggs et al., 2004; Palmer, 2006). El endosperma se conforma por gránulos de almidón que se encuentran insertos en una matriz proteica (Briggs et al., 2004). La concentración proteica de los granos demandada por la industria se encuentra establecida dentro de rangos específicos. Incluso, estos rangos forman parte de las normas de comercialización de granos de cebada con destino a maltería. En Argentina, el rango demandado de proteína es entre 9.5 y 13 % (Res. 27/2013, SENASA), similar a los requerimientos de proteína demandados en otras regiones del mundo: Australia (9 - 12 %), Estados Unidos (9.5 - 12.5 %), Canadá (10.5 - 13 %) y España (9.5 - 11.5 %). La determinación de estos estrechos rangos se debe a que existe un rango óptimo de concentración proteica para la industria maltero-cervecera. Es necesaria una moderada cantidad de proteína para lograr una adecuada actividad enzimática durante el malteo (Swanston et al., 2014). Un bajo contenido proteico reduce la capacidad de fermentación de los azúcares luego de la maceración de la malta (proceso posterior al malteado que se desarrolla durante la fabricación de cerveza), debido a una baja provisión de aminoácidos para las levaduras (Swanston et al., 2014). Por otro lado, elevadas concentraciones proteicas conllevan a una limitación en la degradación del almidón por parte de las enzimas, impuesta por la cobertura de la matriz proteica a los gránulos (Slack et al., 1979). Además, un mayor contenido proteico en el grano posee como contrapartida un menor número de gránulos de almidón tipo-A que, además, son de menor tamaño (Palmer, 2006). Debido al menor contenido de almidón tipo-A en el grano, se obtiene un menor rendimiento de los azúcares durante la maceración, de manera que finalmente es afectada la producción de alcohol (Palmer, 2006).

La producción de malta o malteado de los granos es el proceso por el cual, como producto final, se obtienen granos que se hallan germinados y con un bajo contenido de humedad. La producción de malta se puede dividir en tres fases: remojo, germinación y tostado. El remojo consta del incremento de humedad de los granos a través de la inmersión en agua durante un breve periodo de tiempo (~ 2 días). Se producen ciclos de inmersión en agua con inyección de oxígeno y posterior secado al aire con extracción del dióxido de carbono generado por el proceso de respiración de los granos (Briggs et al., 2004). Durante este proceso se produce la imbibición de los granos con el fin de iniciar la germinación y la síntesis de ácido giberélico en el embrión, facilitar el transporte y la acción del ácido giberélico en la capa de aleurona e hidratar el tejido endospermático, de forma que se promueva la degradación enzimática del mismo (Palmer, 2006). La germinación se considera que es óptima cuando los granos alcanzan ~ 45-46% de humedad (Palmer, 2006). Durante la misma ocurre la degradación de las paredes del tejido endospermático y parcialmente la de proteínas y de los gránulos de

almidón (Briggs et al., 2004). Los productos de la degradación del tejido endospermático y la capa de aleurona migran hacia el embrión en crecimiento. Estos procesos dependen de la humedad del grano, la calidad del mismo y la temperatura a la cual se encuentran los granos durante los procesos de remojo y germinación (Briggs et al., 2004). La germinación termina con el inicio del proceso de tostado. Durante el mismo se incrementa la temperatura hasta reducir el contenido de humedad de los granos hasta ~ 5%, por lo que permite el almacenamiento estable de los mismos (Palmer, 2006). Durante este proceso disminuye gradualmente la actividad enzimática hasta detenerse por completo, debido a la baja humedad de los granos.

El principal índice de la calidad maltera es el extracto de malta (Briggs et al., 2004). El extracto se determina midiendo el peso específico de un mosto que se obtiene macerando en agua una muestra de malta molida bajo condiciones controladas (conocido como Mosto Congreso). El peso específico es un estimador de la concentración de solutos obtenidos en el mosto al finalizar la maceración y, por lo tanto, del rendimiento industrial por unidad de malta durante esta primera etapa de la elaboración de la cerveza. Otros estimadores de interés asociados a la calidad de la malta son la friabilidad de malta, el tiempo de sacarificación y el tiempo de filtración. La friabilidad de malta es un indicador del grado de modificación del endosperma del grano, mientras que el tiempo de sacarificación se trata de una medida grosera del tiempo que demora la dextrinización del almidón y está relacionado con el contenido de α -amilasa de la malta (Briggs et al., 2004).

La fertilización nitrogenada incrementa la concentración proteica de los granos en el cultivo de cebada cervecera (Bulman y Smith, 1993; De Ruyter y Brooking, 1996; O'Donovan et al., 2011; Dordas et al., 2012; O'Donovan et al., 2015). Si bien la fertilización nitrogenada incrementa la proporción de hordeínas del contenido nitrogenado de granos (Kirkman et al., 1982; Giese et al., 1983; Wang et al., 2007), produce un incremento más que proporcional de las hordeínas-C respecto a las B, y por tanto, disminuye la relación entre las hordeínas B:C (Kirkman et al., 1982; Shewry et al., 1983), disminuyendo su calidad maltera.

Si bien se ha observado que la deficiencia azufrada no provoca modificaciones o lo hace ligeramente en la concentración proteica de los granos (Zhao et al., 2006), modifica la composición de aminoácidos de las mismas (Shewry et al., 1983; Holopainen et al., 2015). La disponibilidad de S también influye en el contenido de hordeínas de los granos y la composición de las mismas. En condiciones de deficiencia severa de S se ha observado un menor contenido total de hordeínas, menor acumulación de hordeínas-B y D respecto a C y, por consiguiente, una menor relación de hordeínas B:C (Shewry et al., 1983; Holopainen et al., 2015). Esto último está asociado a regulaciones a nivel de traducción génica de los diferentes tipos de proteínas (Rahman et al., 1983).

El extracto de malta se asocia negativamente con la concentración proteica de los granos, lo que es atribuido a una menor tasa de degradación de los gránulos de almidón durante la maceración (Howard et al., 1996). Se ha reportado que una elevada proporción de hordeínas-B o un incremento en la relación entre las hordeínas B:C se asocian a mayores valores de extracto de malta (Peltonen et al., 1994; Molina-Cano et al., 2002; Prystupa et al., 2019). Por lo tanto, la calidad de los granos de cebada no estaría relacionada sólo con la concentración de proteína sino también con la relación N:S en el grano (Shewry, 2011). Si la relación N:S fuera poco sensible a la fertilización

azufrada debido a una menor sensibilidad de la concentración de S del grano ante cambios en la disponibilidad de este nutriente, las variaciones en el extracto de malta estarían sujetas a modificaciones en la disponibilidad de N únicamente. Existe escasa información acerca de los efectos de la fertilización azufrada sobre la calidad industrial de la cebada. Zhao et al. (2006), en una red de experimentos a campo, observaron un incremento del poder diastásico (i.e. indicador de la actividad amilolítica) ante el agregado de S. Sin embargo, el incremento en el poder diastásico no estuvo acompañado por un incremento en el extracto de malta. Por otro lado, Holopainen et al. (2015) realizaron seis ensayos a campo, y sólo en uno de ellos observaron un incremento de la concentración de S en grano de cebada ante el agregado de S, acompañados de una disminución de las hordeínas C de forma más que proporcional al aumento observado en las hordeínas-B (lo cual conduciría a una mayor relación entre las hordeínas B:C). Esto estuvo asociado a un incremento del contenido de N soluble y N amino libre (FAN, por sus siglas en inglés) pero no se reportaron efectos significativos sobre el extracto.

Pese a la relevancia del N y S como condicionantes de la calidad maltera, la documentación sobre el tema es acotada y generalmente el análisis limitado a uno solo de los nutrientes, o efectuado en condiciones controladas (que dificulta la extrapolación a escala de cultivo) o tomando como referencia de calidad a alguna variable aislada (e.g. concentración de hordeínas).

1.2. Objetivos e hipótesis

El **objetivo general** de la tesis fue determinar el efecto de la nutrición nitrogenada y azufrada del cultivo de cebada cervecera sobre: i- la brecha de rendimiento y proteína, ii- la relación entre absorción, partición, removilización y concentración de N y S en los granos, y iii- la calidad industrial evaluada a través del extracto y la friabilidad de malta.

Los **objetivos específicos** fueron:

1.- Determinar cuánto de la brecha de rendimiento (Yg) y de proteína (GPg) a escala de unidad de manejo en cultivos de cebada, tomando como referencia al centro y norte de la provincia de Buenos Aires, se debe a la nutrición con N y S.

La **hipótesis** a poner a prueba es que la brecha de proteína es mayor en términos relativos que la de rendimiento, y que la deficiencia de N explicará una parte relevante de ambas, mientras que la deficiencia de S solo explica una proporción de la brecha de rendimiento y no posee impacto sobre la brecha de proteína.

2.- Determinar la relación entre la concentración de N y S en el grano de cebada y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento.

La **hipótesis** a poner a prueba es que la concentración de N en grano es más sensible que la de S a cambios en la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento. Comparada con N, la menor sensibilidad de la concentración de S en grano está asociada a una menor removilización de S durante el llenado de grano.

3.- Determinar el efecto de cambios en la disponibilidad de N y S sobre la relaciones estequiométricas N:S en grano y biomasa en el cultivo de cebada.

La **hipótesis** a poner a prueba es que la relación estequiométrica N:S en grano es más estable (i.e. menor coeficiente de variación) que en biomasa vegetativa y, además, la

relación estequiométrica N:S en grano no es afectada por el ‘consumo de lujo’ de uno de los dos nutrientes si el otro no es deficiente.

4.- Determinar la influencia de la relación N:S en grano sobre distintos atributos de calidad maltera en el cultivo de cebada.

La hipótesis a poner a prueba es que la clasificación de granos según su relación N:S permite distinguir situaciones contrastantes de calidad maltera debido a su asociación con los distintos tipos de hordeínas y, por tanto, con la relación de hordeínas B:C.

1.3 Estructura de la tesis

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos, se llevaron a cabo 61 experimentos a campo sobre lotes de producción y se utilizó el modelo de simulación Apsim. La tesis se organizó en 5 capítulos. El capítulo 1 (**Introducción general**) consta de la contextualización que derivó en las hipótesis y objetivos propuestos, además de la revisión de antecedentes sobre los temas planteados. Posteriormente, se presentan 3 capítulos de resultados. En el capítulo 2 (**Brecha de rendimiento y proteína debido a N y S en el centro-norte de Buenos Aires, Argentina**) se cuantificó y caracterizaron la brecha de rendimiento en grano y de proteína, y se estimó el grado de limitación debida a N, S y la interacción N-S de ambas brechas. En el capítulo 3 (**Partición a grano y removilización de N y S**) se evaluó de forma comparativa la absorción, removilización y partición hacia granos para, finalmente, definir la relación entre estos nutrientes (N:S) en los granos. En el capítulo 4 (**Relación N:S en grano y calidad maltera**) se evaluó la relación N:S en grano como indicador de calidad de malta, a través de su relación con la composición proteica de los granos (tipo de hordeínas). Finalmente, en el capítulo 5 (**Discusión general**) se contrastan las hipótesis planteadas inicialmente y se presenta un resumen de los resultados obtenidos, aplicaciones prácticas derivadas de la experimentación realizada y se consideran futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO 2. Brecha de rendimiento y proteína debido a N y S en el centro-norte de Buenos Aires

2.1. Introducción

La cebada es uno de los principales cereales producidos a nivel global (157 millones de Mg en 2020, FAO 2022). Argentina se ubicó en el décimo puesto respecto al nivel de producción de cebada en los últimos tres años (2018 a 2020) y fue el quinto país exportador para el mismo periodo (FAO, 2022). A diferencia de otros países, el principal destino de la producción de cebada argentina es la industria maltera. En la actualidad, los principales nutrientes que limitan la producción de cultivos de granos a escala global son el N, P y K (Stewart et al., 2005). En Argentina, en la región pampeana, las deficiencias nutricionales para el crecimiento de cultivos de grano que se encuentran generalizadas son debidas a N y P (Lavado y Taboada, 2009). Si bien la disponibilidad de K en los suelos de la región pampeana ha disminuido debido a la falta de reposición de este nutriente, los niveles actuales de dicha disponibilidad son relativamente altos y la deficiencia de K en los cultivos ha sido raramente observada (Correndo et al., 2021). En esta región, el tercer nutriente que limita el crecimiento de cultivos es el S, y suele presentarse como una deficiencia puntual (i.e. no es una limitante generalizada en todos los suelos de la región). Existen antecedentes de respuesta del rendimiento en grano al agregado de S de distintos cultivos de grano en esta región, como ser en soja (Gutiérrez-Boem et al., 2007; Salvagiotti et al., 2012; Divito et al., 2015), maíz (Carciochi et al., 2016), trigo (Salvagiotti y Miralles, 2008; Reussi Calvo et al., 2011; Arata et al., 2017) y cebada (Prystupa et al., 2019). Respecto del efecto del agregado de S sobre la concentración proteica en grano podría ser nulo (Prystupa et al., 2019), o bien tener otros dos sentidos. Por un lado, que aumente la proteína debido a un incremento en la absorción de N como consecuencia de una mejora en el estatus nutricional del cultivo (i.e. por mayor crecimiento tanto de biomasa aérea como radical) (Carciochi et al., 2020a). Por otro lado, podría incrementar la biomasa de granos en una proporción mucho mayor a lo que aumenta el contenido proteico de estos y producir un efecto dilución de N (Gutiérrez Boem et al., 2008; Zhao et al., 2006). Sin embargo, en general, la respuesta del rendimiento en grano al agregado de S en los cultivos evaluados se ha presentado de manera moderada, por lo que no sería esperable observar modificaciones significativas en la concentración proteica de los granos.

El rendimiento en los cultivos de grano se ha ido incrementando a lo largo del tiempo (Cassman, 2003). Esto estuvo asociado al mejoramiento genético y a las mejoras en el manejo agronómico de los cultivos (Cassman, 1999). Sin embargo, el desacoplamiento entre la economía del C y del N ocasionó la disminución de la concentración de N de los granos en los cultivos de trigo (Calderini et al., 1995; De Vita et al., 2007), cebada (Bulman et al., 1993; Abeledo et al., 2008), maíz (Duvick y Cassman, 1999; DeBruin et al., 2017) y soja (de Felipe et al., 2016) (i.e. la ganancia genética fue en detrimento de la concentración de N respecto a la acumulación de biomasa). En el caso de cebada cervecera, a diferencia de lo que ocurre en otros cultivos de grano, la industria posee requerimientos estrictos en cuanto a la concentración proteica de los granos, demandando un mínimo de 9.5% de proteína en grano y un máximo de 13% (Res. 27/2013, SENASA). Estos límites se deben a que un elevado contenido proteico en grano se asocia a la obtención de bajos niveles de extracto de malta, mientras que un bajo contenido proteico puede limitar el crecimiento de levaduras durante la fermentación (Briggs et al., 2004).

El rendimiento potencial (Y_p , por sus siglas en inglés) se define como el rendimiento en grano de un cultivo creciendo sin limitaciones hídricas ni nutricionales y con un

adecuado control de adversidades bióticas (van Ittersum et al., 2013). El rendimiento potencial limitado por agua (Y_w , por sus siglas en inglés) representa al rendimiento en grano potencial en condiciones de secano, por lo que el cultivo está expuesto a estrés hídrico (van Ittersum et al., 2013). El rendimiento logrado (Y_a , por sus siglas en inglés) es el rendimiento en grano logrado por el productor (Lobell et al., 2009). La brecha de rendimiento en grano (Y_g , por sus siglas en inglés) representa la capacidad de producción potencialmente explotable o no utilizada y se calcula como la diferencia entre Y_w y Y_a , en condiciones de producción de secano (Lobell et al., 2009). Y_p , Y_w , Y_a y, por lo tanto Y_g , pueden estimarse a distintas escalas espaciales y temporales, según el objetivo del estudio. Y_w puede estimarse a partir de experimentos a campo, de los registros de concursos de rendimientos y de los máximos rendimientos obtenidos por productores, siempre que se abarque un amplio rango de ambientes (lotes y años) (Lobell et al., 2009). Los modelos de simulación son una herramienta adecuada para estimar Y_p y Y_w , tanto a escala local como en escalas espaciales jerárquicamente superiores (van Ittersum et al., 2013). En varios trabajos previos se caracterizó la brecha de rendimiento en grano para distintos cultivos, a escalas regionales o a partir de zonas agroclimáticas (Mueller et al., 2012; Hall et al., 2013; Aramburu Merlos et al., 2015; Gobbet et al., 2016). Algunos trabajos desarrollados a nivel regional evaluaron los factores determinantes de Y_g en distintos cultivos de grano (Rattalino Edreira et al., 2017; Di Mauro et al., 2018; Agus et al., 2019; Lollato et al., 2019; Rizzo et al., 2021). Otros estudios se desarrollaron a escala local con el fin de evaluar el impacto de determinadas prácticas de manejo que disminuyan Y_g (Grassini et al., 2011; Balboa et al., 2019; Di Mauro et al., 2022). Schils et al. (2018) estimó para Europa tanto Y_g como la brecha de N, calculada esta última como la diferencia entre la cantidad de N absorbido por un cultivo que alcanza el 80 % de Y_w y la cantidad de N absorbido por un cultivo que obtiene el productor (Y_a). La cantidad de N absorbido en estas situaciones es estimada a partir de los valores medios de eficiencia fisiológica de N de los cultivos, siguiendo el protocolo establecido por The Global Yield Gap and Water Productivity Atlas (GYGA, <https://www.yieldgap.org/web/guest/minimum-nitrogen-input-requirement>). Sin embargo, hasta mi conocimiento no hay antecedentes del análisis de Y_g y su descomposición en términos nutricionales para N y S en cebada cervecera a escala de lote, y son limitados los estudios sobre el tema realizados en otras especies (e.g. Carciochi et al., 2020, en maíz).

Análogamente a Y_g , se puede plantear en el cultivo de cebada la existencia de una brecha de proteína (GP_g , por sus siglas en inglés). La brecha de proteína puede ser entendida como la diferencia entre la concentración de proteína del grano obtenida por los productores (GP_a , por sus siglas en inglés) y la que se podría obtener con el cultivo sólo limitado por agua (GP_w , por sus siglas en inglés). Debido a que los requerimientos de calidad de la industria maltera implican una concentración proteica de referencia del 11 %, la brecha de proteína puede ser entendida como la diferencia entre la concentración proteica media requerida por la industria (GP_i , por sus siglas en inglés) y la concentración proteica obtenida por el productor ($GP_g = GP_i - GP_a$). Considerando que la relación entre el rendimiento en grano y la disponibilidad de N en suelo es del tipo plateau, mientras que la relación entre la concentración de proteína y la disponibilidad de N es del tipo lineal (o no presenta un plateau del todo definido muchas veces) (McKenzie et al., 2004; O'Donovan et al., 2011; Sainju et al., 2013; Prystupa et al., 2019) es esperable que la magnitud relativa de la brecha de proteína sea superior a la de rendimiento en la mayoría de los casos, dada la limitación por N que presentan los sistemas productivos. La concentración proteica de los granos no ha sido abordada previamente desde el marco teórico de la brecha, de manera de caracterizar la magnitud

de la limitación de una forma resumida y, menos aún, contextualizada en función de la brecha de rendimiento.

El objetivo particular de este capítulo fue determinar cuánto de la brecha de rendimiento (Yg) y de proteína (GPg) a escala de unidad de manejo en cultivos de cebada, tomando como referencia al centro y norte de la provincia de Buenos Aires, se debe a la nutrición con N y S.

La hipótesis a poner a prueba fue que la brecha de proteína es mayor en términos relativos que la de rendimiento, y que la deficiencia de N explica una parte relevante de ambas, mientras que la deficiencia de S solo explica una proporción de la brecha de rendimiento y no posee impacto sobre la brecha de proteína.

2.2. Materiales y métodos

2.2.1. Experimentos a campo

Se realizaron 42 experimentos con cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) en condiciones de campo en el centro-norte de la provincia de Buenos Aires, durante el periodo entre 2014 y 2019, en las zonas de influencia de Nueve de Julio, Rawson, Junín, Arribeños y Pergamino (Fig. 2.1). Cada experimento fue el resultado de la combinación sitio-año, en los cuales se aplicaron 3 tratamientos de fertilización:

- Productor: consistió en la dosis de fertilización aplicada por el productor.
- +N: 150 kg N ha⁻¹ (en los años 2014/15/16/18 y 2019) o 250 kg N ha⁻¹ (año 2017), por sobre la dosis de fertilizante aplicada por el productor.
- +S: 15 kg S ha⁻¹ (en los años 2014/15/16) o 20 kg S ha⁻¹ (años 2017/18/19), por sobre la dosis de fertilizante aplicada por el productor.

Durante el periodo 2016 a 2019, se agregó un tratamiento con el fin de conformar un diseño factorial completo:

- +NS: 15 kg S ha⁻¹ (año 2016) o 20 kg S ha⁻¹ (en los años 2017, 2018 y 2019) y 150 kg N ha⁻¹ (en los años 2016, 2018 y 2019) o 250 kg N ha⁻¹ (año 2017), por sobre la dosis de fertilizante aplicada por el productor.

Los 14 experimentos realizados en el periodo 2014-15 tuvieron un diseño factorial incompleto con dos repeticiones, mientras que los 28 experimentos realizados durante 2016 y 19 poseían un diseño factorial completo con 3 repeticiones. Cada unidad experimental poseía 6 m de largo y 4 m de ancho, dispuestos sobre una zona representativa del lote a evaluar (i.e. alejado de alambrados). En los 42 experimentos realizados el cv. utilizado fue Andreia, el cual es un cultivar moderno y con un amplio grado de adopción por parte de los productores desde su liberación hasta la actualidad. Las prácticas de manejo (fecha de siembra, densidad de plantas, control de adversidades) implementadas en los experimentos fueron aquellas realizadas por cada productor en el lote de producción. Los lotes productivos presentaron un adecuado manejo de adversidades (plagas, malezas y enfermedades). Sólo se observó una incidencia leve de carbón volador (*Ustilago hordei*) en el experimento 24 y de roya amarilla (*Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*) en el experimento 36. No se observaron eventos adversos como caída de granizo o heladas tardías que afectaran a los cultivos. Todos los experimentos se condujeron en secano. En los tratamientos aplicados, la fertilización nitrogenada y azufrada se realizó utilizando urea y yeso, respectivamente. La fertilización con N y S se realizó al voleo, entre siembra y emergencia.

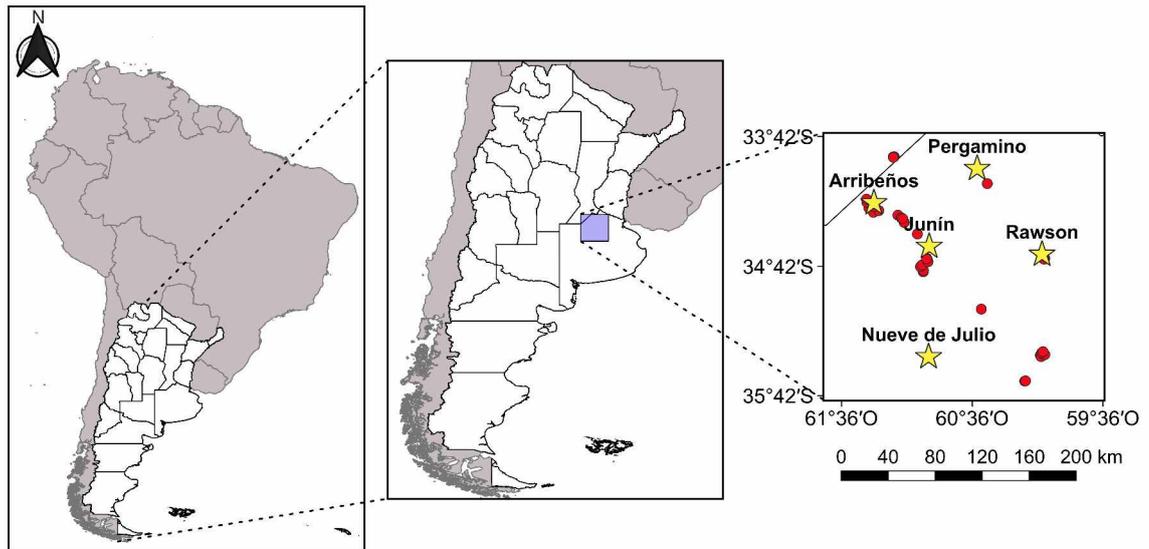


Figura 2.1. Mapa del centro norte de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Los símbolos rojos corresponden a los experimentos (combinación de sitio-año). Los símbolos amarillos refieren a las estaciones meteorológicas y a la localidad a la cual pertenecen.

Las dosis medias de fertilización con N y S aplicadas por el productor se presentan en el Cuadro 2.1. En la mayoría de los casos, el N fue aplicado a la siembra y sólo en el 26.1 % de los lotes de producción se fraccionó la dosis de N durante el ciclo del cultivo (datos no presentados). La fertilización azufrada, a diferencia de la nitrogenada, fue menos habitual. En el 41 % de los lotes de producción no se aplicó S. En los lotes donde se aplicó S, la dosis media fue de 8 kg S ha⁻¹. El antecesor más frecuente fue el cultivo de soja (i.e. 78.5 % de los casos, Cuadro S.2.2 del material suplementario). Los productores son representativos de la zona a la cual pertenecen (Fig. S.2.1 del material suplementario).

Cuadro 2.1. Estadísticas de resumen de las dosis de fertilización nitrogenada y azufrada utilizada por los productores.

Dosis de fertilización	Media	Q25-Q75	Mín - Máx
Nitrogenada (kg N ha ⁻¹)	68.6	45.3 - 99.4	4.2 - 132.6
Azufrada (kg S ha ⁻¹)	4.9	0 - 6.7	0 - 22.5

2.2.2. Mediciones

Se determinó el día de floración según Zadoks et al. (1974). A la madurez de cosecha del cultivo, se cosecharon manualmente 4 m lineales de biomasa aérea, en la zona central de las unidades experimentales. Las muestras se secaron a 65 °C hasta alcanzar peso constante y luego fueron trilladas en una trilladora estacionaria para determinar rendimiento en grano y rastrojo. El rendimiento en grano se expresó en base seca.

Se determinó la concentración de N a través de digestión húmeda y posterior colorimetría (Baethgen y Alley, 1989), tanto en grano como en rastrojo. El porcentaje de proteína en grano fue calculado multiplicando la concentración de N en grano (en base seca) por un factor de 6.25. Tanto para grano como rastrojo, el contenido de N en la biomasa se calculó como el producto de la concentración de N en grano o rastrojo y

la cantidad de grano o rastrojo (en base seca). La cantidad de N absorbido a la madurez del cultivo se calculó como la suma del contenido de N en grano y rastrojo.

En cada experimento (combinación sitio-año), se tomó una muestra compuesta de suelo hasta 100 cm de profundidad a intervalos de 20 cm, durante las etapas iniciales del cultivo (siembra a emergencia). Las muestras de suelo se secaron en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante. La lámina de humedad al metro de profundidad se calculó como la suma de la masa de agua determinada en cada intervalo de 20 cm, asumiendo una densidad aparente del suelo de 1.25 Mg m⁻³.

El contenido de carbono orgánico del suelo se determinó a través del método de Walkley y Black (1934), a partir de una muestra compuesta de suelo tomada a una profundidad de 20 cm. El contenido de materia orgánica se calculó como el cociente entre el contenido de carbono orgánico y 0.58.

2.2.3. Modelo de simulación

El modelo de simulación utilizado para estimar Yw y Yp fue Apsim Next Generation (versión 2021.1.20.5937) (Brown et al., 2014). Tanto la calibración como la evaluación del modelo se llevaron a cabo con parte de los datos correspondientes a los experimentos realizados a campo. La calibración de la fenología se realizó en dos etapas: una calibración sintética y luego una con datos provenientes de observaciones. La fenología se ajustó de manera inicial a través de la realización de un experimento 'in silico' o sintético, utilizando los parámetros de desarrollo ajustado en el modelo CronoCebada (<http://cronocebada.agro.uba.ar/>) (i.e. tiempo térmico entre siembra y emergencia y entre emergencia y antesis) e información meteorológica. Con esa información se predijo la fecha de antesis a partir de distintas fechas de siembra (mayo a agosto), en tres localidades con climas distintos (Balcarce, Junín y Marcos Juárez) durante una serie de tiempo considerable (9 años). Esas fechas de antesis predichas se utilizaron para realizar una calibración inicial de la fenología del modelo de simulación Apsim. Posteriormente, se realizó una recalibración de la fenología utilizando las fechas de antesis observadas en algunos experimentos cercanos a las estaciones meteorológicas (con preferencia en los tratamientos +N o +NS) (Fig. S.2.2.a del material suplementario). En el caso del rendimiento en grano, la calibración se realizó utilizando los tratamientos con rendimiento más elevados, tanto para los que poseían agregado de N ('+N' y '+NS') como los que no ('Productor' y '+S') (Fig. S.2.2.b del material suplementario). La calibración del modelo tanto para la fenología como para rendimiento en grano se realizó con ensayos ubicados en la zona de Junín y Arribeños, debido a que presentaban una mayor cercanía a las estaciones meteorológicas o se contaba con datos de precipitación locales (esto último en el caso de Arribeños). En el caso de fenología, la calibración final se realizó con 9 observaciones, mientras que en el caso del rendimiento en grano fue realizada con 26 de 84 situaciones (i.e. combinaciones sitio-tratamiento con y sin agregado de N).

La evaluación del modelo, tanto para fenología como para el rendimiento en grano, se realizó con un conjunto de datos independientes a los utilizados en el proceso de calibración y se utilizaron tanto experimentos cercanos como algunos de los más alejados de las estaciones meteorológicas. Para la evaluación del modelo en cuanto a su capacidad de simular la fenología (fecha de antesis) se utilizaron los tratamientos con agregado de N (i.e. '+N' o '+NS') (Fig. 2.2.a). En el caso de la evaluación del modelo para la simulación de rendimiento en grano se utilizaron tanto los tratamientos con agregado de N ('+N' y '+NS') como los que no ('Productor' y '+S') (Fig. 2.2.b). Los valores de los parámetros del genotipo ajustados durante el proceso de calibración del modelo de simulación se presentan en el material suplementario (Cuadro S.2.1 del

material suplementario). La capacidad de predicción del modelo de simulación fue evaluada a través del coeficiente de determinación (R^2) y de la raíz del error cuadrático medio relativo (nRMSE).

$$nRMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\bar{y}_i}}$$

donde 'n' es el número de observaciones, ' y_i ' es el valor observado, ' \hat{y}_i ' es el valor simulado y ' \bar{y}_i ' es el promedio de los valores observados.

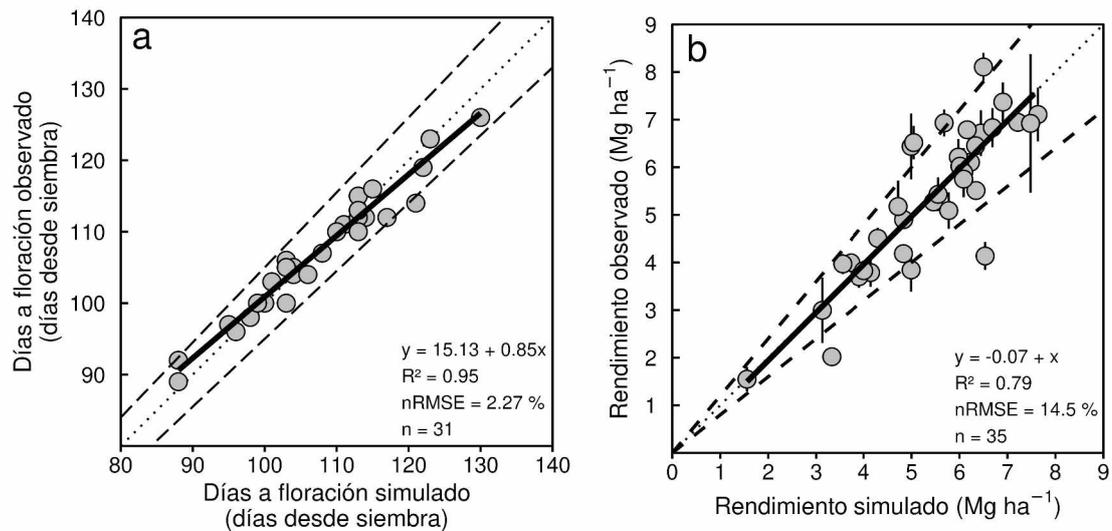


Figura 2.2. Evaluación del modelo de simulación Apsim Next Generation (versión 2021.1.20.5937) calibrado para el cv. 'Andreia' de cebada cervecera. a) Días a floración, b) Rendimiento en grano. Los modelos lineales fueron ajustados a través de mínimos cuadrados ponderados (WLS, por sus siglas en inglés). Se indica el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio relativo (nRMSE) y el número de observaciones (n). Las líneas punteadas refieren a la relación 1:1 y las líneas discontinuas refieren a ± 5 y 20% respecto a la relación 1:1, en a) y b), respectivamente. En b) cada símbolo corresponde al valor medio resultante de la combinación experimento-tratamiento y las barras verticales corresponden al error estándar.

Los datos meteorológicos (temperatura mínima, temperatura máxima, precipitaciones) utilizados, con paso diario, fueron obtenidos de estaciones meteorológicas cercanas a cada lote de producción y provinieron del Servicio Meteorológico Nacional (Junín y Nueve de Julio), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuario (INTA Estación Experimental Agropecuaria Pergamino) y datos de precipitación locales (Arribeños y Rawson) (Fig. 2.3). Para los experimentos realizados en la zona de influencia de Arribeños y Rawson se consideraron los datos de temperatura de Junín. Los lotes ubicados en la zona de Arribeños y Junín presentaron una distancia media a la estación más cercana (o fuente de información de precipitaciones en el caso de Arribeños) de 13 km (con un rango desde 2.5 a 31 km). Los lotes de producción ubicados en la zona de Venticinco de Mayo y Wheelwright fueron los más alejados de las estaciones meteorológicas que se utilizaron como referencias (i.e. Nueve de Julio y Pergamino, respectivamente). Los lotes ubicados en la cercanía de Veinticinco de Mayo se encontraban en promedio a 72 km de la estación meteorológica de Nueve de Julio (con

un rango desde 63 a 76 km), mientras que los lotes ubicados en la cercanía de Wheelwright se encontraban a una distancia media de 38 km (con un rango desde 5 a 55 km). Debido a que no se contaba con datos de radiación solar incidente para todas las estaciones meteorológicas, se utilizaron datos obtenidos en The POWER Project (<https://power.larc.nasa.gov/>), luego de ser corregidos a partir de observaciones locales (Fig. S.2.3 del material suplementario).

Las características climáticas de Junín, Nueve de Julio y Pergamino se resumen en la figura 2.3. A partir de la mediana de precipitación acumulada durante junio a noviembre y la mediana de la temperatura media, se establecieron dos condiciones principales para cada variable: años cuya humedad y temperatura media durante el periodo junio a noviembre se encontraron por debajo o por encima de la mediana. De la combinación de la clasificación de las dos variables anteriores, se pudo clasificar los años en: secos y frescos; secos y cálidos; húmedos y frescos; húmedos y cálidos.

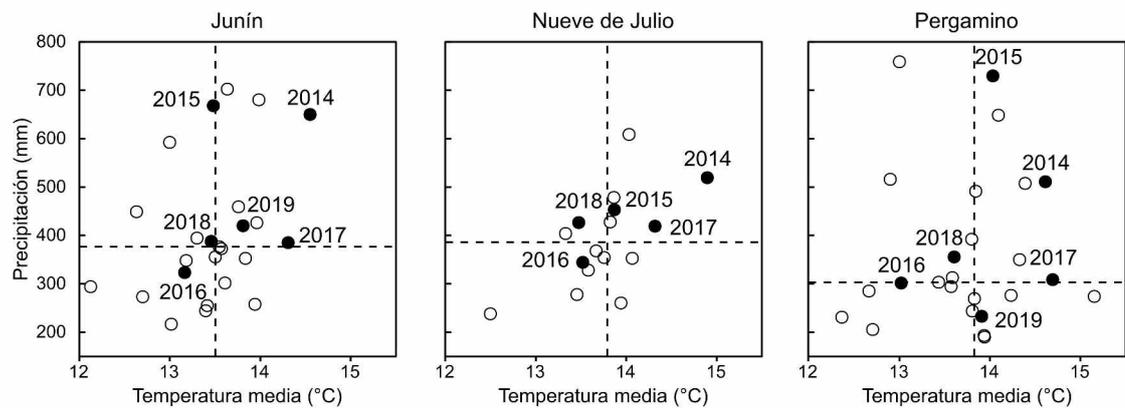


Figura 2.3. Precipitación acumulada y temperatura media para el periodo junio a noviembre en distintos años. Cada símbolo corresponde a un año. Los símbolos llenos refieren a los años en los que se realizaron los ensayos experimentales, los símbolos vacíos refieren a los restantes años de la serie en cada estación meteorológica. Las líneas discontinuas horizontales corresponden a la precipitación acumulada mediana, mientras que las líneas verticales indican las temperaturas medias medianas, correspondientes a la serie de años en cada estación meteorológica (Junín: 1995-2019, Nueve de Julio: 2003-2018, Pergamino: 1995-2019).

Los perfiles de suelo utilizados en las simulaciones se obtuvieron a partir de la serie de suelo identificada para cada experimento en base a la carta de suelos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (<http://www.geointa.inta.gob.ar>). Las series identificadas fueron Junín, La Oriental, Norumbega, Veinticinco de Mayo, Teodolina, Wheelwright, Hughes, Ortiz de Rosas, Santa Isabel, Rawson, Saforcada, Arroyo Dulce y O'Higgins. La profundidad de los perfiles de suelo generados para ser utilizados en las simulaciones se unificó a una profundidad de 1.8 m, de forma de establecer la máxima capacidad de profundización de las raíces del cultivo (i.e. ninguna de las series de suelos utilizadas presentó impedancias físicas que limitaran el desarrollo radical a una profundidad menor) (Aramburu Merlos et al., 2015). Los valores de los límites inferior y superior del suelo (LL y DUL, respectivamente) se calcularon en base a Saxton et al. (1986). El límite inferior del cultivo (CLL) se estimó en base a Dalgliesh et al. (2015). La concentración de carbono orgánico en cada estrato subsuperficial del perfil fue estimada a partir de la determinación realizada en el estrato superficial (0 - 20 cm) según la disminución en profundidad propuesta por Dalgliesh et al. (2015). La simulación se inició el 1 de abril en cada experimento, a partir de la información de cual fue el cultivo antecesor (Cuadro S.2.2) y su rendimiento medio departamental

(Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2023). Se estimó la cantidad de residuo remanente al 1 de abril en cada experimento, a partir de estimaciones realizadas en base al índice de cosecha de biomasa de los distintos cultivos (Andrade y Sadras, 2000; Álvarez et al., 2011) y la tasa de descomposición de residuos (Richmond y Rillo, 2009; Álvarez, 2015). Además, se supuso que el cultivo antecesor dejó un 15 % del agua útil en el perfil del suelo luego de su cosecha, por lo cual la recarga del perfil hasta la siembra del cultivo de cebada dependió de la dinámica del agua en la simulación de cada experimento. A la siembra de la cebada en el experimento, se asumió una disponibilidad media de 35 y 60 kg N ha⁻¹ hasta 60 cm de profundidad, según el suelo sea arenoso o franco, respectivamente.

2.2.4. Cálculo de brechas y variables complementarias

Tanto el rendimiento potencial de secano (Y_w) como el rendimiento potencial (Y_p) se estimaron a través del modelo de simulación, según la fecha de siembra y densidad seleccionada por el productor en cada lote de producción. El Y_w se simuló en condiciones no limitantes de N, lo cual se logró manteniendo un nivel de disponibilidad de 100 kg N ha⁻¹ para el cultivo en los primeros 60 cm de profundidad del suelo, durante todo su ciclo a través de fertilizaciones con N, de manera análoga a lo realizado por otros autores (Gobbett et al., 2016; García et al., 2018). En las situaciones en las que se determinó la presencia de napa, la misma se simuló a través de la implementación de riego, manteniendo la humedad del suelo en valores cercanos al máximo disponible a la profundidad a la cual se observó su presencia. En las situaciones en las que el rendimiento observado de alguno de los tratamientos aplicados fue mayor al Y_w simulado, se utilizó el valor del máximo rendimiento observado de los tratamientos como indicador de Y_w . En estas situaciones se consideró que el cultivo estuvo expuesto a la presencia de napa, debido a que correspondían a casos en los que la eficiencia en el uso del agua para producir grano basada en la precipitación durante el ciclo del cultivo ($EUA_{(G,c)}$) se encontró por encima de la EUA mediana (11.4 kg mm⁻¹) y además se verificó que Y_p era mayor que Y_N o Y_{NS} .

El rendimiento potencial (Y_p) en cada experimento se obtuvo a partir de la simulación sin limitaciones hídricas ni nitrogenadas durante el ciclo del cultivo. Para ello, se simuló el agregado de N y la aplicación de láminas de riego, a nivel de suficiencia de estos dos factores (i.e. asegurando un contenido de 100 kg N ha⁻¹ disponible para el cultivo, hasta los 60 cm de profundidad y un contenido hídrico por encima del 80% de la capacidad de campo hasta los 80 cm de profundidad, respectivamente), análogamente a lo realizado por García et al. (2018). Y_g se calculó como la diferencia entre Y_w y Y_a . La diferencia entre Y_p e Y_w es un indicador del grado de limitación hídrica al que estuvo expuesto un cultivo, suele denominarse WLI (por sus siglas en inglés) y se calculó relativo a Y_p (i.e. $WLI = [1 - Y_w/Y_p] * 100$). De manera análoga a WLI, se calcularon distintos índices con el fin de caracterizar la limitación por N, S y ambos nutrientes combinados: NLI, es un indicador de la limitación por N que posee un cultivo; SLI, es un indicador de la limitación por S que posee un cultivo y NSLI, es un indicador de la limitación por N y S combinados que posee un cultivo. Las limitaciones nutricionales se calcularon para el rendimiento y la concentración proteica de los granos. El cálculo varió en función de la presencia o no de interacción N-S para el rendimiento y la concentración proteica de los granos, y del diseño experimental en cada experimento.

En el caso de rendimiento en grano:

- $Y\text{-NSLI} (\%) = (Y_{NS} - Y_a) / Y_w * 100$; si el diseño experimental era factorial completo (i.e. aquellos que contenían el tratamiento '+NS').

- $Y\text{-NLI} (\%)$:

$Y\text{-NLI} (\%) = (Y_N - Y_a) / Y_w * 100$, si el diseño experimental era factorial incompleto (i.e. se calculó como el efecto principal de N relativo a Y_w).

$Y\text{-NLI} (\%) = ([(Y_N - Y_a) + (Y_{NS} - Y_s)] / 2) / Y_w * 100$, si el diseño experimental era factorial completo sin interacción N-S (i.e. se calculó como el efecto principal de N, relativo a Y_w).

$Y\text{-NLI} (\%) = (Y_{NS} - Y_s) / Y_w * 100$, si el diseño experimental era factorial completo con interacción N-S (i.e. se calculó como el efecto simple del agregado de N en condiciones de elevada disponibilidad de S, relativo a Y_w).

- $Y\text{-SLI} (\%)$:

$Y\text{-SLI} (\%) = (Y_s - Y_a) / Y_w * 100$, si el diseño experimental era factorial incompleto (i.e. se calculó como el efecto principal de S, relativo a Y_w).

$Y\text{-SLI} (\%) = ([(Y_s - Y_a) + (Y_{NS} - Y_N)] / 2) / Y_w * 100$, si el diseño experimental era factorial completo sin interacción N-S (i.e. se calculó como el efecto principal de S, relativo a Y_w).

$Y\text{-SLI} (\%) = (Y_{NS} - Y_N) / Y_w * 100$, si el diseño experimental era factorial completo con interacción N-S (i.e. se calculó como el efecto simple del agregado de S en condiciones de elevada disponibilidad de N, relativo a Y_w).

Análogamente a rendimiento en grano, se calculó la brecha de proteína y los respectivos índices de limitación por N, S, N y S combinados para la concentración proteica en grano. A diferencia del rendimiento en grano, en términos productivos, el potencial de referencia para la concentración proteica de los granos depende de la calidad demandada por la industria más que de la limitación fisiológica del cultivo. Por tal motivo, la brecha de proteína se referenció a la concentración proteica en grano promedio requerido por la industria maltera (i.e. $GP_i = 11 \%$). La brecha de proteína (GP_g) se calculó como la diferencia entre GP_i y la concentración proteica en grano obtenida por el productor (GP_a). Los distintos índices de limitación por N y S considerados fueron:

- $GP\text{-NSLI} (\%) = (GP_{NS} - GP_a) / GP_i * 100$; si el diseño experimental era factorial completo (i.e. aquellos que contenían el tratamiento '+NS').

- $GP\text{-NLI} (\%)$:

$GP\text{-NLI} (\%) = (GP_N - GP_a) / GP_i * 100$, si el diseño experimental era factorial incompleto (i.e. se calculó como el efecto principal de N relativo a GP_i).

$GP\text{-NLI} (\%) = ([(GP_N - GP_a) + (GP_{NS} - GP_s)] / 2) / GP_i * 100$, si el diseño experimental era factorial completo sin interacción N-S (i.e. se calculó como el efecto principal de N, relativo a GP_i).

$GP\text{-NLI} (\%) = (GP_{NS} - GP_s) / GP_i * 100$, si el diseño experimental era factorial completo con interacción N-S (i.e. se calculó como el efecto simple del agregado de N en condiciones de disponibilidad de S, relativo a GP_i).

- $GP\text{-SLI} (\%)$:

$GP\text{-SLI} (\%) = (GP_s - GP_a) / GP_i * 100$, si el diseño experimental era factorial incompleto (i.e. se calculó como el efecto principal de S, relativo a GP_i).

$GP\text{-SLI} (\%) = ([(GP_s - GP_a) + (GP_{NS} - GP_N)] / 2) / GP_i * 100$, si el diseño experimental era factorial completo sin interacción N-S (i.e. se calculó como el efecto principal de S, relativo a GP_i).

$GP\text{-SLI} (\%) = (GP_{NS} - GP_N) / GP_i * 100$, si el diseño experimental era factorial completo con interacción N-S (i.e. se calculó como el efecto simple del agregado de S en condiciones de disponibilidad de N, relativo a GP_i).

En el caso de que alguna de las diferencias entre tratamientos fuera nula o negativa (i.e. el numerador de los índices descritos anteriormente fuera ≤ 0), se consideró que el nivel

de limitación fue nulo. En el caso de que la concentración proteica en grano de los tratamientos (GP_a , GP_s , GP_N y GP_{NS}) fuera mayor a GPI , se consideró como el límite superior para el cálculo de las limitaciones ($GP-NSLI$, $GP-NLI$, $GP-SLI$) a GPI .

El cálculo de la proporción de Yg debida a la nutrición nitrogenada y azufrada se realizó a través del cociente entre la deficiencia de estos nutrientes e Yg . El nivel de deficiencia con N y S se calculó como la suma de la limitación por N y S ($Y-NLI$ y $Y-SLI$, respectivamente) en los experimentos con diseño factorial incompleto y como la limitación por N, S y su interacción (i.e. $Y-NSLI$) en los experimentos con diseño factorial completo. De manera análoga se realizó el cálculo para GPg .

El cálculo de la proporción de la limitación del rendimiento en grano por N y S debida a cada uno de estos nutrientes se realizó para cada experimento a partir de la suma de la limitación por N y S (i.e. $NLI + SLI$):

- Proporción de brecha por N y S debida a N (%) = $Y-NLI / (Y-NLI + Y-SLI) * 100$.
- Proporción de brecha por N y S debida a S (%) = $Y-SLI / (Y-NLI + Y-SLI) * 100$.

Análogamente, se realizó el cálculo de la proporción de la brecha de proteína por N y S debida a cada uno de estos nutrientes, a partir de $GP-NLI$ y $GP-SLI$.

2.2.5. Análisis de datos

Las relaciones entre variables de interés se ajustaron a través de modelos lineales y no lineales generalizados, teniendo en cuenta la correlación entre errores y la heterogeneidad de varianza (funciones gls y $gnls$ del paquete $nlme$, Pinheiro et al., 2022). En presencia de heterocedasticidad, se ajustaron modelos con diferentes modelos de varianza y se ordenaron de acuerdo al valor de Bayesian Information Criterion (BIC). Se seleccionó el modelo con menor BIC (Burnham y Anderson, 2002). Los efectos de interés sobre las variables estudiadas se analizaron a través de pruebas de cociente de verosimilitud (LRT por sus siglas en inglés), bajo distribuciones χ^2 . El R^2 se calculó en base a Nagelkerke (1991).

La relación entre el rendimiento en grano y entre la concentración proteica de los granos y la cantidad de nutriente absorbido se ajustó utilizando un modelo esférico (Setiyono et al., 2010) (Ecuación 2.1).

$$y = \begin{cases} b \left(\frac{3}{2} \left(\frac{x}{c} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{c} \right)^3 \right), & \text{si } x \leq c \\ b, & \text{si } x > c \end{cases} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

donde: 'y' es el rendimiento en grano ($Mg \text{ ha}^{-1}$) o la concentración proteica de los granos (%), 'x' es la cantidad de nutriente absorbido ($kg \text{ ha}^{-1}$), 'b' es el máximo rendimiento en grano ($Mg \text{ ha}^{-1}$) o la máxima concentración proteica en grano (%) y 'c' es la mínima cantidad de nutriente absorbido necesaria para alcanzar el máximo rendimiento en grano ($kg \text{ ha}^{-1}$) o la máxima concentración proteica en grano (%).

Tanto para el rendimiento en grano como para la concentración proteica de los granos, la función de frontera superior (cuantil 90 %, Q_{90}), la mediana (cuantil 50 %, Q_{50}) y la función de frontera inferior (cuantil 10%, Q_{10}) se ajustaron a través de regresiones por cuantiles (Cade y Noon, 2003), utilizando el paquete $quantreg$ (Koenker, 2022).

El efecto de los tratamientos en cada experimento sobre el rendimiento y la concentración proteica en grano se evaluó a través de modelos lineales mixtos, utilizando el paquete $nlme$ (Pinheiro et al., 2022). En ambos modelos se consideró al tratamiento, al experimento y a la interacción experimento-tratamiento como efectos fijos, mientras que bloques anidados en experimento fue considerado efecto aleatorio.

Se evaluó la presencia de heterocedasticidad, por lo que se ajustaron distintos modelos que la contemplen y se seleccionó a través del BIC. Los contrastes entre tratamientos en cada experimento se evaluaron utilizando el paquete emmeans (Lenth, 2022). Los intervalos de confianza y los valores- p de los contrastes se ajustaron a través de la distribución t multivariada (Hothorn et al., 2008). El efecto del agregado de N y S se evaluó en todos los experimentos, mientras que la interacción N-S sólo se evaluó en los experimentos con diseño factorial completo (i.e. experimentos realizados durante 2016-2019).

La determinación de predictores de la limitación del rendimiento en grano por S (Y-SLI) se realizó a través de árboles de regresiones aleatorios (random forest) utilizando el paquete randomForest (Liaw y Wiener, 2022). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software estadístico R (R Core Team, 2022).

La relación general entre la concentración proteica y el rendimiento en grano (i.e. la relación a través de los experimentos) se evaluó a través de un modelo lineal mixto en el que se consideró el rendimiento en grano como un factor fijo, mientras que experimento, tratamiento anidado dentro de experimento y bloque anidado en experimento fueron considerados factores aleatorios.

2.3. Resultados

2.3.1. Rendimiento en grano

2.3.1.1. Rendimiento en grano logrado y potencial

La gran variabilidad explorada en los distintos ambientes (combinación de sitio-año) se reflejó en el rango de rendimiento en grano explorado, tanto en los lotes de producción (i.e. el tratamiento 'Productor', Y_a) como en los tratamientos con agregado de nutriente por encima de lo aplicado en cada lote (tratamientos '+S', '+N', '+NS', Cuadro 2.2). En términos generales, el rendimiento en grano medio logrado por los productores (Y_a) fue similar al de Y_s (i.e. 4.8 y 4.9 Mg ha⁻¹), mientras que los correspondientes a Y_N y Y_{NS} fueron superiores (i.e. 5.5 y 5.9 Mg ha⁻¹, Cuadro 2.2). El rendimiento en grano de los tratamientos nitrogenados presentó la menor variabilidad (expresada como el cociente máximo/mínimo) (i.e. ~ 2.9 y 2.3, para Y_N y Y_{NS} , respectivamente).

Cuadro 2.1. Estadísticas de resumen de variables e índices asociados a rendimiento en grano.

Variable	Media	Q25-Q75	Mín-Máx
Rendimiento en grano (Mg ha^{-1})			
Productor (Y_a)	4.8	3.8 - 5.9	1.5 - 7.6
+S (Y_s)	4.9	3.9 - 5.9	1.3 - 7.5
+N (Y_n)	5.5	4.3 - 6.7	2.6 - 7.6
+NS (Y_{NS})	5.9	5.2 - 6.7	3.4 - 8.1
Rendimiento potencial de secano (Y_w , Mg ha^{-1})	6.5	6.3 - 7.3	3.3 - 8.1
Rendimiento potencial (Y_p , Mg ha^{-1})	7.1	6.7 - 7.5	6.3 - 8.1
Brecha de rendimiento (Y_g , Mg ha^{-1})	1.7	0.8 - 2.2	0.1 - 4.7
Brecha de rendimiento (Y_g , % Y_w)	26.1	12.8 - 34.9	2.2 - 72.7
Índice de limitación por agua (WLI, % Y_p)	8.6	0 - 8.6	0 - 55.6
Índice de limitación del rendimiento en grano por N y S en conjunto (Y-NSLI, % Y_w)	14.1	5.9 - 17.9	0 - 45.5
Índice de limitación del rendimiento en grano por S (Y-SLI, % Y_w)	6.2	0.3 - 7.9	0 - 36.4
Índice de limitación del rendimiento en grano por N (Y-NLI, % Y_w)	14.6	4.6 - 20.1	0 - 52.8

El rendimiento se expresó en base seca.

Q25-Q75: cuantiles 25 y 75 %, respectivamente.

Los valores medios y el rango de valores de Y_a , Y_w e Y_p se presentan en el Cuadro 2.2. En el 50 % de los lotes evaluados el Y_a fue menor a 4.9 Mg ha^{-1} , mientras que se observaron rendimientos menores a 5.6, 6.7 y 7.1 Mg ha^{-1} para Y_n , Y_w e Y_p , respectivamente (Fig. 2.4).

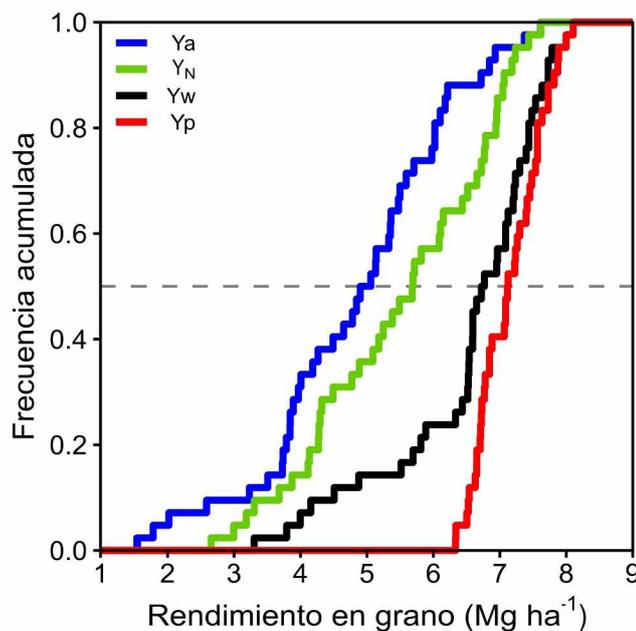


Figura 2.4. Frecuencia relativa acumulada de rendimiento en grano logrado (Y_a), rendimiento en grano tratamiento '+N' (Y_N), rendimiento en grano potencial de secano (Y_w) y rendimiento en grano potencial (Y_p). La línea discontinua indica la probabilidad acumulada del 50 %. Y_a corresponde al rendimiento en grano obtenido por el productor en las combinaciones de sitio-año (i.e. experimentos), Y_w e Y_p fueron calculados mediante el modelo de simulación Apsim Next Generation (versión 2021.1.20.5937).

2.3.1.2. Brecha de rendimiento en grano y limitaciones por N y S

Los valores medios y el rango de valores de la brecha de rendimiento en grano, la limitación del rendimiento en grano por disponibilidad hídrica, N, S y por ambos nutrientes combinados, se presentan en el Cuadro 2.2. El grado de limitación hídrica fue asimétrica (i.e. asimetría de $WLI = 1.7$, indicando asimetría positiva, con la cola de la distribución hacia la derecha). Por un lado, en el 48 % de las situaciones no se observó deficiencia hídrica ($Y_w = Y_p$) mientras que, por otro lado, el 20 % de los casos presentó limitaciones hídricas entre 22 y 56 % del Y_p (Fig. 2.5.a). Respecto a Y_g , en el 50 % de los lotes evaluados fue menor al 23 % del Y_w . Sin embargo, el 24 % de los lotes presentaron valores de Y_g comprendidos entre el 40 y 73 % del Y_w (Fig. 2.5.a). La limitación del rendimiento en grano por N y por N y S en conjunto fue similar (i.e. las curvas de frecuencia acumulada de $Y-NLI$ y $Y-NSLI$ presentaron una considerable superposición, Fig. 2.5.a). La limitación del rendimiento en grano por S ($Y-SLI$) fue menor que la observada para N y NS (Fig. 2.5.a). La proporción de Y_g debida a la nutrición con N y S fue en promedio de 0.61 (calculada como el promedio de cocientes entre la deficiencia nutricional por N y S, y Y_g en cada experimento). En el 50 % de los casos, la proporción de la brecha de rendimiento en grano debida a N y S presentó valores entre 0.36 y 0.94 (Q25-Q75). A partir de la descomposición de la limitación del rendimiento en grano debida a N y S en la contribución relativa de cada uno de estos nutrientes, se observó una contribución mayoritaria por parte del N. Del total de la limitación del rendimiento en grano debida a N y S, en el 28.5 % de los casos no se observó ninguna limitación por S, mientras que el 92.8 % de las situaciones presentó algún grado de limitación por N (Fig. 2.5.b). En el 50 % de las situaciones, sólo menos del 12.3 % de la limitación del rendimiento en grano atribuible a N y S se debió a una limitación por S, mientras que en el caso de N, representó el 74.1 % de la limitación del rendimiento en grano atribuible a N y S (Fig. 2.5.b). Por otro lado, mientras que las menores limitaciones del rendimiento en grano por N se asociaron a elevados rendimientos logrados por los productores ($p < 0.001$), la limitación del rendimiento en grano por S no se relacionó con el nivel de producción a nivel de productor ($p = 0.20$) (Fig. 2.5.c). Si bien se comprobó la existencia de una relación entre las limitaciones del rendimiento en grano debido a N y S (i.e. $Y-SLI$, $Y-NLI$ y $Y-NSLI$), la variabilidad en las observaciones es uno de los puntos más destacables ($p < 0.05$, $R^2 = 0.03$) (Fig.

2.5.d). A pesar de la dispersión observada en las observaciones, puede identificarse que la mayor frecuencia y magnitud de las limitaciones corresponden a N (i.e. Y-NLI y Y-NSLI), principalmente en las situaciones de elevado Y_w ($> 6 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Fig. 2.5.d). Por otro lado, si bien se verificó una relación entre WLI y la limitación del rendimiento en grano por N y S, la dispersión de las observaciones es una característica a mencionar ($p < 0.05$, $R^2 = 0.04$). Sin embargo, pueden identificarse dos poblaciones de situaciones: aquellos cultivos que no presentaron una limitación hídrica aunque sí algún grado de limitación por N y S (i.e. presentaron una mayor limitación por N y/o S que por disponibilidad hídrica, observaciones sobre el eje de abscisas), y aquellos casos en los que se presentaron tanto deficiencias hídricas como por N y/o S (observaciones dispersas sobre la parte central del gráfico) (Fig. 2.5.e).

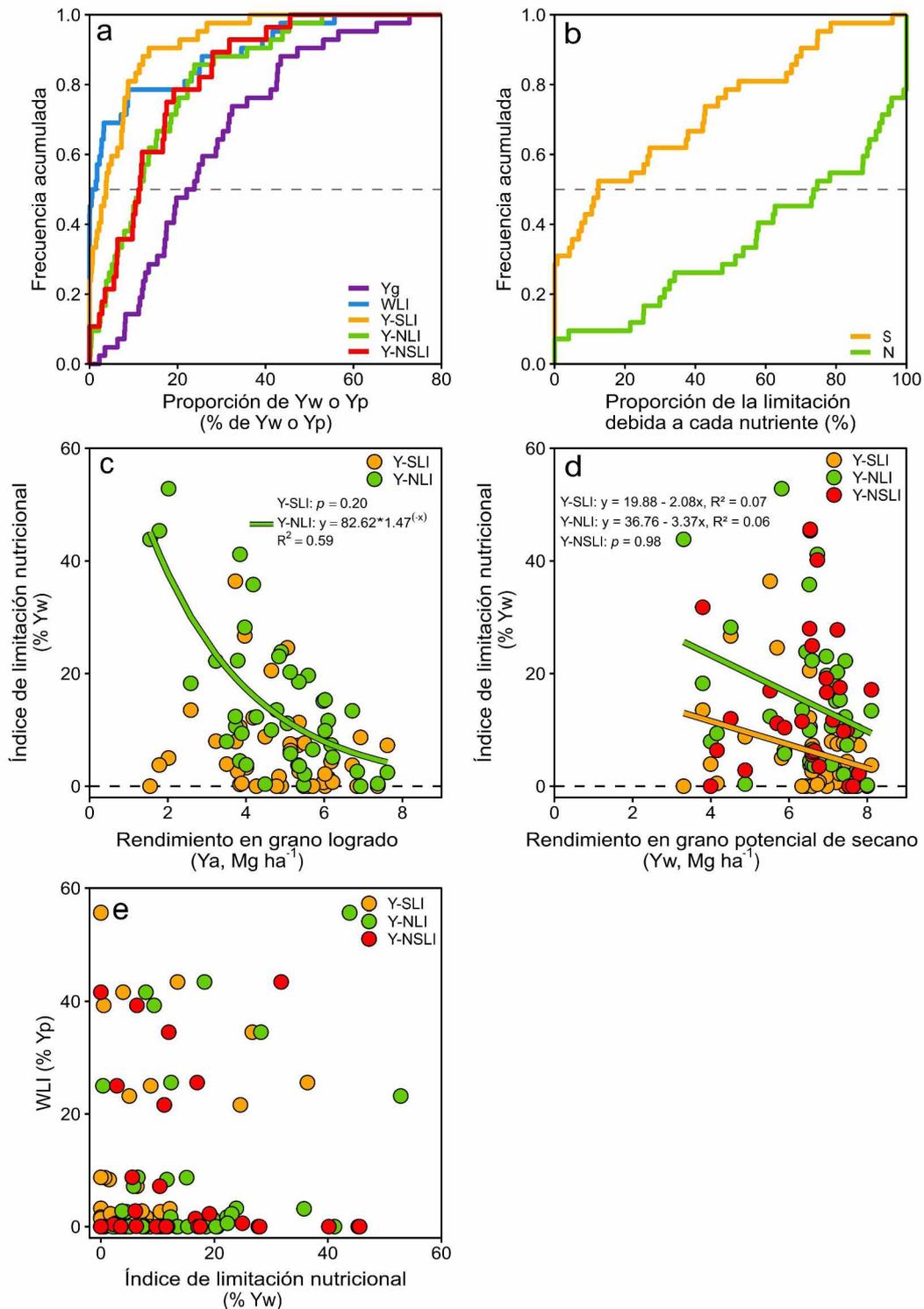


Figura 2.5. a) Frecuencia relativa acumulada de la brecha de rendimiento (Yg), el índice de limitación del rendimiento en grano por disponibilidad hídrica (WLI), S (Y-SLI), N (Y-NLI) y N y S combinados (Y-NSLI). WLI se relativizó respecto a Yp, mientras que Yg, Y-SLI, Y-NLI y Y-NSLI fueron relativizados respecto a Yw. b) Frecuencia relativa acumulada de la proporción de limitación del rendimiento en grano debida a N y S, atribuible a cada uno de estos nutrientes. La línea discontinua indica la probabilidad acumulada del 50 %. c) Relación entre los índices de limitación del rendimiento en grano por N o S y el rendimiento obtenido en cada lote. d) Relación entre los índices de limitación del rendimiento en grano por N o S y el rendimiento potencial en seco (Yw). e) Relación entre el índice de limitación del rendimiento en grano por disponibilidad hídrica (WLI) y los índices de limitación del rendimiento en grano por N o S. Cada símbolo corresponde a la media de cada variable en cada experimento.

Las principales variables que explicaron a Y-NLI fueron la fertilización nitrogenada realizada por los productores, la humedad de suelo al inicio del ciclo del cultivo, el contenido de materia orgánica del suelo e Yp. La relación entre Y-NLI y las tres principales variables mencionadas fue de forma tal que Y-NLI aumentó frente a bajas dosis de fertilización N, bajo contenido de humedad inicial en el suelo y bajo contenido de materia orgánica en el suelo (Fig. 2.6.a, b y c, respectivamente).

Las principales variables que explicaron a Y-SLI fueron el rendimiento en grano del tratamiento '+N', la humedad del suelo medida en estadios iniciales del ciclo del cultivo, el contenido de materia orgánica del suelo en el estrato superficial y WLI. El Y-SLI aumentó en condiciones conjuntas de alta disponibilidad de N y bajos rendimientos, en suelos con bajo contenido de materia orgánica en su estrato superficial y, además, en situaciones de baja disponibilidad hídrica (Fig. 2.6.d, f y e, respectivamente).

Análogamente, se observaron incrementos en el rendimiento en grano debido al agregado de S, sólo en condiciones de alta disponibilidad de N (i.e. interacción N-S) (Cuadro S.2.3.1 y S.2.3.2).

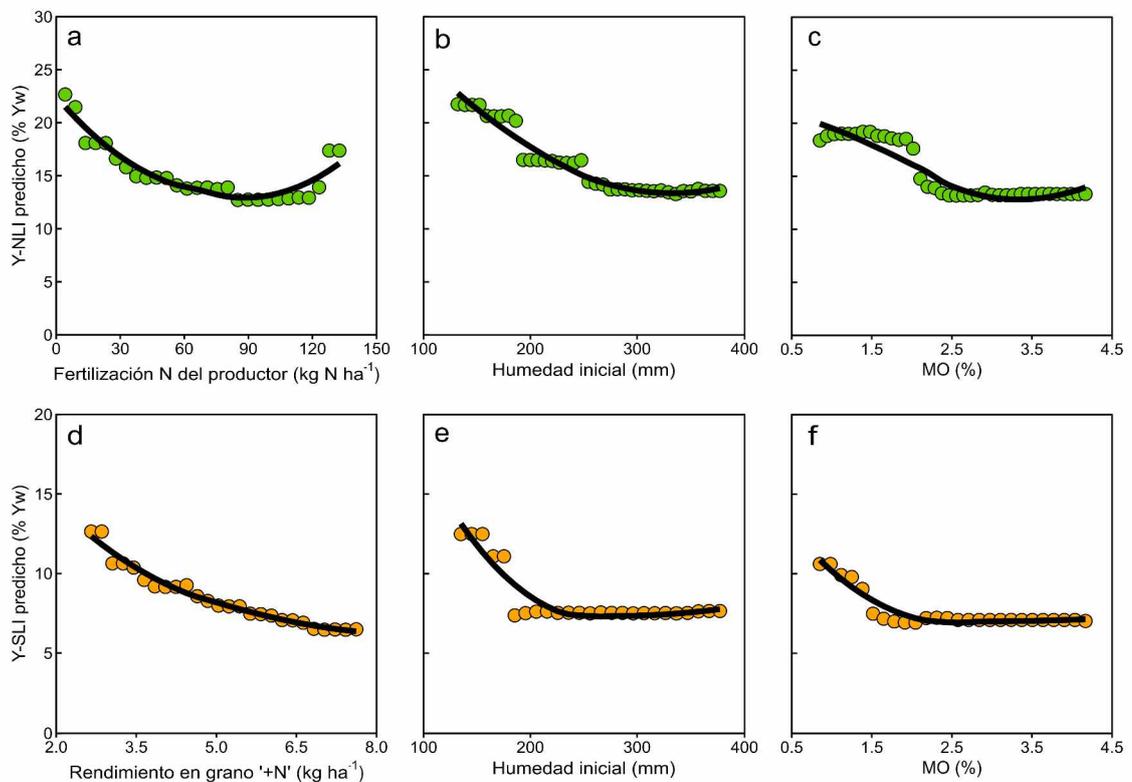


Figura 2.6. Relación entre el índice de limitación por N predicho a través del modelo de árboles de regresiones aleatorios (random forest) y a) la dosis de fertilización nitrogenada aplicada por el productor, b) el contenido de humedad del suelo a un metro de profundidad (mm), c) el contenido de materia orgánica en el estrato 0-20 cm. Relación entre el índice de limitación por S predicho a través del modelo de árboles de regresiones aleatorios (random forest) y d) el rendimiento obtenido en el tratamiento '+N', e) el contenido de humedad del suelo a un metro de profundidad (mm), f) el contenido de materia orgánica en el estrato 0-20 cm. Las curvas corresponden a las regresiones locales ajustadas (LOESS, por sus siglas en inglés). Los predichos obtenidos a partir del árbol de regresiones se calcularon en base a los efectos parciales (marginales) de las variables predictoras.

2.3.2. Proteína en grano

2.3.2.1. Proteína en grano lograda y potencial según la industria maltera

De forma análoga a rendimiento, la gran variabilidad explorada en los distintos ambientes (combinación de sitio-año) se reflejó en el rango explorado de concentración en grano, tanto en los lotes de producción (i.e. el tratamiento ‘Productor’, GP_a) como en los tratamientos con agregado de nutriente por encima de lo aplicado en cada lote (tratamientos ‘+S’, ‘+N’, ‘+NS’, Cuadro 2.3). La concentración proteica media y el rango de valores de proteína en grano obtenido en los lotes de producción (GP_a) se presentan en el Cuadro 2.3. En términos generales, el valor medio de GP_a fue similar al de GP_s (i.e. 8 y 7.9 %, Cuadro 2.3) y ambos inferiores a los observados en los tratamientos nitrogenados (i.e. 10.2 y 10.8 %, en GP_N y GP_{NS}, respectivamente). Tanto GP_a como los tratamientos nitrogenados presentaron una variabilidad similar (expresada como el cociente máximo/mínimo) (i.e. ~ 1.6, 1.9 y 1.7 en GP_a, GP_N y GP_{NS}, respectivamente), mientras que la variabilidad de GP_s fue algo superior (~ 2.4, Cuadro 2.3).

Cuadro 2.2. Estadísticas de resumen de variables e índices asociados a la concentración proteica de los granos.

Variable	Media	Q25-Q75	Mín - Máx
Proteína en grano (%)			
Productor (GP _a)	8.0	7.1 - 9.0	5.8 - 9.8
+S (GP _s)	7.9	7.2 - 8.8	4.4 - 10.9
+N (GP _N)	10.2	9.5 - 10.9	7.1 - 13.6
+NS (GP _{NS})	10.8	9.9 - 11.7	7.9 - 14.1
Brecha de proteína (GP _g , %)	2.9	2.0 - 3.8	1.1 - 5.1
Brecha de proteína (GP _g , % GP _i)	26.5	18.1 - 35.1	10.6 - 47.1
Índice de limitación de la concentración proteica por N, S y su interacción (GP-NSLI, % GP _i)	19.5	13.4 - 22.8	1.1 - 47.18
Índice de limitación de la concentración proteica por S (GP-SLI, % GP _i)	2.7	0 - 3.5	0 - 22.8
Índice de limitación de la concentración proteica por N (GP-NLI, % GP _i)	18.3	12.6 - 22.5	0.6 - 42.5

Q25-Q75: cuantiles 25 y 75 %, respectivamente.

GP_i: 11 %.

La totalidad de los lotes de producción presentaron valores de proteína menores al requerimiento medio de la industria (i.e. GP_i = 11 %, Fig. 2.7). Solamente el 11.9 % de los lotes productivos presentaron granos cuya concentración proteica se encontraba por encima del límite inferior de requerimiento de la industria (i.e. 9.5 %) (Fig. 2.7). En el caso de GP_N, sólo el 23.8 % de las situaciones presentaron valores de concentración proteica por debajo del 9.5 %, mientras que el 4.7 % presentó valores por encima del

límite superior demandado por la industria maltera. Por tanto, en la gran mayoría de las situaciones de GP_N se observaron granos aptos para la industria maltera (i.e. el 71.4 % de los casos).

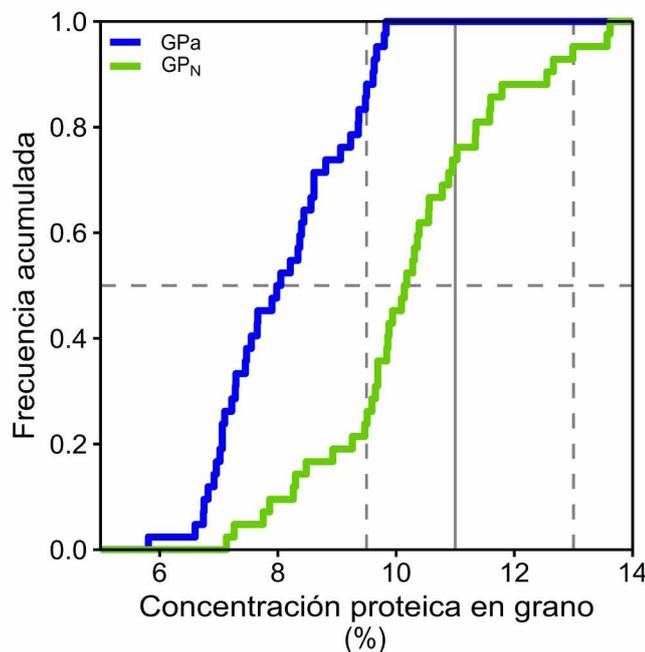


Figura 2.7. Frecuencia relativa acumulada de la concentración proteica en grano lograda por los productores (GP_a) y la correspondiente al tratamiento '+N' (GP_N). La línea discontinua horizontal indica la probabilidad acumulada del 50 %. Las líneas verticales discontinuas corresponden a las concentraciones proteicas de 9.5 y 13 % (i.e. límite inferior y superior de los requerimientos de la industria), mientras que la línea sólida corresponde al requerimiento medio de la industria (i.e. GP_i , 11 %).

2.3.2.2. Brecha de proteína en grano y limitaciones por N y S

El valor medio y el rango tanto de GP_g , como de la limitación de la concentración proteica del grano por N, S y por N y S combinados ($GP-NLI$, $GP-SLI$ y $GP-NSLI$, respectivamente) se presentan en el Cuadro 2.3. El 50 % de los lotes evaluados presentaron valores de GP_g de hasta el 27.1 % de GP_i , algo mayor al observado en Yg (i.e. 23 %) (Fig. 2.8.a). Por otro lado, solo el 4.7 % de los casos presentaron GP_g mayores al 40 % del GP_i (Fig. 2.8.a). De manera análoga a lo observado para rendimiento, la limitación de la concentración proteica en grano por N y por N y S en conjunto fueron similares (i.e. las curvas de $GP-NLY$ y $GP-NSLI$ tuvieron un elevado nivel de superposición) (Fig. 2.8.a). La proporción de GP_g debida a N y S fue en promedio de 0.73 (calculada como el promedio de cocientes entre la deficiencia nutricional por N y S, y GP_g en cada experimento). En el 50 % de los casos, la proporción de GP_g debida a N y S estuvo comprendida entre 0.63 y 1 (i.e. Q25-Q75).

Del total de la limitación de la concentración proteica por N y S, en el 50 % de los casos la limitación debida a S fue menor al 6.2 % de GP_i , mientras que en el caso de N fue de hasta el 93.7 % de la limitación de la concentración proteica en grano atribuible a N y S (Fig. 2.8.b). Tanto la limitación de la proteína por S ($GP-SLY$) como por N ($GP-NLY$) disminuyeron frente al incremento en la concentración proteica lograda a nivel de lote ($p < 0.001$). Mientras que $GP-SLI$ disminuyó ~ 1.6 % por cada punto de incremento de la concentración proteica, $GP-SNLI$ lo hizo a una tasa de ~ 3.5 % (Fig. 2.8.c). Sin embargo, $GP-NLI$ fue en promedio ~ 7 veces superior a $GP-SLI$ (Cuadro 2.3). Cuando la concentración proteica se encontraba sobre el límite inferior del requerimiento de la industria (9.5 %), la limitación por N fue de 13 %, mientras que en el caso de S fue de 0.9 % (Fig. 2.8.c). Cabe destacar que por debajo de ~ 8 % de GP_a , la variabilidad tanto de $GP-NLY$ como de $GP-SLY$ aumentó. No se observó relación entre los índices de limitación nutricional de la concentración proteica en grano debida a N y S y Y_w ($p = 0.86$ para $GP-SLI$, $p = 0.23$ para $GP-NLI$ y $p = 0.97$ para $GP-NSLI$) (Fig. 2.8.d). En

términos medios puede observarse que en la mayoría de las situaciones no se observó limitación por agregado de S (i.e. GP-SLI \sim 0), mientras que las limitaciones nitrogenadas fueron las que frecuentemente afectaron a los cultivos (Fig. 2.8.d). Por otro lado, en concordancia con el comportamiento observado con el rendimiento en grano, no se observó relación entre WLI y la limitación de la concentración proteica de los granos debida a N y S ($p = 0.54$, Fig. 2.8.e). De hecho, el patrón observado en la distribución de los puntos fue similar al de rendimiento en grano (Fig. 2.5.e), dado que se presentaron pocas situaciones en las que el rendimiento en grano estuvo limitado por disponibilidad hídrica y nutricional, y por otro lado, en la gran mayoría de las situaciones se observó una mayor limitación de la concentración proteica debida a N y S respecto a la hídrica (con preponderancia de N) (i.e. observaciones sobre el eje de las abscisas) (Fig. 2.8.e).

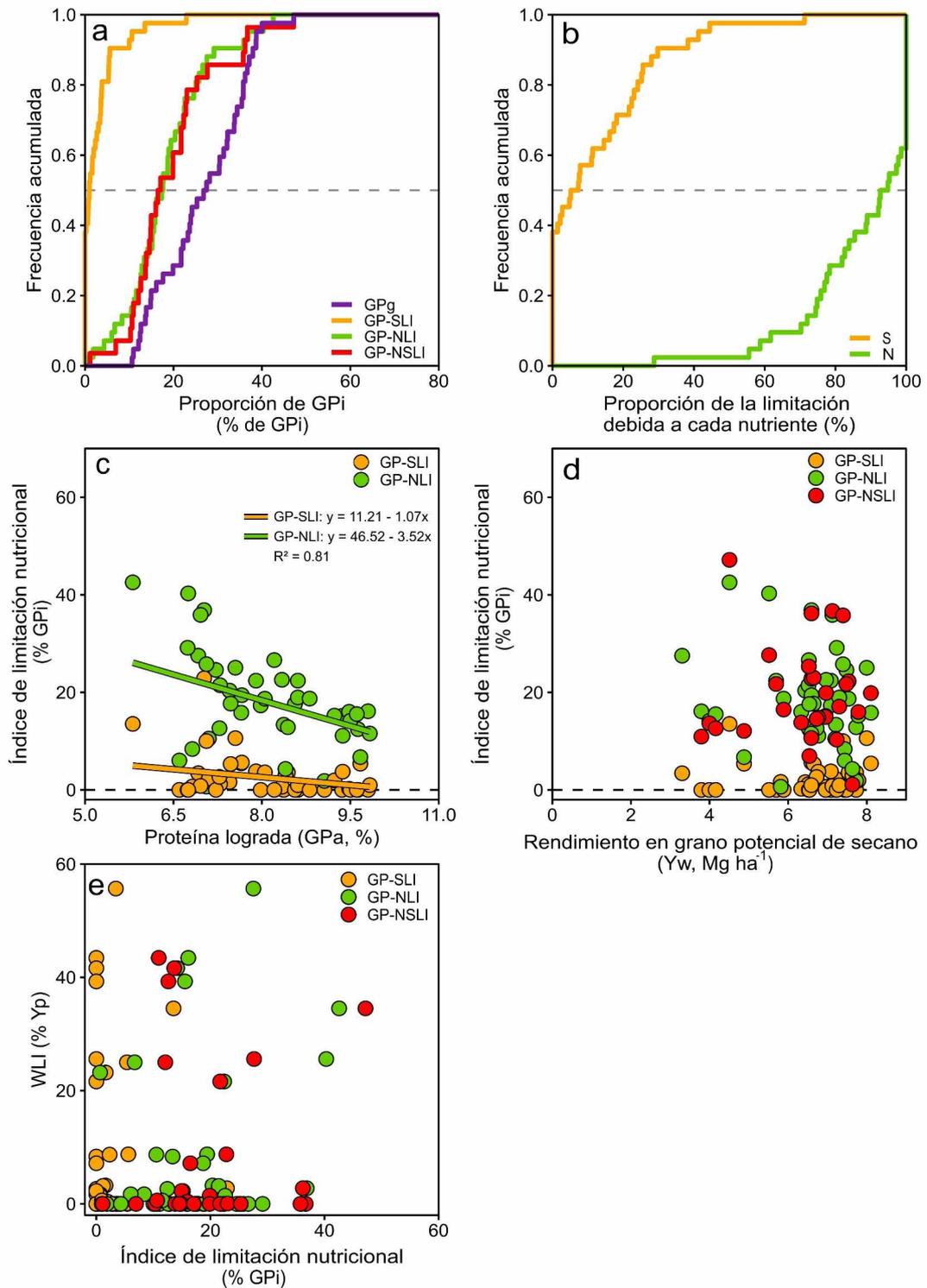


Figura 2.8. a) Frecuencia relativa acumulada de la brecha de proteína (GPg), el índice de limitación de la concentración proteica por S (GP-SLI), N (GP-NLI) y N y S combinados (GP-NSLI). b) Frecuencia relativa acumulada de la proporción de limitación de la concentración proteica de los granos debida a N y S, atribuible a cada uno de estos nutrientes. La línea discontinua indica la probabilidad acumulada del 50 %. c) Relación entre los índices de limitación por N y S y la concentración proteica obtenida en cada lote. d) Relación entre los índices de limitación de concentración proteica por N y S y el rendimiento en grano potencial en secano. e) Relación entre el índice de limitación del rendimiento en grano por disponibilidad hídrica (WLI) y los índices de limitación de concentración proteica en grano por N o S. Cada símbolo corresponde a la media de cada variable en cada experimento.

2.3.3. Relación entre rendimiento y proteína en grano

2.3.3.1. Relación entre proteína y rendimiento en grano

No se observó una asociación general entre la concentración proteica y el rendimiento en grano (i.e. la relación a través de los experimentos, $p = 0.54$). Sin embargo, la relación entre la concentración proteica de los granos y el rendimiento en grano varió según el experimento (i.e. fue distinta dentro de cada experimento, $p < 0.001$, Fig. 2.9.a). En 7 de los 42 experimentos realizados, se observó una relación positiva entre la concentración proteica y el rendimiento en grano, mientras que en 3 experimentos se observó una tendencia a asociarse positivamente entre estas variables ($p < 0.10$). En 9 de los 10 experimentos en los que se observó asociación o tendencia a asociarse entre la concentración proteica y el rendimiento en grano, la relación fue positiva (Cuadro S.2.4). La concentración proteica de los granos incrementó entre 0.5 y 2.7 % por cada tonelada de incremento en el rendimiento en grano en aquellos experimentos en los que la relación entre proteína y rendimiento en grano fue positiva. En la mayoría de los experimentos (32 de 42 experimentos) no se observó relación entre la concentración proteica y el rendimiento en grano (Cuadro S.2.4).

En cada uno de los experimentos, la concentración proteica de los granos fue modificada por los tratamientos ($p < 0.001$). Los tratamientos nitrogenados presentaron una concentración proteica mayor al promedio obtenido en cada experimento (i.e. 0.8 y 1.0 %, en '+N' y '+NS', respectivamente) (Fig. 2.9.b). Por el contrario, los tratamientos en los que no se agregó N por encima de la dosis del productor se observó una concentración proteica inferior al promedio en cada experimento (i.e. -0.7 y -0.8 %, en 'Productor' y '+S', respectivamente) (Fig. 2.9.b).

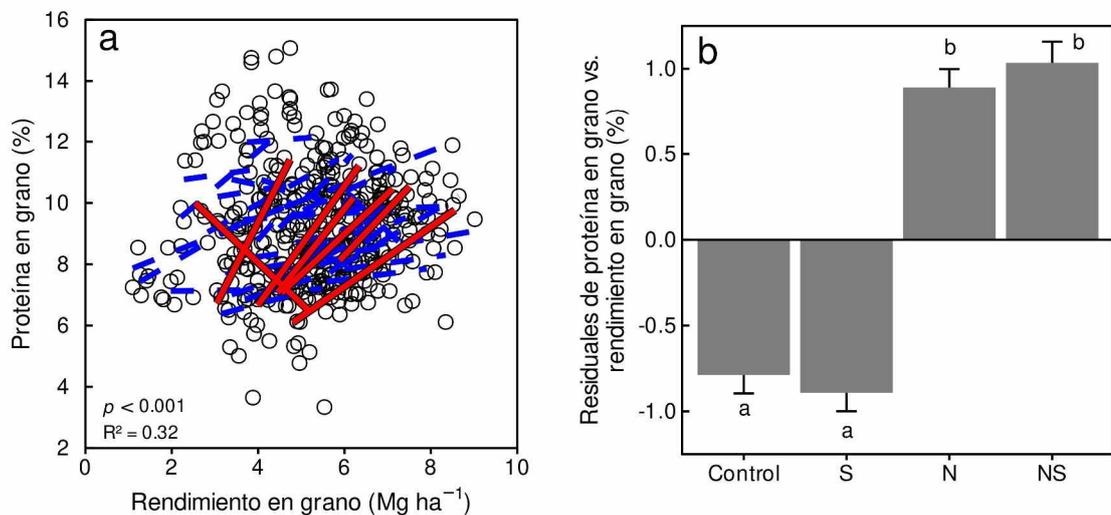


Figura 2.9. a) Relación entre la concentración proteica y el rendimiento en grano. Las líneas corresponden a los ajustes lineales en cada experimento. Las líneas discontinuas azules refieren ajustes no significativos y las líneas sólidas rojas corresponden a los ajustes lineales significativos para un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. El valor- p y el R^2 corresponden al modelo lineal ajustado. b) Efecto de los tratamientos aplicados sobre los residuales de la relación proteína-rendimiento en grano. En b) letras distintas indican diferencias entre tratamientos (al nivel de significancia de $\alpha = 0.05$).

2.3.3.2. Brecha de rendimiento y de proteína en grano

En términos de magnitud, Yg fue mayor respecto a GPg (hay mayor rango en el eje x que en el eje y), alcanzando valores de hasta el 72.7 % (Fig. 2.10.a). Sin embargo, en la

mayoría de las situaciones GPg fue mayor a Yg (i.e. el 61.9 % de las observaciones se encontraron por encima de la línea 1:1, Fig. 2.10.a). En términos medios, GPg no difirió de Yg (26.5 vs. 26.1 %, $p = 0.83$). Además, GPg no se asoció a Yg (i.e. el intervalo de confianza de la pendiente incluyó a cero).

A partir de la separación de las observaciones en función de su distribución respecto a la línea 1:1, se conformaron dos grupos de situaciones: aquellas en las que GPg fue mayor a Yg (i.e. observaciones por encima de la línea 1:1) y las situaciones en las que GPg fue menor a Yg (i.e. observaciones por debajo de la línea 1:1). En los casos en los que $GPg > Yg$, la media de GPg fue de 26.9 %, mientras que la de Yg fue de 15.7 % y, además, ambas brechas estuvieron correlacionadas ($r = 0.65$, $p < 0.001$). Por otro lado, en las situaciones en las que $GPg < Yg$, la media de Yg fue de 43.1 %, la de GPg fue de 25.9 % y no se observó relación entre ambas brechas ($p = 0.11$).

Las funciones de frontera superior e inferior y la mediana ajustadas a la relación entre el rendimiento en grano y la cantidad de N absorbido por el cultivo (RG90, RG10 y RG50, respectivamente) se representaron a través de funciones esféricas y, por tanto, presentaron un rendimiento en grano máximo o plateau (Fig. 2.10.b). La función RG90 representa a las situaciones de rendimiento en grano más elevado (i.e. los valores de rendimiento correspondientes al decil superior) para cada cantidad de N absorbido (Fig. 2.10.b). En las condiciones de más alto rendimiento en grano (función RG90), para alcanzar el máximo rendimiento en grano (i.e. 7.9 Mg ha^{-1} , parámetro b, Ec. 2.1) el cultivo requirió absorber al menos 145 kg N ha^{-1} (parámetro c, Ec. 2.1). Con este nivel de N absorbido por el cultivo (i.e. 145 kg N ha^{-1}) y en las en las situaciones de mayor dilución de N (función GP10, Fig. 2.10.c) se alcanzaría una concentración proteica en grano máxima de 9.1 %. En las condiciones medianas de rendimiento en grano (función RG50), para obtener el máximo rendimiento en grano (i.e. 6.3 Mg ha^{-1}) el cultivo requirió absorber al menos $130.1 \text{ kg N ha}^{-1}$ (Fig. 2.10.b). Para estas mismas condiciones de concentración proteica en grano (i.e. función GP50, Fig. 2.10.c), se esperaría alcanzar una concentración de hasta 9.8 % de proteína. La cantidad de N que requirió absorber un cultivo para alcanzar la concentración proteica en grano media demandada por la industria (i.e. 11 %) fue mayor a la necesaria para maximizar el rendimiento en grano (Fig. 2.10.d).

Las funciones de frontera superior e inferior y la mediana ajustadas a la relación entre la concentración proteica de los granos y la cantidad de N absorbido por el cultivo (GP90, GP10 y GP50, respectivamente) se representaron a través de funciones lineales (Fig. 2.10.c). La función GP90 de la concentración proteica de los granos representa a las situaciones correspondientes a los valores más altos de concentración proteica alcanzados para cada cantidad de N absorbido, y por tanto, se corresponde a las situaciones de máximas concentraciones de N en los granos (Fig. 2.10.c). En estas condiciones de elevada concentración proteica en grano (función GP90), para alcanzar un nivel de proteína en grano del 11 % el cultivo requirió absorber 100 kg N ha^{-1} . En las condiciones medianas de concentración proteica en grano (función GP50) el cultivo requirió absorber $161.7 \text{ kg N ha}^{-1}$ para alcanzar un nivel de proteína en grano del 11 % (Fig. 2.10.c).

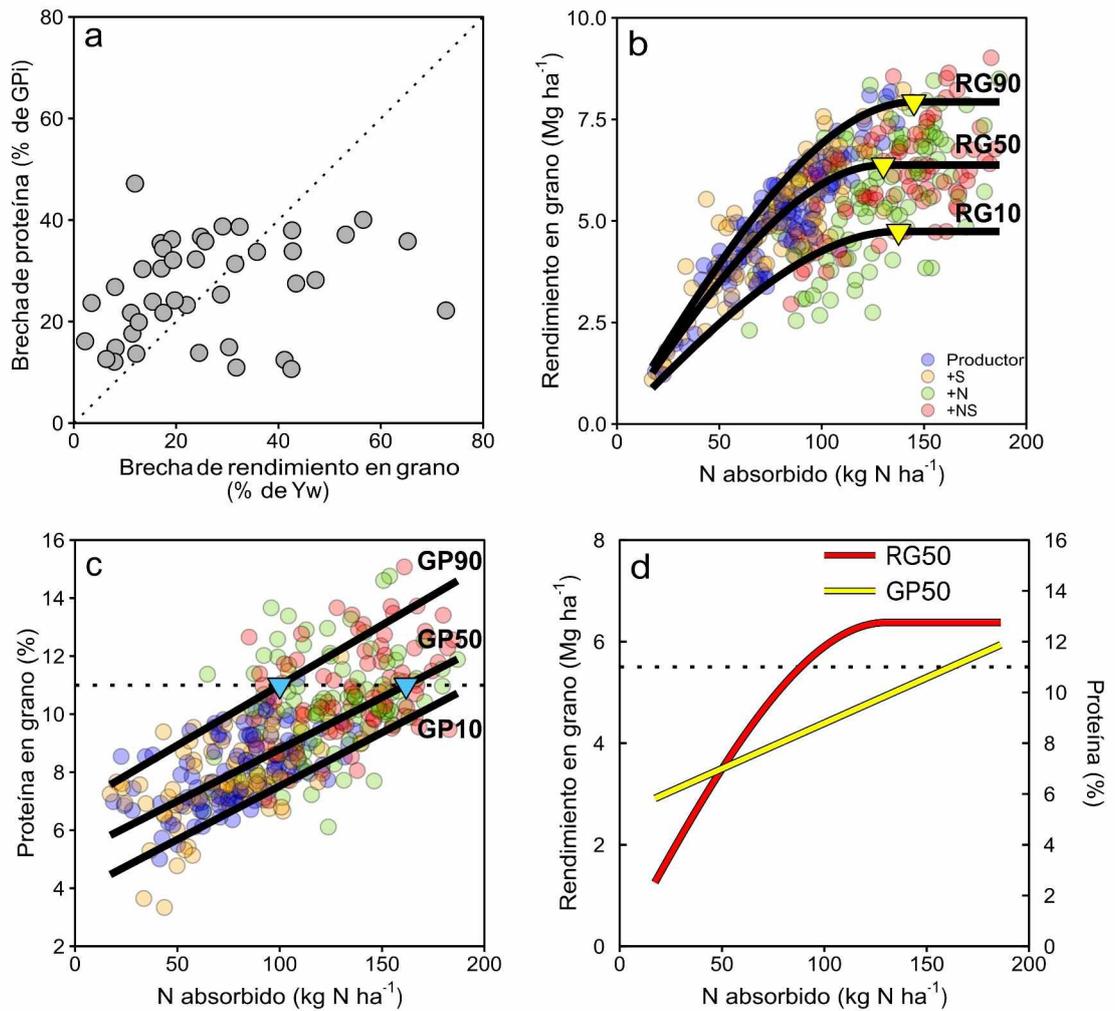


Figura 2.10. a) Relación entre la brecha de proteína y la brecha de rendimiento de cada lote. La línea punteada corresponde a la relación 1:1. Los símbolos corresponden al valor medio de las variables en cada experimento. Relación entre b) el rendimiento y c) la concentración de proteína en grano con el nitrógeno absorbido por el cultivo a madurez. d) Relación entre el rendimiento y la concentración proteica en grano en condiciones medianas, y la cantidad de nitrógeno absorbido por el cultivo (RG50 y GP50). En b) las funciones esféricas ajustadas corresponden a los cuantiles 90, 50 y 10 % (funciones RG90, RG50 y RG10, respectivamente). Los símbolos sobre las funciones indican el punto donde se alcanza el rendimiento máximo (y la cantidad de N absorbida requerida para ello). En c) las funciones lineales ajustadas corresponden a los cuantiles 90, 50 y 10 % (funciones GP90, GP50 y GP10, respectivamente). Los símbolos sobre las funciones indican el punto donde se alcanza la una concentración proteica en grano del 11 % (y la cantidad de N absorbida requerida para ello). Las situaciones correspondientes a GP10 no alcanzaron la concentración proteica en grano del 11 %. En b) y c), los colores de los símbolos corresponden a los tratamientos aplicados. Los parámetros estimados de las funciones ajustadas se presentan en el cuadro S.2.5 del material suplementario. En d) la línea roja corresponde a la función RG50, mientras que la amarilla corresponde a la función GP50. En c) y d), la línea discontinua horizontal indica el requerimiento de concentración proteica en grano de referencia de la industria (i.e. G_{Pi} , 11 %).

Las situaciones de rendimientos elevados se correspondieron con las situaciones de menor concentración proteica en grano (i.e. las observaciones inferiores a GP50 se ubicaron por encima de la porción media de rendimientos) (Fig. 2.11).

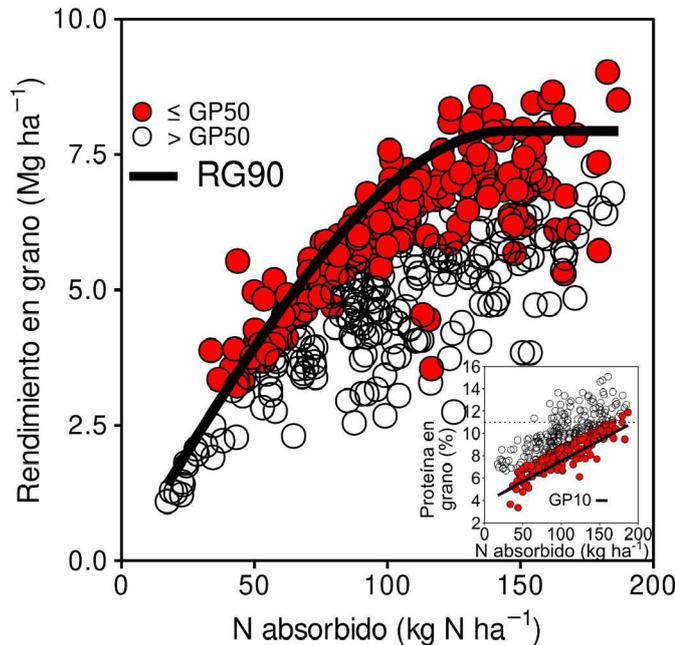


Figura 2.11. Relación entre el rendimiento y la concentración de proteína en grano (inserto) con el N absorbido por el cultivo a madurez. Los colores de los símbolos corresponden al 50 % de las observaciones con menor concentración proteica en grano (\leq GP50) (símbolos llenos) y al 50 % de las observaciones con mayor concentración proteica en grano ($>$ GP50) (símbolos vacíos).

2.4. Discusión

En el presente capítulo se cuantificaron Yg y GPg a través de la implementación de un modelo de simulación y ensayos a campo, lo que además permitió calcular el nivel de limitación nitrogenada y azufrada en ambas brechas. Se exploró una gran variabilidad de ambientes (combinación de sitio x año x tratamiento) lo cual se evidenció en el rango estudiado de rendimiento en grano (Cuadro 2.1). Los valores de rendimiento en grano explorados en el presente trabajo fueron similares a los reportados recientemente en otros trabajos realizados en la región en el cultivo de cebada cervecera y forrajera (Prystupa et al., 2018; Reussi Calvo et al., 2022). El valor medio de Yp es similar a los simulados bajo condiciones no limitantes de agua y N en la misma región en el cultivo de cebada (i.e. 7.5 Mg ha^{-1} , como promedio de la zona de estudio que comprende este trabajo) (García et al., 2018).

El valor medio de Yg fue 26.1 % de Yw (equivalente a 1.7 Mg ha^{-1} , Cuadro 2.1) y, en promedio, ~ 62 % de Yg se debió a la nutrición nitrogenada y azufrada. Del total de la limitación del rendimiento en grano debida a N y S, la mayor proporción de la limitación correspondió a N: en el 50 % de las situaciones la proporción atribuible a N fue de hasta el 74.1 %, mientras que en el caso de S sólo se alcanzaron valores mayores a esta proporción de la limitación en el 12.3 % de las situaciones (Fig. 2.5.b). En concordancia con el presente trabajo, Mueller et al. (2012) estimaron que Yg de cebada en Argentina era 30.6 % del rendimiento alcanzable, lo que equivalía a 1.08 Mg ha^{-1} (expresado en rendimientos del año 2000) y, además, que gran proporción de esta brecha de rendimiento se debía a deficiencias nutricionales. En otro estudio realizado a escala regional determinaron que Yg en el cultivo de trigo, para las dos regiones en las

que se encuentran los experimentos realizados en el presente trabajo, fue en promedio de 35 % del Y_w (equivalente a 2.1 Mg ha^{-1}) (Aramburu Merlos et al., 2015). Sin embargo, a partir del mismo trabajo y al considerar la estación meteorológica más cercana a los experimentos realizados en este estudio (i.e. Pergamino), la brecha de rendimiento para el cultivo de trigo fue de 25 % del Y_w (equivalente a 1.4 Mg ha^{-1}), el cual es un valor similar al obtenido en el presente trabajo.

En los estudios de brecha de rendimiento en grano realizados a escalas mayores (i.e. regionales y/o nacionales), tanto Y_w como Y_g se estiman a partir de una serie de años, por lo que la variabilidad en estas variables surge de la variabilidad climática durante ese periodo de tiempo (e.g. Aramburu Merlos et al., 2015; Gobbett et al., 2016). A diferencia de los trabajos realizados a escalas mayores, en el presente estudio, la variabilidad climática es mucho menor por dos motivos. Por un lado, si bien el presente estudio contempla un periodo de tiempo considerable (i.e. desde el año 2014 a 2019), la escala espacial es mucho más acotada y, por consiguiente, las precipitaciones anuales (y su distribución) fueron similares para los experimentos realizados en un mismo año. Por otro lado, si bien los experimentos fueron realizados en secano, la mayoría de los años presentaron características de húmedos: en todos los años la precipitación durante el ciclo del cultivo fue similar o se encontró por encima de la mediana, salvo el año 2016 en Junín y Nueve de Julio y el 2019 en Pergamino (Fig. 2.3). Más aún, en los años en los que las precipitaciones durante el ciclo del cultivo fueron menores a la mediana, las diferencias fueron pequeñas (i.e. las deficiencias hídricas podrían considerarse leves o moderadas), sobre todo teniendo en cuenta que en algunos de los experimentos se determinó o hubo indicios de la presencia de napa freática en la zona de influencia radical de los cultivos (Cuadro S.2.2). Como consecuencia de una baja frecuencia de ocurrencia de limitaciones hídricas severas (i.e. elevados valores de WLI, Fig. 2.5.a), el valor medio de Y_w estimado fue similar al de Y_p (6.5 y 7.1 Mg ha^{-1} , respectivamente, Cuadro 2.2).

La limitación del rendimiento en grano por S fue menos frecuente (Fig. 2.5.a) y, en general, de menor magnitud respecto a la observada en N (i.e. los valores de Q25-Q75 fueron $0.3 - 7.9$ y $4.6 - 20.1 \%$ Y_w , para Y-SLI y Y-NLI, respectivamente). Sin embargo, en algunas pocas situaciones la magnitud de Y-SLI alcanzó valores altos y comparables a los de Y-NLI (Fig. 2.5.b). Estas situaciones, que podrían considerarse deficiencias puntuales debido a la baja frecuencia de ocurrencia (i.e. sólo en el 19 % de los casos Y-SLI fue mayor a 10% Y_w , Fig. 2.5.a), correspondieron en su mayoría a los experimentos en los que se observó respuesta al agregado de S: en un experimento tendió a incrementar el rendimiento en grano frente al agregado de S solo (i.e. experimento 34) y en cuatro experimentos la respuesta al agregado de S dependió del agregado de N (i.e. interacción N-S en los experimentos 19, 25, 26 y 30, Cuadro S.2.3.1). Incluso, el otro experimento en el cual Y-SLI tuvo relevancia fue el experimento 1 que, si bien el agregado de S no fue significativo ($p = 0.10$), el intervalo de confianza del efecto S fue $(-131.9; 1503)$, lo cual permite conocer la amplitud de la diferencia estimada (Cuadro S.2.3.1). En los 4 experimentos que presentaron interacción N-S (del total de 42 experimentos realizados), el agregado de S sólo incrementó el rendimiento en grano cuando la disponibilidad de N fue elevada (i.e. $Y_{NS} - Y_N$, Cuadro S.2.3.2). A su vez, en la condición de alta disponibilidad de N (tratamiento '+N'), el rendimiento en grano se redujo en uno de los experimentos (experimento 30), tendió a reducirse en otro (experimento 19), mientras que no se modificó el rendimiento en grano en los otros dos experimentos restantes (experimentos 25 y 26, Cuadro S.2.3.2). Cabe destacar que de los 4 experimentos en los que se observó interacción N-S, sólo en el experimento 19 el productor había realizado una aplicación de 7 kg ha^{-1} de S y,

además, una gran proporción de los productores relevados en el presente trabajo no fertilizaron con S (i.e. el 41 %, Cuadro 2.1). La depresión del rendimiento en grano por agregado de N observada en los experimentos 19 y 30 ($p < 0.10$ y $p < 0.05$, respectivamente, Cuadro S.2.3.2) se puede atribuir a la exacerbación de la deficiencia de S en situaciones de alta disponibilidad de N y ha sido reportado previamente en los cultivos de maíz (Franzen et al., 2016) y colza (Grant et al., 2012). Incluso, en las parcelas correspondientes a los tratamientos '+N' del experimento 30 se observó una fuerte clorosis del tejido foliar y un menor crecimiento a simple vista en el momento de anthesis del cultivo (Fig. S.2.4 del material suplementario), que luego fue verificado a la madurez del mismo, a través del rendimiento en grano (Cuadro S.2.3.2 del material suplementario). La observación visual de la clorosis concuerda con la caracterización descrita por Franzen et al. (2016) en el cultivo de maíz frente a condiciones nutricionales similares. El otro tipo de respuesta al agregado de S observada en los experimentos con interacción N-S fue el incremento en el rendimiento en grano frente al agregado de N sólo cuando se agregó conjuntamente S, mientras que el agregado de S o N por sí solo no modificaron el rendimiento en grano (experimentos 25 y 26, Cuadro S.2.3.2). Este último tipo de respuesta al N y S ha sido reportado previamente en casos de interacción N-S en el cultivo de trigo (Salvagiotti y Miralles, 2008; Arata et al., 2017) y maíz (Sutradhar et al., 2017). Incluso, el incremento observado en Y-SLI predicho a medida que disminuye el rendimiento en grano en el tratamiento '+N' (Fig. 2.6.e) es la consecuencia directa de la presencia de interacción N-S (i.e. la mencionada exacerbación de la deficiencia S en condiciones de elevada disponibilidad de N y la subsecuente depresión del rendimiento en grano). La causa de que los síntomas de deficiencia azufrada aumenten en condiciones de elevada disponibilidad de N se desconocen (Haneklaus et al., 2007a). Por otro lado, el incremento observado tanto en Y-SLI como en Y-NLI predichos frente a condiciones de baja disponibilidad de agua al inicio del ciclo del cultivo y bajo contenido de materia orgánica en el suelo reflejan en conjunto las características de suelos de textura gruesa (Fig. 2.6.b y c para Y-NLI y Fig. 2.6.e y f para Y-SLI). En concordancia con nuestros resultados, Arata et al. (2017) observaron un incremento en el rendimiento en grano frente al agregado de S, sólo en condiciones de elevada disponibilidad de N en un experimento caracterizado con un suelo de baja fertilidad (moderado contenido de C orgánico). Análogamente, Haneklaus et al. (2007b) indican que la deficiencia de S en cultivos se suele exacerbar en situaciones de altos rendimientos en grano, suelos de textura suelta o liviana, con bajo contenido de carbono orgánico. Cabe destacar que la principal forma en que se encuentra el S en el suelo es bajo la forma de S orgánico y, además, una de las principales vías de entradas de S a los cultivos es a través de la absorción de S desde la solución del suelo, los cuales provienen de la mineralización de S desde la materia orgánica (Oenema y Postma, 2003).

Análogamente a lo observado en rendimiento en grano, se exploró una gran variabilidad en la concentración proteica de los granos (Cuadro 2.1). Los valores de concentración proteica en grano explorados en el presente trabajo fueron similares a los reportados previamente en otros trabajos realizados en la región en los que se utilizaron cultivares modernos de cebada cervecera y forrajera (Otero et al., 2021; Reussi Calvo et al., 2022), aunque el rango aquí explorado fue mayor al reportado por estos autores. El valor medio de GP_a fue similar al de GP_s, y ambos inferiores a GP_N y GP_{NS} (i.e. 8, 7.9, 10.2 y 10.8 %, respectivamente, Cuadro 2.3). Sin embargo, cabe destacar que los valores medios de todos los tratamientos fueron menores a la concentración proteica media requerida por la industria (i.e. GP_i, 11%). En concordancia con el presente

trabajo, Reussi Calvo et al. (2022) destacan como un rasgo característico de los cultivos de cebada cervecera local la baja concentración proteica de los mismos.

Un aspecto novel de la presente tesis es la aplicación del marco conceptual de la brecha (i.e. la diferencia entre un valor objetivo y uno logrado) para atributos de calidad comercial en un cultivo de grano. La brecha de proteína media fue del 26.5 % de GPi (equivalente a 2.9 %, Cuadro 2.2.3) y, en promedio, el 73.4 % de GPg se debió a la nutrición nitrogenada y azufrada. A su vez, del total de la limitación de la concentración proteica en grano debida a N y S, la mayor proporción de la limitación correspondió a N: en el 50 % de las situaciones la proporción atribuible a N fue de hasta el 93.7 %, mientras que en el caso de S sólo se alcanzaron limitaciones mayores al 40 % en el 7.1 % de las situaciones (Fig. 2.8.b).

De los 42 experimentos realizados, el agregado de N incrementó la concentración proteica de los granos en 36 de ellos, mientras que el agregado de S produjo el incremento de la proteína en grano en 3 experimentos y la redujo en 4 experimentos. Además, se observó interacción N-S en 2 experimentos (experimentos 24 y 25, Cuadro S.2.3.1), en los que el agregado de S incrementó la concentración proteica de los granos solo cuando se agregó en conjunto con N (Cuadro S.2.3.2). En el caso del experimento 25, presentó interacción N-S tanto para rendimiento como para proteína en grano, de forma que frente al agregado de S en condiciones de elevada disponibilidad de N (i.e. tratamiento '+NS') el cultivo incrementó tanto el rendimiento como la concentración proteica en grano (Cuadro S.2.3.2). En el caso del experimento 24, solo se observó interacción N-S para la concentración proteica de los granos, mientras que no se evidenció ninguna respuesta al agregado de S para el rendimiento en grano. Es ampliamente conocido el efecto positivo del agregado de N sobre la concentración proteica de los granos en el cultivo de cebada (Bulman y Smith, 1993b; O'Donovan et al., 2011; Prystupa et al., 2019). En el caso de S, hay una menor cantidad de antecedentes en el cultivo de cebada. Prystupa et al. (2019) no observaron efecto del agregado de S sobre la concentración de N de los granos. En un trabajo previo observaron una disminución de la concentración proteica de los granos frente al agregado de S en un experimento (i.e. combinación de sitio-año), sin que este tratamiento afecte al rendimiento en grano (Holopainen et al., 2015). Por otro lado, Zhao et al. (2006) observaron que el agregado de S disminuyó la concentración de N en grano en 2 de 8 experimentos (combinación sitio-año) realizados: en uno de los experimentos observó interacción N-S (i.e. el nivel de disminución de la concentración de N en grano frente al agregado de S dependía del nivel de N); en otro de los experimentos a través de un efecto principal de S.

En un sentido amplio, las brechas de rendimiento y de proteína fueron similares (i.e. ~ 26%, Cuadro 2.2 y 2.3), aunque cabe distinguir dos aspectos fundamentales que las diferencia. Por un lado, Yg fue calculada de manera relativa a Yw, el cual es una estimación de un límite fisiológico, mientras que GPg fue relativizada respecto a un valor promedio de los requerimientos de concentración proteica en grano (11 %), el cual es un parámetro que posee relevancia en la fase industrial del procesamiento del grano. Por otro lado, GPg posee una característica cualitativa por sobre la cuantitativa, y está definida en función de la base de comercialización o la tolerancia de recibo establecida en las normas que establecen los parámetros de calidad comercial de los granos. En Argentina, los granos cuya concentración proteica se encuentra por debajo del 9.5 % o por encima del 13 %, se hallan por fuera de la tolerancia de recibo (Res. 27/2013, SENASA). Esta cualidad permitiría determinar un umbral de GPg máximo que permite la comercialización de los granos (i.e. $13.6\% \text{ calculado a partir de } (11-9.5)/11 * 100$). Los granos que posean menos del 9.5 % de concentración proteica (i.e. $GPg \geq 13.6\%$)

perderían la posibilidad de ser comercializados (independientemente de que GPg sea 13.6 % o un valor mayor) y por tanto en esta situación, pierde sentido la cuantificación de GPg. Más aún, la determinación cualitativa del grano como apto para su comercialización destinada a la industria maltera (i.e. que la concentración proteica se encuentre entre 9.5 y 13 %) posee más relevancia que la cuantificación de Yg, dado que impediría la venta de los granos con destino a la industria maltera, por lo que la penalización económica tiene más relevancia por cambio de destino más que por cuantificar las pérdidas de rendimiento en grano.

GPg y Yg son independientes (i.e. el intervalo de confianza de la pendiente de la relación observada contenía a cero, Fig. 2.10.a). Sin embargo, en la mayoría de las situaciones GPg fue mayor a Yg (i.e. el 61.9 % de los casos se ubicó por encima de la línea 1:1, Fig. 2.10.a). Esto último es concordante con el hecho de que para alcanzar una concentración en grano del 11 % (i.e. GPi) el cultivo necesitó absorber una mayor cantidad de N que la requerida para alcanzar el rendimiento en grano máximo (Fig. 10.b y c). El incremento de rendimiento que se produce al considerar las condiciones asociadas al decil superior a partir de las condiciones medianas (i.e. pasar de la función RG50 a RG90 cuando el rendimiento es máximo) es del 24.3 % e implica un incremento de la cantidad de N absorbido por el cultivo de un 11.4 %. Mientras que en las situaciones de mayor concentración proteica (i.e. función GP90, Fig. 2.10.c) se alcanzó una concentración de 11 % cuando el cultivo absorbió al menos 100 kg N ha⁻¹, en las condiciones medianas de concentración proteica el cultivo requirió absorber un 61.7 % más de N para alcanzar una concentración de 11 %. Más aún, los valores observados de concentración proteica que alcanzaron el 11 % corresponden a los tratamientos nitrogenados (i.e. '+N' y '+NS', Fig. 2.10.c). En concordancia con el presente trabajo, otros autores han observado una relación curvilínea entre el rendimiento en grano y el incremento de la disponibilidad de N, mientras que la concentración proteica en grano aumentaba linealmente (McKenzie et al., 2004; O'Donovan et al., 2011). Incluso, en experimentos realizados en la misma región, Reussi Calvo et al. (2022) determinaron recientemente que la dosis de fertilizante N a la cual se maximiza el beneficio económico en función del rendimiento en grano esperado, en muchas situaciones no permitía alcanzar la mínima concentración proteica en grano requerido por la industria. La falta de asociación entre GPg y Yg puede atribuirse a la diferencia entre las cantidades de N requeridas por un cultivo para modificar el rendimiento o la concentración proteica en grano, como se mencionó anteriormente. Relativamente pequeñas variaciones en la cantidad de N absorbido por el cultivo, generan una mayor variación en Yg respecto a la que se podría generar en GPg (variación en el eje x e y, respectivamente, Fig. 2.10.a). La distinta cantidad de N absorbido requerido para modificar la concentración proteica y el rendimiento podría también explicar, al menos en parte, la clasificación en dos subgrupos de relaciones GPg-Yg (Fig. 2.10.a). En el subgrupo donde GPg > Yg (ubicados por encima de la línea 1:1), si bien en términos medios GPg es mayor a Yg, la relación entre ambas brechas es constante y, por tanto, la variación en GPg y Yg ocurre de manera similar. Dado que la limitación por N es la más importante (i.e. Y-NLI y GP-NLI), podría considerarse que la limitación por N en el subgrupo donde GPg > Yg fue relativamente pequeña o moderada, dado que ambas brechas se relacionaron de manera proporcionalmente constante. Por otro lado, en el subgrupo en el que GPg < Yg, la limitación por N fue de gran magnitud, debido a que la mayoría de las observaciones presentaron los valores más altos de GPg (11 situaciones de 16 en este subgrupo). En términos medios, este subgrupo presentó una mayor limitación N, dado que no solo se afectó su concentración proteica, sino que también el rendimiento en grano (i.e. poseen elevados valores tanto de GPg como Yg, aunque estos últimos son mayores).

A su vez, la falta de asociación entre GPg y Yg podría considerarse el reflejo de la falta de asociación entre la concentración proteica y el rendimiento en grano (i.e. la relación a través de los experimentos, Fig. 2.9.a), la cual fue estimada a partir de un modelo multinivel o jerárquico, en el que se tuvieron en cuenta tanto los grupos (i.e. experimentos) como los tratamientos y los bloques dentro de los grupos (i.e. la estructura jerárquica y la correlación implícita en ella, Snijders y Bosker, 1999). Sin embargo, al analizar dentro de cada experimento, para un mismo valor de rendimiento en grano, la concentración proteica media dependía del manejo a escala de sitio: la fertilización nitrogenada (Fig. 2.9.b). Miralles et al. (2021) recientemente evaluaron la relación entre la concentración N y el rendimiento en grano en cuatro trabajos publicados previamente, entre los que se observó una relación negativa entre estas variables en dos de los trabajos analizados, mientras que en los restantes dos no observó asociación. De los dos trabajos que presentaron relación negativa entre la concentración de N y el rendimiento en grano, la relación era más evidente en el trabajo de Prystupa et al. (2018). Miralles et al. (2021) proponían que la falta de asociación entre estas variables en los restantes trabajos recopilados podría deberse a que se trataba de situaciones de consumo de lujo de N, lo cual ocurre en situaciones en las que el N absorbido por el cultivo no conlleva a un incremento del rendimiento en grano. En el trabajo de Prystupa et al. (2018) la mayoría de las observaciones (combinaciones de experimentos-tratamiento) que conllevan a darle forma negativa a la relación entre la concentración de N y el rendimiento en grano provienen de valores de rendimiento bajos ($\sim < 2 \text{ Mg ha}^{-1}$), lo cual podría atribuirse a cultivos bajo condiciones de estrés. Además, los tratamientos empleados constan de dosis de fertilización N por lo que sería esperable que las observaciones cuyo rendimiento en grano fue $< 2 \text{ Mg ha}^{-1}$ y que a la vez posean elevada concentración de N en grano, correspondan a tratamientos fertilizados. Por lo tanto, sería el consumo de lujo en los ambientes de bajos rendimiento en grano (condiciones de estrés moderado a fuerte y moderada o alta disponibilidad de N para el cultivo) lo que genera la relación negativa entre la concentración de N y el rendimiento en grano. En concordancia con ello, Reussi Calvo et al. (2022) observaron que los cultivos de cebada que poseían una mayor concentración proteica en grano presentaban una menor respuesta del rendimiento a la fertilización N, respecto a aquellos que poseían una menor concentración proteica en grano. En el cultivo de trigo ha sido descrita una relación exponencial negativa entre la concentración de N y el rendimiento en grano con una base de datos lo suficientemente grande, en la cual la fase más curva de la función (i.e. donde ocurre una mayor variación de la concentración de N frente a cambios en el rendimiento en grano) ocurre con en casos de rendimiento en grano $< 2 \text{ Mg ha}^{-1}$, si bien el plateau de la función ajustada ocurre a un mayor valor de rendimiento en grano (Lollato et al., 2019). Cabe destacar que si bien el mejoramiento genético ha producido la disminución de la concentración de N en grano en cebada maltera, este rasgo ha sido relativamente mantenido a diferencia de lo ocurrido en otros cultivos dado que es un requisito de interés para la industria (Abeledo et al., 2008). Además de la limitación en la concentración proteica de los granos, cabe destacar que la calidad industrial de los granos de cebada cervecera depende del perfil de proteínas de reserva que poseen. Por lo tanto, tiene relevancia no sólo la concentración proteica (i.e. de N) de los granos, sino que también la de S y, en definitiva, la relación N:S en grano (Shewry et al., 2011). Resulta relevante conocer la economía interna del N y S en el cultivo (momento de absorción, removilización, partición hacia granos) y su relación con la concentración de N y S en los granos.

2.5. Conclusiones

La mayor parte tanto de Yg como de GPg se debieron a limitaciones por N. Las limitaciones por S sólo ocurrieron en determinadas situaciones, asociadas a situaciones con alta disponibilidad de N, en suelos arenosos o con baja capacidad de retención hídrica y bajo contenido de materia orgánica. Yg y GPg, en términos generales, fueron similares (i.e. ~ 26 %). Sin embargo, alcanzar la concentración proteica en grano requerida por la industria cervecera implica que el cultivo absorba una mayor cantidad de N que la necesaria para maximizar el rendimiento en grano, poniéndose ello en evidencia en los acotados rangos de GPa. Que el presente estudio se haya basado en lotes de producción y tomando como base del análisis al manejo que realizan los productores contribuye a darle solidez a los resultados y pone en evidencia la necesidad de analizar con mayor profundidad los determinantes de la concentración de proteína en el grano y las variables de calidad maltera asociadas.

CAPÍTULO 3. Partición a grano y removilización de N y S

3.1. Introducción

La manera usualmente utilizada para expresar la relación entre la cantidad de nutriente absorbido por un cultivo y el rendimiento en grano es la eficiencia de utilización interna (i.e. la relación entre el rendimiento en grano y la cantidad de nutriente absorbido, representada como EI en la Fig. 1.5) (Janssen, 1998; Dobermann, 2007). Una forma alternativa de representar la relación entre el rendimiento en grano y la cantidad de nutriente absorbido es a través de la recíproca de la EI: nutriente absorbido por unidad de rendimiento. En la literatura han sido utilizadas ambas formas de representar esta relación (Janssen, 1998; Ciampitti y Vyn, 2012; Pöttsch et al., 2019). La cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano puede interpretarse como la cantidad de nutriente disponible en un dado cultivo que puede ser particionado hacia los granos. Esta cantidad de nutriente fue absorbida por el cultivo y puede particionarse hacia los granos, en mayor o menor medida, durante el llenado de los mismos. Tal como se mencionó en el capítulo 1 (introducción general), la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano puede dividirse en dos componentes con sentido agronómico: la concentración de nutriente en grano y el índice de cosecha de nutriente (Sadras, 2006).

$$\frac{\text{Nutriente absorbido}}{\text{Rendimiento}} = \frac{\text{Nutriente en grano}}{\text{Rendimiento}} * \frac{\text{Nutriente absorbido}}{\text{Nutriente en grano}} \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

donde 'Nutriente absorbido' es la cantidad de nutriente absorbido presente en la biomasa aérea (kg ha^{-1}), 'Rendimiento' es el rendimiento en grano (kg ha^{-1}), 'Nutriente en grano' es la cantidad de nutriente absorbido presente en los granos y 'Nutriente absorbido/Rendimiento' es la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano (kg Mg^{-1}). Reordenando estos términos en la ecuación 1.2:

$$\frac{\text{Nutriente absorbido}}{\text{Rendimiento}} = \frac{\text{Concentración de nutriente en grano}}{\text{IC de nutriente}} \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

donde 'Concentración de nutriente en grano' es la concentración de nutriente en el grano e 'IC de nutriente' es el índice de cosecha del nutriente.

Dada esta relación, la concentración de nutriente en grano podría asociarse de manera directa y positiva con la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano, si el índice de cosecha de nutriente se mantuviera estable. En el caso de nitrógeno, la partición de nutriente absorbido hacia los granos (i.e. el índice de cosecha de N) depende principalmente de la removilización del nutriente absorbido pre-antesis (Barraclough et al., 2014). Es menos clara la relación entre la removilización y el índice de cosecha de S.

El contenido proteico de los granos, y por tanto la concentración de N y S en los granos, es un determinante de la calidad nutricional e industrial para varios cereales (Shewry y Halford, 2002). En cebada cervecera, la concentración de N y S en grano está relacionada con la calidad maltera. Elevada concentración de N en grano conlleva a una disminución en el extracto de malta, uno de los principales indicadores de calidad maltera, mientras que una baja concentración de N puede limitar el crecimiento de las levaduras durante la fermentación y, por tanto, también afectar el proceso de industrialización (Briggs et al., 2004). Por otro lado, la fertilización de S incrementa la

concentración de S en grano y el extracto de malta (Prystupa et al., 2019). Asimismo, varios atributos de calidad industrial en trigo (i.e. calidad y composición del gluten) se afectaron por el estatus nitrogenado y azufrado del cultivo (Zhao et al., 1999a; Ercoli et al., 2011).

En una revisión donde se compararon cultivos contrastantes (e.g. cereales vs. leguminosas) las diferencias en la eficiencia de utilización interna de nitrógeno (EIN) entre cultivos estuvo relacionada a cambios en la concentración de nutriente en el grano, mientras que el índice de cosecha de N (ICN) tuvo bajo impacto en la EIN (Sadras, 2006). Sin embargo, cuando se estudiaron las variaciones en EIN dentro del mismo tipo de cultivo, se observó que una mayor proporción de su variabilidad fue explicada por cambios en el ICN (Sadras, 2006). La EIN en cebada incrementó debido al mejoramiento genético, lo cual estuvo relacionado a un incremento en el ICN (Abeledo et al., 2008). No se reportó anteriormente análisis de la relación entre la cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento en grano y la concentración de N en grano o el índice de cosecha de N en cultivos de cebada cervecera creciendo en diferentes ambientes.

En cebada, el contenido proteico de los granos está positivamente relacionado con la disponibilidad de N del suelo y negativamente con el rendimiento en grano logrado (Prystupa et al., 2018). El cociente entre la disponibilidad de N del suelo y el rendimiento en grano estuvo relacionado al contenido proteico de los granos, y ha sido propuesto como un índice útil para calcular la cantidad de N disponible en el suelo requerido para alcanzar un determinado contenido proteico en los granos al utilizar una estimación de rendimiento en grano esperable real (Prystupa et al., 2018). Dado que el N del suelo y la absorción de N por el cultivo están normalmente correlacionados en forma positiva, sería esperable encontrar una relación similar entre la concentración de N de los granos y la cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento en grano en cebada. Si el ICN se mantuviera estable, el incremento en la cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento en grano debido al incremento en la disponibilidad de N conllevaría a un incremento proporcional en la concentración de N en los granos.

No ha sido reportado previamente si las variaciones en la cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento en grano se relacionan a cambios en la concentración de S en grano o en el índice de cosecha de S. Se sabe que la regulación de la removilización de S difiere de la de N (Veliz et al., 2014), que el S es menos móvil en la planta comparado con N (Eriksen et al., 2001), y que la partición de S a los granos es generalmente menor que la de N (Pöttsch et al., 2019). La magnitud de la respuesta de la concentración de S en grano al incrementar la disponibilidad de S tiende a ser más heterogénea que la de N (Nanamori et al., 2011; Arata et al., 2017; Prystupa et al., 2019). Si la concentración de S en grano fuera poco sensible a cambios en la cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento en grano, entonces sería muy difícil intentar cambiar la concentración de S en grano (y la relación N:S) a través de la modificación de la disponibilidad de S.

Los objetivos de este capítulo fueron:

- i) Determinar la relación entre la concentración de N y S en el grano de cebada y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento. La hipótesis de trabajo fue que la concentración de N en grano es más sensible que la de S a cambios en la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento. Comparada con N, la menor sensibilidad de la concentración de S en grano se asociada a una menor removilización de S durante el llenado de grano.
- ii) Determinar el efecto de cambios en la disponibilidad de N y S sobre las relaciones estequiométricas N:S en grano y biomasa en el cultivo de cebada. La hipótesis de trabajo fue que la relación estequiométrica N:S en grano es más estable (i.e. menor coeficiente de variación) que en biomasa vegetativa y, además, la relación

estequiométrica N:S en grano no es afectada por el ‘consumo de lujo’ de uno de los dos nutrientes si el otro no es deficiente.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Experimentos a campo

Se realizaron cincuenta experimentos con cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) en condiciones de campo durante 2014 a 2018. Estos 50 ambientes (i.e. combinaciones sitio x año) se localizaron entre 34-35 ° latitud sur y 60-61.4 ° longitud oeste, en la región pampeana, Argentina. El clima de esta zona es húmedo templado, con temperatura anual media entre 16.4 y 17.5 °C, y precipitación anual media desde 926 a 1638 mm. Los suelos más representativos de esta región son los Arguidoles y Hapludoles (Rubio et al., 2019). Los cultivares empleados en estos experimentos fueron aquellos más ampliamente adoptados por los productores durante el periodo en el que los experimentos se llevaron a cabo. Debe destacarse que cv. Andreia fue utilizado en el 72 % de los experimentos (la información de cada experimento se presentó en el Cuadro S.3.1, en el material suplementario).

Todos los experimentos contaron con tres tratamientos:

- 1) Productor: consistió en la dosis de fertilización utilizada por el productor. La dosis de fertilización media utilizada por los productores fue 60 y 4.5 kg ha⁻¹ para N y S, respectivamente.
- 2) +N: 150 kg N ha⁻¹ (años 2014/15/16 y 2018) o 250 kg N ha⁻¹ (año 2017), por sobre la dosis de fertilización utilizada por el productor.
- 3) +S: 15 kg S ha⁻¹ (años 2014/15/16) o 20 kg S ha⁻¹ (años 2017 y 2018), por sobre la dosis de fertilización utilizada por el productor.

Los 24 experimentos llevados a cabo durante los últimos tres años (2016-2018) tuvieron un cuarto tratamiento, resultando en una combinación factorial de dos niveles de agregado de N y S:

- 4) +NS: 15 kg S ha⁻¹ (año 2016) o 20 kg S ha⁻¹ (años 2017 y 2018) y 150 kg N ha⁻¹ (años 2016 y 2018) o 250 kg N ha⁻¹ (año 2017), por sobre la dosis de fertilización utilizada por el productor.

Se utilizó un diseño de bloques completos aleatorizados en todos los experimentos, con dos repeticiones en los dos primeros años y tres repeticiones en los otros tres años. Las prácticas de manejo fueron las usualmente utilizadas en cada lote de producción. El fertilizante nitrogenado (urea) y el azufrado (yeso) fue aplicado al voleo entre siembra y emergencia de los cultivos.

3.2.2 Mediciones

En antesis y madurez fisiológica, se tomaron muestras de biomasa aérea en 0.80 m² de las hileras centrales de cada parcela y fueron secadas a 65 °C hasta que alcanzar peso constante. Las muestras de madurez del cultivo fueron trilladas para determinar rendimiento en grano y rastrojo. El rendimiento en grano fue corregido a un contenido de humedad de 0.13 g H₂O g⁻¹.

En las muestras de biomasa aérea en antesis, rastrojo y grano, se determinó la concentración de N a través de digestión húmeda (Kjeldahl) y subsecuente colorimetría (Baethgen y Alley, 1989), mientras que la concentración de S fue determinada por digestión húmeda (con ácido nítrico y perclórico) y subsecuente turbidimetría (San Martín et al., 1987). Tanto para N como S, el contenido de nutriente en biomasa aérea

en antesis, en rastrojo y grano fue calculado como el producto de la concentración de N o S y la cantidad de biomasa aérea en antesis, rastrojo y grano (en base seca). La cantidad de N y S absorbido a la madurez del cultivo se calculó como la suma del contenido de N o S en grano y rastrojo. El índice de cosecha de N y S se calculó como el cociente entre el contenido de N o S en el grano y la cantidad de N o S absorbido a madurez. La removilización de N y S se calculó como la diferencia entre el contenido de N o S en biomasa aérea en antesis y el contenido de N o S en rastrojo a madurez. La eficiencia de removilización de N y S se calculó como el cociente entre la cantidad de N o S removilizado y el contenido de N o S en biomasa aérea en antesis (Przulj y Momcilovic, 2001; Abeledo et al., 2008). La relación N:S en grano se calculó como el cociente entre la concentración de estos nutrientes en el grano, mientras que la relación N:S en biomasa aérea se calculó como el cociente entre la cantidad de estos nutrientes absorbido a madurez.

3.2.3 Análisis de datos

La relación entre el rendimiento en grano y la cantidad de nutriente absorbido se ajustó utilizando un modelo esférico (Setiyono et al., 2010) (Ecuación 2.1).

$$y = \begin{cases} b \left(\frac{3}{2} \left(\frac{x}{c} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{c} \right)^3 \right), & \text{si } x \leq c \\ b, & \text{si } x > c \end{cases} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

donde: 'y' es el rendimiento en grano (kg ha^{-1}), 'x' es la cantidad de nutriente absorbido (kg ha^{-1}), 'b' es el rendimiento potencial en grano (kg ha^{-1}) y 'c' es la mínima cantidad de nutriente absorbido necesaria para alcanzar el rendimiento en grano potencial (kg ha^{-1}). Tanto para N como para S, la función de borde superior (cuantil 95 %, Q95); la mediana (cuantil 50 %, Q50) y la función de borde inferior (cuantil 5 %, Q05) se ajustaron a través de regresiones por cuantiles (Cade y Noon, 2003), utilizando el paquete *quantreg* en el software estadístico R (Koenker, 2022; R Core Team, 2022). EIN y EIS se calcularon como el cociente entre el rendimiento en grano al 80 % del rendimiento en grano potencial (parámetro b, Ec. 2.1) y la cantidad de nutriente absorbido a ese nivel de rendimiento en grano, asumiendo que la eficiencia de utilización interna permanece constante hasta alcanzar el 80 % del rendimiento en grano potencial (Dobermann y Cassman, 2002). La mínima, media y máxima EIN y EIS se estimaron a partir de las funciones de borde inferior, media y de borde superior, respectivamente.

La proporción de varianza de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano atribuible a sus componentes (i.e. concentración de nutriente en grano e índice de cosecha de nutriente) se estimaron a través de coeficientes de regresión parcialmente estandarizados (Sokal y Rohlf, 1995). La estimación de los componentes de la varianza atribuibles a ambiente, tratamiento y la interacción ambiente-tratamiento se realizó para todas las variables evaluadas. Para este propósito, se ajustaron modelos lineales de efecto aleatorios (sin efectos fijos) utilizando el paquete *lme4* (Bates et al., 2015), los cuales incluyeron ambiente, tratamiento, la interacción ambiente-tratamiento y bloque anidado dentro de ambiente.

Los valores de concentración de nutriente relativa se calcularon como el cociente de los valores de concentración de nutriente en grano observados y el valor mínimo de concentración de nutriente en grano predicho a partir del ajuste de la relación entre concentración de nutriente en grano y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano, para N y S. Los valores de índice de cosecha de nutriente relativo

se calcularon como el cociente de los valores de índice de cosecha observados y los valores del plateau estimado a partir de la relación entre el índice de cosecha de nutriente y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano, para N y S. Los valores de la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano relativa se calcularon como el cociente de los valores de la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano observados y el valor mínimo de cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano observado, para N y S.

Las relaciones entre variables de interés se ajustaron a través de modelos lineales y no lineales generalizados con el paquete nlme (Pinheiro et al., 2022). En presencia de heterocedasticidad, se ajustaron modelos con diferentes modelos de varianza y se ordenaron de acuerdo al valor de Bayesian Information Criterion (BIC). Se seleccionó el modelo con menor BIC (Burnham y Anderson, 2002). El R^2 de los modelos ajustados se calculó en base a Nagelkerke (1991).

Las relaciones estequiométricas de N y S en grano y biomasa se ajustaron y analizaron a través del método de ejes principales estandarizados (SMA, por sus siglas en inglés) (Warton et al., 2006), utilizando el paquete smatr (Warton et al., 2012). En las relaciones estequiométricas se utilizaron modelos potenciales ($y = a x^b$), aunque los modelos se ajustaron y analizaron en su forma logarítmica ($\log_{10} y = \log_{10} a + b \log_{10} x$). Para determinar si la cantidad de N o S absorbido por unidad de rendimiento en grano afectó las relaciones estequiométricas, las observaciones se clasificaron de acuerdo a su nivel de N o S absorbido por unidad de rendimiento en grano. Se consideró que cada observación provenía de un cultivo con alto o bajo nivel de N o S, de acuerdo a si se encontraba por encima o por debajo de la mediana de N o S absorbido por unidad de rendimiento en grano. Por tanto, los datos se dividieron en cuatro grupos, granos que provenían de cultivos con i) $N_{bajo} - S_{bajo}$, ii) $N_{bajo} - S_{alto}$, iii) $N_{alto} - S_{bajo}$, y iv) $N_{alto} - S_{alto}$. Para estos cuatro grupos, se ajustaron modelos potenciales y se compararon los parámetros de las funciones ajustadas.

3.3. Resultados

3.3.1. N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano

En el Cuadro 3.1 se muestran la media y el rango de valores de rendimiento en grano y la cantidad de N y S absorbido. El amplio rango de rendimiento en grano y nutriente absorbido refleja la gran variabilidad de los ambientes explorados (i.e. clima, suelos y prácticas de manejo) y los tratamientos aplicados (i.e. nutriente adicionado en cada ambiente). La fuente principal de variación para N absorbido por unidad de rendimiento en grano fueron los tratamientos (i.e. 45.9 % de la varianza total), mientras que en el caso de S absorbido por unidad de rendimiento en grano, la fuente principal de variación fue ambiente (39.6 % de la varianza total).

Cuadro 3.1. Estadísticas descriptivas.

Variable	Media	Q25-Q75	Mín - Máx
Rendimiento en grano (kg ha ⁻¹)	5905	4565 – 7195	1520 – 9317
Nitrógeno absorbido a madurez (kg ha ⁻¹)	100.6	74.6 – 130.9	21.0 – 172.3
CNG (g N kg ⁻¹)	14.71	12.57 – 16.74	7.06 – 23.39
ICN	0.76	0.73 – 0.81	0.41 – 0.89
Nitrógeno absorbido a antesis (kg ha ⁻¹)	87.1	59.2 – 110.3	13.9 – 191.6
Removilización de nitrógeno (kg ha ⁻¹)	61.3	39.7 – 76.5	3.6 – 147.2
Eficiencia de removilización de nitrógeno (%)	69.6	66.1 – 77.5	2.1 – 87.8
Azufre absorbido a madurez (kg ha ⁻¹)	9.3	7.0 – 11.7	2.2 – 18.6
CSG (g S kg ⁻¹)	1.08	0.98 – 1.19	0.53 – 1.45
ICS	0.60	0.53 – 0.66	0.40 – 0.77
Azufre absorbido a antesis (kg ha ⁻¹)	7.3	5.1 – 9.1	1.2 – 17.6
Removilización de azufre (kg ha ⁻¹)	3.58	2.15 – 4.75	0.11 – 9.72
Eficiencia de removilización de azufre (%)	46.3	38.1 – 56.2	2.5 – 72.3
N:S en grano (g N g S ⁻¹)	14.11	11.85 – 14.89	8.25 – 33.98
N:S en biomasa aérea (g N g S ⁻¹)	11.31	8.80 – 12.24	5.57 – 38.11

El rendimiento en grano fue corregido a 0.13 g H₂O g grano⁻¹.

Q25-Q75: cuantiles 25 y 75%.

CNG y CSG: Concentración de nitrógeno y azufre en grano, respectivamente.

ICN e ICS: Índice de cosecha de nitrógeno y azufre, respectivamente.

La relación entre el rendimiento en grano y la cantidad de nutriente absorbido se caracterizó a través de funciones de borde superior, de mediana y de borde inferior, para N y S (Fig. 3.1, Cuadro 3.2). Las funciones de borde superior correspondieron a las situaciones donde se alcanzó el máximo rendimiento en grano para una dada cantidad de nutriente absorbido por el cultivo, y por tanto, a las situaciones de máxima dilución del nutriente (i.e. mínima cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano). La fase lineal de la función de borde superior corresponde a las situaciones de deficiencia y de máxima EI para un determinado nutriente. Por el contrario, las funciones de borde inferior corresponden a las situaciones donde se alcanzó el mínimo rendimiento en grano para una dada cantidad de nutriente absorbido por el cultivo (i.e. máxima cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano), y se corresponden con la máxima concentración y la mínima EI de nutriente. La cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento en grano (Nabs/R) máxima, mediana y mínima estimadas fueron 23.1, 14.1 y 12.2 kg N Mg grano⁻¹, respectivamente (i.e. se corresponden a la EIN mínima, mediana y máxima de 43.1, 70.8 y 81.3 kg grano kg N⁻¹, respectivamente). La cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento en grano (Sabs/R) máxima, mediana y mínima estimadas fueron 2.2, 1.5 y 0.9 kg S Mg grano⁻¹, respectivamente (i.e. se corresponden a la EIS mínima, mediana y máxima de 437, 643 y 1002 kg grano kg S⁻¹, respectivamente).

La principal fuente de variación en la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano fue el cambio en la concentración de nutriente en grano: 63.8 % para N y 56.8 % para S. El ICS representó 40.1 % de la varianza de Sabs/R, mientras que el ICN representó el 33.9 % de la varianza de Nabs/R. Para ambos, N y S, la concentración de nutriente en grano presentó una baja asociación con el índice de cosecha de nutriente ($R^2 < 0.09$).

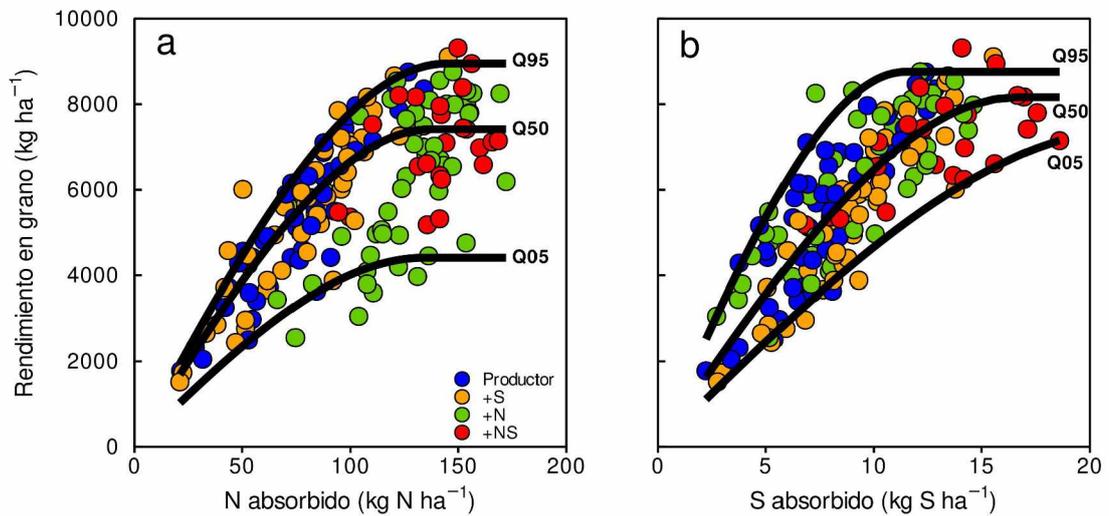


Figura 3.1. Relación entre el rendimiento en grano y a) la cantidad de nitrógeno absorbido, y b) la cantidad de azufre absorbido. El color de los símbolos indica el tratamiento. Las líneas llenas indican los modelos ajustados a cada cuantil (Q95: 95%, Q50: 50 % y Q05: 5 %). Los parámetros de los modelos ajustados a cada cuantil, para N y S, se muestran en el Cuadro 3.2. Cada símbolo corresponde al valor medio de cada combinación experimento-tratamiento.

Cuadro 3.2. Parámetros ajustados a las funciones de borde superior (Q95), mediana (Q50) y de borde inferior (Q05) para la relación entre rendimiento y la cantidad de nutriente absorbido. Los valores entre paréntesis corresponden a los intervalos de confianza de los parámetros a un nivel de 95%.

Nutriente	Función por cuantil	Parámetro de la función	
		b	c
N	Q95	8950 (8589; 9311)	144.6 (133.4; 155.8)
	Q50	7416 (6886; 7946)	137.6 (120.0; 155.2)
	Q05	4410 (3561; 5259)	134.4 (80.9; 187.9)
S	Q95	8759 (8432; 9085)	11.4 (10.3; 12.6)
	Q50	8165 (7398; 8931)	16.6 (14.2; 19.1)
	Q05	7457 (6086; 8828)	22.4 (17.0; 27.7)

3.3.2. Concentración de N y S en grano

Las estadísticas de resumen de la concentración de N y S en grano (CNG y CSG, respectivamente) se muestran en el Cuadro 3.1. La principal fuente de variación en CNG fue tratamiento (~ 47 %), mientras que para CSG, la mayor contribución la realizó ambiente (~ 39 %). La variabilidad relativa de la concentración de nutriente en grano, calculada como el cociente del cuartil 75 y el cuartil 25, fue similar para N y S (i.e. $Q75/Q25 \sim 1.3$ y ~ 1.2 , para CNG y CSN, respectivamente).

La CNG y CSG se asociaron de manera curvilínea con la cantidad de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano (Fig. 3.2.a y b). La relación entre CSG y Sabs/R presentó mayor variabilidad respecto a la relación entre CNG y Nabs/R ($R^2 = 0.62$ y 0.82 , para S y N, respectivamente).

En términos relativos, CNG tendió a incrementar tres veces, mientras que CSG a duplicarse a medida que se incrementó la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano (Fig. 3.3.a y b, para N y S, respectivamente). El valor máximo de concentración de nutriente en grano relativa (i.e. la asíntota de la función exponencial) fue ~ 3 para N y ~ 2 para S. Además, en el caso de S, los valores cercanos a la máxima concentración relativa se alcanzaron cuando Sabs/R se triplicó, mientras que para N los valores máximos de concentración relativa no se alcanzaron ni cuando Nabs/R se cuadruplica (Fig. 3.3.a y b).

3.3.3. Índice de cosecha de N y S

La media y el rango de valores de índice de cosecha de N y S se muestran en el Cuadro 3.1. La relación entre el índice de cosecha de nutriente y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano presentó un patrón similar para N y S. Se ajustó una función plateau-lineal a cada nutriente, donde presentó una fase en la cual el índice de cosecha de nutriente permanecía constante, y luego de superado un valor umbral, presentaba una asociación negativa con la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano. Para ambos nutrientes, el modelo plateau-lineal presentó un mejor ajuste respecto a un modelo lineal simple (i.e. una recta, $p < 0.001$).

En términos relativos, el ICS comenzó a disminuir a una menor cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano respecto a lo que ocurrió con el ICN (Fig. 3.3.c y d, para el ICN e ICS, respectivamente). Si bien ambas relaciones en su fase lineal fueron negativas, la tasa de disminución fue mayor para S respecto a N (Fig. 3.3.c y d). La pendiente de la fase lineal de la función fue 82 % más inclinada (i.e. menor pendiente) en S, respecto a N. En consecuencia, cuando la cantidad de nutriente por unidad de rendimiento en grano de ambos nutrientes se triplicó, el ICS disminuyó más del doble de lo que lo hace el ICN, en términos relativos.

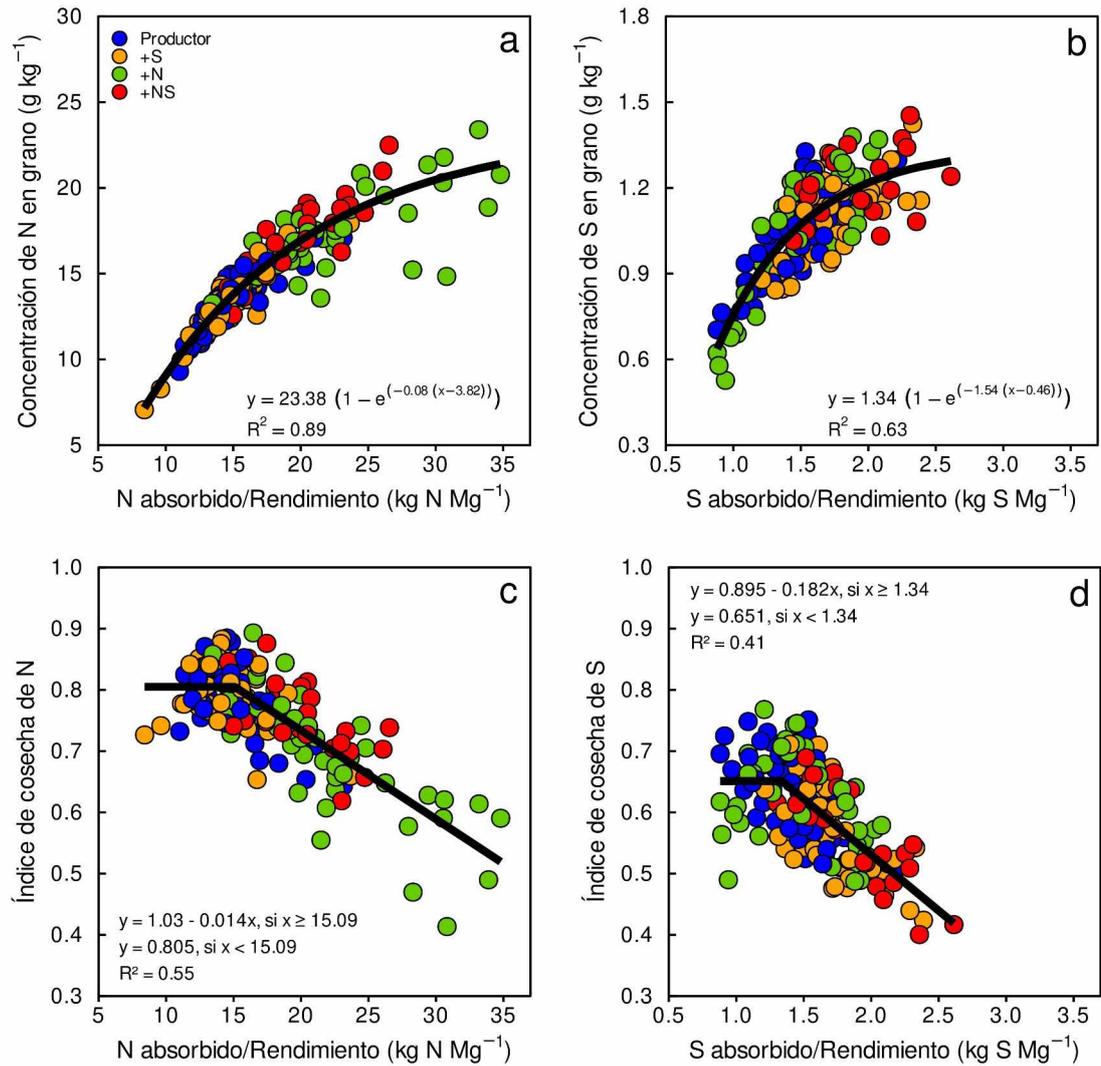


Figura 3.2. Relación entre a) la concentración de nitrógeno en grano y la cantidad de nitrógeno absorbido por unidad de rendimiento en grano, b) la concentración de azufre en grano y la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano, c) el índice de cosecha de nitrógeno y la cantidad de nitrógeno absorbido por unidad de rendimiento en grano, d) el índice de cosecha de azufre y la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano. El color de los símbolos indica el tratamiento. Cada símbolo corresponde al valor medio de cada combinación experimento-tratamiento.

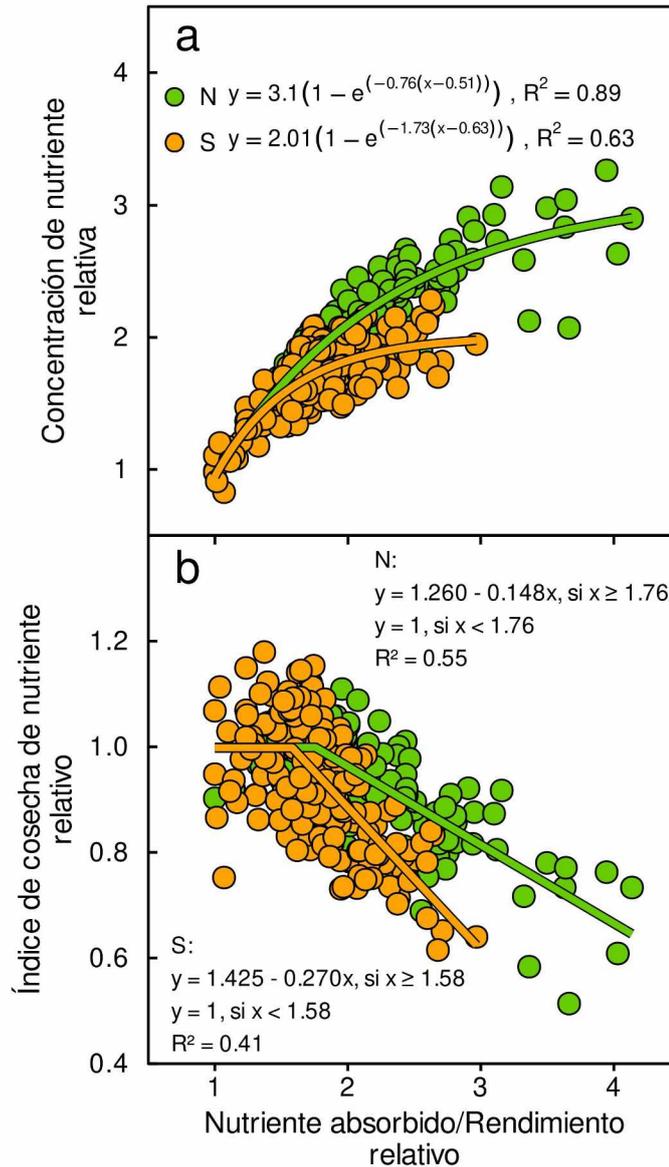


Figura 3.3. Relación entre a) la concentración de nitrógeno en grano relativa y la cantidad de nitrógeno absorbido por unidad de rendimiento en grano relativa, b) la concentración de azufre en grano relativa y la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano relativa, c) el índice de cosecha de nitrógeno relativo y la cantidad de nitrógeno absorbido por unidad de rendimiento en grano relativa, d) el índice de cosecha de azufre relativo y la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano relativa. La concentración de N y S en grano relativa es relativa al mínimo valor predicho para CNG y CSG, respectivamente. El índice de cosecha de N y S relativo es relativo al valor del plateau para el ICN y el ICS, respectivamente. La cantidad de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano relativa es relativa al valor mínimo observado de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano, respectivamente. Cada símbolo corresponde al valor medio relativo de cada combinación

experimento-tratamiento.

3.3.4 Removilización y eficiencia de removilización de N y S

La media y el rango de valores de cantidad de nutriente absorbido en anátesis, removilizado y la eficiencia de removilización, para N y S, se muestran en el Cuadro 3.1. La concentración de N y S en grano estuvo débilmente asociada a la cantidad de N y S removilizado, respectivamente ($r = 0.35$ y 0.23 , para N y S, respectivamente). CNG se asoció levemente a la eficiencia de removilización de N ($r = -0.40$, $p < 0.001$), mientras que no se observó asociación entre CSG y la eficiencia de removilización de S ($p = 0.20$). Tanto el índice de cosecha de N como el de S no se asociaron a la cantidad de N y S removilizado, respectivamente ($p = 0.18$ y $p = 0.62$, para N y S). Sin embargo, el índice de cosecha de N y S se relacionaron con la eficiencia de removilización de estos nutrientes ($r = 0.61$ y $r = 0.43$, para N y S, respectivamente).

La eficiencia de removilización de N fue mayor que la observada para S (en promedio, la eficiencia de removilización de N fue 69.6 % y la de S fue 46.3 %, Cuadro 3.1). Tanto

la eficiencia de removilización de N como la de S disminuyeron al incrementar la cantidad de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano, respectivamente ($p < 0.001$, Fig. 3.4.a y b, para N y S). Sin embargo, la disminución en la eficiencia de removilización de N fue menor que la observada en S (i.e. 9 y 18.3 %, para N y S, respectivamente).

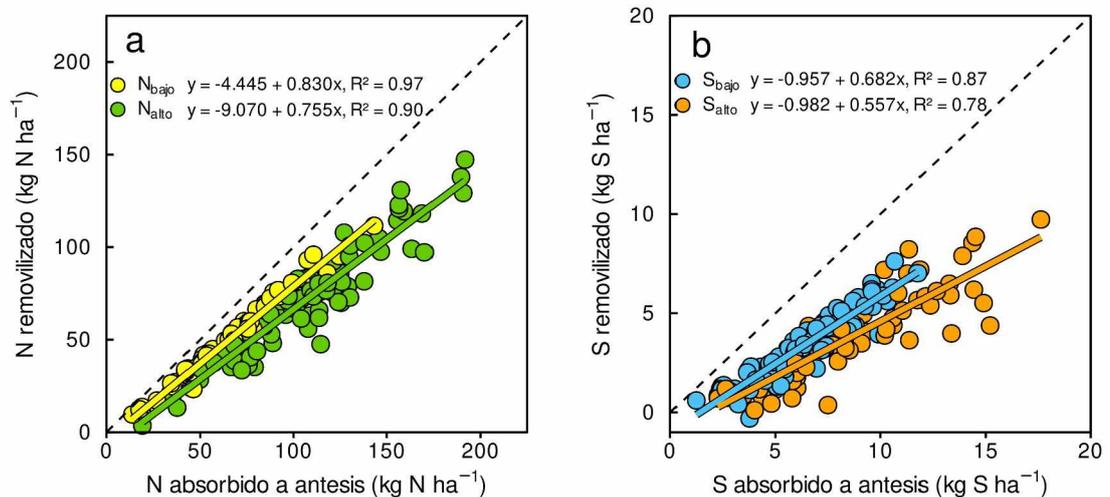


Figura 3.4. Relación entre a) la cantidad de nitrógeno removilizado y la cantidad de nitrógeno absorbido en anthesis, b) la cantidad de azufre removilizado y la cantidad de azufre absorbido en anthesis. En a), símbolos y línea amarillos indican baja cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento en grano, símbolos y línea verdes indican alta cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento en grano. En b) símbolos y línea celeste indican baja cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento en grano, símbolos y línea anaranjados indican alta cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento en grano. La línea punteada corresponde a la línea 1:1. Las categorías de bajo y alto para la cantidad de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano corresponden a observaciones por debajo y por encima de la mediana de cada uno de estos nutrientes. Cada símbolo corresponde al valor medio de cada combinación experimento-tratamiento.

3.3.5. Relación N:S en grano y estequiometría

Los valores de la relación N:S en grano se resumen en el Cuadro 3.1. La relación N:S en grano estuvo más asociada a la cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento en grano que a la de S ($R^2 = 0.47$ y $R^2 = 0.01$ para N y S, respectivamente) (Fig. 3.5).

La relación estequiométrica N:S en grano fue afectada por la cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento en grano ('N_{alto} - S_{bajo}' vs. las otras condiciones, $p < 0.001$). Las situaciones de bajo N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano no difirieron de aquellas con alto N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano ($p = 0.54$). Además, estas condiciones balanceadas de N y S ('N_{bajo} - S_{bajo}' y 'N_{alto} - S_{alto}') no difirieron de la condición 'N_{bajo} - S_{alto}' ($p = 0.77$, Fig. 3.6.a). En las condiciones en las que el N y S estuvieron balanceadas ('N_{bajo} - S_{bajo}' y 'N_{alto} - S_{alto}'), como aquellas con alto S ('N_{bajo} - S_{alto}'), se observó un patrón casi isométrico para la relación N:S en grano (i.e. la pendiente fue ~ 1.1). La relación N:S en biomasa aérea presentó un comportamiento similar al hallado en la relación N:S en grano. La relación estequiométrica en biomasa fue afectada sólo en la condición de alto N absorbido por unidad de rendimiento en grano ('N_{alto} - S_{bajo}' vs. el resto de las condiciones, $p < 0.001$) (Fig. 3.6.b). La proporción de acumulación de N en relación a la de S para las situaciones de balance entre N y S

($N_{\text{bajo}} - S_{\text{bajo}}$ y $N_{\text{alto}} - S_{\text{alto}}$) como para la de alto S absorbido por unidad de rendimiento ($N_{\text{bajo}} - S_{\text{alto}}$), fue similar a la observada en grano (~ 1.1). Tanto en grano como en biomasa aérea, la relación N:S fue más variable en la situación de alto N absorbido por unidad de rendimiento respecto a las demás condiciones (menor R^2 en $N_{\text{alto}} - S_{\text{bajo}}$ respecto a las otras, Fig. 3.6.a y b, para grano y biomasa, respectivamente). La relación N:S en grano presentó menor variabilidad respecto a la observada en biomasa aérea (el coeficiente de variación fue 28.5 y 40.8 %, para grano y biomasa aérea, respectivamente).

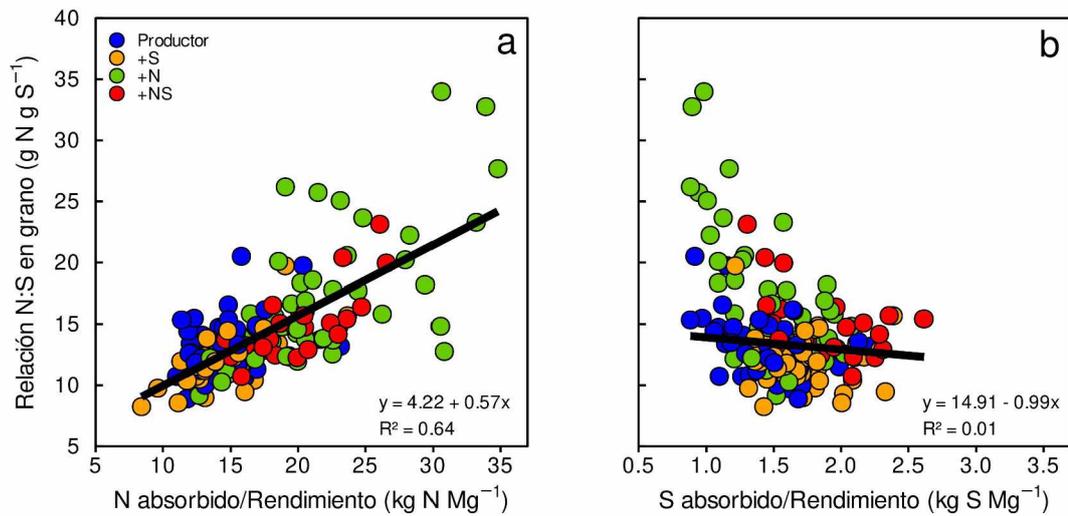


Figura 3.5. Relación entre la relación N:S en grano y a) la cantidad de nitrógeno absorbido por unidad de rendimiento en grano, b) la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento en grano. El color de los símbolos indica el tratamiento. Ambas relaciones fueron significativas ($p < 0.05$). Cada símbolo corresponde al valor medio de cada combinación experimento-tratamiento.

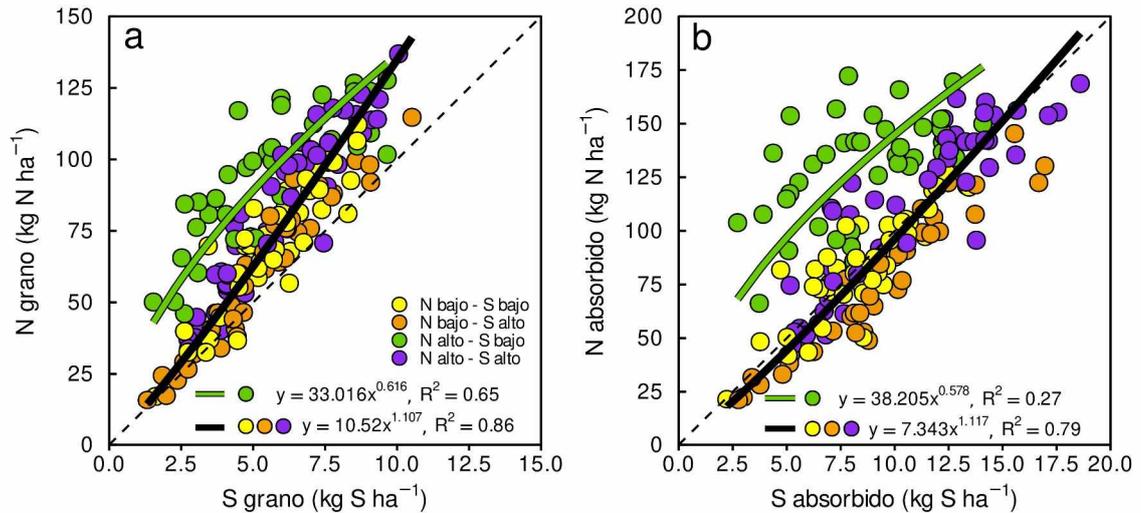


Figura 3.6. Relación entre a) la cantidad de N absorbido en grano y la cantidad de S absorbido en grano, b) la cantidad de N absorbido en biomasa aérea y la cantidad de S absorbido en biomasa aérea. Diferentes modelos ajustados corresponden a diferencias entre grupos. Símbolos amarillos indican bajo N y bajo S absorbido por unidad de rendimiento en grano, símbolos anaranjados indican bajo N y alto S absorbido por unidad de rendimiento en grano, símbolos violetas indican alto N y alto S absorbido por unidad de rendimiento en grano. La línea negra sólida indica el modelo ajustado a estos tres grupos. Los símbolos y la línea verdes indican alto N y bajo S absorbido por unidad de rendimiento en grano. La línea punteada indica la línea 10:1. Los grupos se formaron por la combinación de las clases de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano. Las categorías individuales de baja y alta cantidad de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano corresponden a las observaciones por debajo y por encima de la mediana de cada uno de estos nutrientes, respectivamente. Los modelos ajustados (en escala logarítmica, \log_{10}) y sus correspondientes parámetros y estadísticos se presentan en el Cuadro S.3.2 del material suplementario. Cada símbolo corresponde al valor medio de cada combinación experimento-tratamiento.

3.4. Discusión

El objetivo de este capítulo fue analizar y comparar las relaciones entre la cantidad de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano y sus componentes (i.e. la concentración de nutriente en grano y el índice de cosecha de nutriente) en cebada cervecera. Para este fin, se realizaron experimentos cubriendo una amplia combinación de sitios y años y un gran rango de disponibilidad de N y S. Las variaciones en Nabs/R (o EIN) y alguno de sus componentes han sido exploradas en estudios previos en cereales, a través de la evaluación de su variación en pocos experimentos, donde el principal factor que genera la variabilidad en EIN fue la aplicación de tratamientos (fecha de siembra, dosis de fertilizante, evaluación de cultivares) (Abeledo et al., 2008; Maltese et al., 2019; Carciochi et al., 2020a; de Oliveira Silva et al., 2020). En el presente estudio se trabajó sobre lotes de producción y explorando un amplio rango de variación en las variables en estudio gracias a la combinación experimento-tratamiento. El análisis de las relaciones entre Sabs/R (o EIS) y sus componentes no se ha reportado previamente.

La mínima Nabs/R calculada a partir de la función de borde superior a través de la relación entre el rendimiento en grano y la cantidad de N absorbido (Fig. 3.1.a, 12.3 kg

N Mg^{-1}) fue similar a la observada por otros autores (i.e. $13.9 \text{ kg N Mg}^{-1}$, Albrizio et al., 2010). La máxima Nabs/R ($23.2 \text{ kg N Mg}^{-1}$) calculada a partir de la función de borde inferior fue mayor a la calculada por otros estudios ($18.5 \text{ kg N Mg}^{-1}$, Abeledo et al., 2008). Este levemente superior consumo de lujo de N observado en nuestro estudio, podría asociarse a las altas dosis de fertilizante N utilizado, donde el N total agregado fue mayor al utilizado por Abeledo et al. (2008) en la misma región, y al hecho de estar utilizando cultivares modernos con alto potencial de rendimiento. Las relaciones curvilíneas y positivas entre el rendimiento en grano y la cantidad de nutriente absorbido observado para N y S, fue similar a las observadas por otros autores en diferentes cultivos y nutrientes (Albrizio et al., 2010; Setiyono et al., 2010; Pagani et al., 2012; Pöttsch et al., 2019; Carciochi et al., 2020b). No hemos encontrado en la literatura que se haya reportado anteriormente la relación entre rendimiento en grano y S absorbido para cebada cervecera.

La relación entre CNG y Nabs/R fue más estrecha que la observada por Prystupa et al. (2018) donde analizaron la relación entre CNG y N disponible por unidad de rendimiento en la región pampeana. Esto puede deberse a que estos autores relacionaron el rendimiento en grano con la cantidad de N disponible en el suelo en lugar de Nabs/R, la cual puede estar sujeta a pérdidas por lixiviación y no ser absorbida por el cultivo (Lord y Mitchell, 1998). En el caso del S, el Sabs/R correspondiente a la mediana (1.5 kg S Mg^{-1}) fue similar a lo estimado en cebada a partir de Skwierawska et al. (2008) (1.7 kg S Mg^{-1}) e inferior a lo observado en cebada forrajera (i.e. 2.8 kg S Mg^{-1} , Pöttsch et al., 2019), y en trigo ($4.4 - 3.7 \text{ kg S Mg}^{-1}$, Malhi, 2006; Ercoli et al., 2011).

Tanto en N como en S, las variaciones en la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento estuvieron asociadas principalmente a cambios en la concentración de nutriente en grano y, en menor medida, a cambios en el índice de cosecha del nutriente. Esto está en concordancia con lo observado por otros autores para N (Sadras, 2006; Ciampitti y Vyn, 2012). Cabe destacar que en el caso de S hubo una mayor proporción de varianza de nutriente absorbido por unidad de rendimiento atribuible a cambios en el índice de cosecha del nutriente, respecto a lo ocurrido en N (40.1 vs. 33.9 %, para ICS e ICN, respectivamente).

La concentración de nutriente en grano y el índice de cosecha de nutriente presentaron diferente sensibilidad a la modificación en la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano, según el nutriente en cuestión (N o S) y la cantidad de nutriente disponible para particionar hacia los granos. Cuando esta cantidad fue baja (con valores de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano por debajo de 1.58 para S o 1.76 para N, Fig. 3.3.c y d, respectivamente), la variación se encontró principalmente asociada a cambios en la concentración de nutriente en grano, mientras que el índice de cosecha de nutriente permaneció constante. Cuando la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano fue media o alta (valores de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano por encima de 1.58 para S o 1.76 para N, Fig. 3.3.c y d, respectivamente), estos nutrientes difieren. En el caso del N, las variaciones en la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano se asociaron a cambios en ambos componentes (i.e. CNG e ICN) en forma simultánea. Sin embargo, en el caso del S, las modificaciones en la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano estuvieron mucho más relacionadas a cambios en el índice de cosecha que a cambios en la concentración de nutriente en grano. De hecho, los cambios en el ICS comenzaron con menores niveles relativos de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano respecto a lo que ocurre con el ICN. Además, la tasa de disminución del índice de cosecha de nutriente (i.e. la pendiente en la fase lineal de la función, Fig. 3.3.c y d) fue mayor en S respecto a N. Por

otro lado, la magnitud relativa del cambio en la concentración del nutriente en grano fue mucho menor en S que en N (la CNG tiende a triplicarse mientras la CSG tiende a duplicarse, Fig. 3.3.a y b).

La baja tendencia a cambiar CSG con moderado a altos niveles de Sabs/R permitiría explicar la nula y/o pequeña e inconsistente modificación de CSG frente al agregado de S, en situaciones donde no se observó respuesta del rendimiento en distintos cereales (Gupta y MacLeod, 1984; Lerner et al., 2006; Zhao et al., 2006; Nanamori et al., 2011; Holopainen et al., 2015; Carciochi et al., 2019). Incluso, en situaciones donde se observó respuesta del rendimiento en grano frente al agregado de N y S, el incremento de CNG fue mayor al observado en CSG: en cebada, Prystupa et al. (2019) observaron un incremento de 6.6% en rendimiento en grano y ~ 30% en CNG frente al agregado de N, mientras que el rendimiento en grano incrementó 4.4% y la CSG ~ 7% frente al agregado de S. Las elevadas variaciones en CSG debido al agregado de S suelen evidenciarse en experimentos realizados en condiciones controladas (i.e. invernáculo e hidroponia) o en condiciones de campo donde las restricciones nutricionales son exacerbadas (Shewry et al., 1983; Habtegebrial y Singh, 2009).

Respecto a los cambios en el índice de cosecha de nutriente, varios autores observaron nulas o pequeñas modificaciones del ICN frente al agregado de N en cebada (Delogu et al., 1998; Abeledo et al., 2008) y trigo (Pask et al., 2012). En cambio, en S, a partir de los datos de Malhi (2006) se puede estimar una disminución promedio de ~ 11% en el ICS frente al agregado de S en trigo. De manera similar, Pagani et al. (2012) observaron una disminución del ICS frente al agregado de S, mientras que el ICN no se modificó por agregado de N en maíz.

El rango de valores observados de N removilizado fue similar al observado por Przulj y Momcilovic (2001) en cebada, mientras que el rango de valores de eficiencia de removilización de N fue ligeramente superior que el observado por otros autores (Przulj y Momcilovic, 2001; Dordas, 2012). La distribución y removilización de S en trigo y cebada ha sido estudiada frecuentemente bajo condiciones controladas (Fitzgerald et al., 1999; Monaghan et al., 1999; Eriksen et al., 2001), lo cual dificulta su extrapolabilidad. La removilización de S fue menor que la de N, de manera análoga a lo observado por Eriksen et al. (2001). Esto puede deberse al hecho de que, por un lado, la cantidad de S acumulado hasta anthesis fue menor que la de N (en promedio, el cociente S absorbido hasta anthesis/S absorbido a madurez ~ 78.5 % y el cociente N absorbido hasta anthesis/N absorbido a madurez ~ 86.6 %, a partir del Cuadro 3.1), en coincidencia con observaciones previas en maíz (Ciampitti et al., 2013; Carciochi et al., 2020a). Por otro lado, la eficiencia de removilización de S fue menor que la de N (Cuadro 3.1) y fue afectada en mayor medida por la cantidad de S disponible para particionar hacia los granos, que en el caso de N (Fig. 3.4.a y b). La disminución en la pendiente de la relación entre la cantidad de S removilizado y la cantidad de S absorbido en anthesis (Fig. 3.4.b) cuando Sabs/R cambió de 'bajo' a 'alto' fue 18 %. En el caso de N, la pendiente disminuyó sólo 9 % (Fig. 3.4.a). Aunque ICN e ICS presentaron baja asociación con la eficiencia de removilización de N y S, respectivamente, ambas tendencias fueron positivas ($r = 0.61$ y $r = 0.43$, para N y S, respectivamente). Esto es consistente con lo observado en la figura 3.3, donde los valores bajos de N y S absorbido por unidad de rendimiento en grano corresponden a valores de alto ICN e ICS y elevadas eficiencias de removilización de N y S (Fig. 3.4.a y b).

La relación N:S en grano ha sido propuesta como un índice que permite diagnosticar deficiencias de S en los cultivos después de la cosecha en soja (Salvagiotti et al., 2012), trigo (Randall et al., 1981; Reussi Calvo et al., 2011), maíz (Carciochi et al., 2019) y arroz (Randall et al., 2003). El rango de relaciones N:S en grano observadas fueron

mayores a los observados por otros autores en cebada (Holopainen et al., 2015) y trigo (Habtegebrial y Singh, 2009; Reussi Calvo et al., 2011). El hecho de que la relación N:S en grano fuera sensible a Nabs/R y no a Sabs/R (Fig. 3.5) está en concordancia a lo observado por otros autores, donde tanto la CSG como la relación N:S en grano se modifica frente al agregado de N y no de S (Lerner et al., 2006; Zhao et al., 2006). En trigo, Randall et al. (1981) separaron poblaciones de cultivos deficientes en S a aquellas que presentaban valores menores de 1.2% de CSG y una relación N:S en grano mayor de 17:1. La variabilidad en la asociación entre la relación N:S en grano y Nabs/R o Sabs/R puede deberse a la presencia de cultivos con deficiencia de S, dado que los cultivos que generan dispersión presentan elevados valores en la relación N:S en grano y una baja Sabs/R (Fig. 3.5.b).

De hecho, la única curva que se separó de la relación cercana a la isometría entre N y S fue aquella que presentaba un desbalance de N (i.e. un exceso de N disponible para particionar hacia los granos, el grupo ' $N_{\text{alto}} - S_{\text{bajo}}$ ' en Fig. 3.6.a). Más aún, el desbalance de N podría ser "corregido" (retornado nuevamente hacia una relación cercana a la isométrica) a través de un incremento en la cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento en grano, con el fin de "moverse" desde la curva con exceso de disponibilidad de N para los granos hacia una situación balanceada (desde la curva verde hacia la negra, en la Fig. 3.6.a). Sin embargo, no se observaron situaciones en las que S se acumuló por sobre el N, y por tanto, la limitación en la acumulación de S en el grano podría estar impuesta por la partición de S hacia los granos de forma de mantener una relación N:S estimada de $\sim 12.3:1$ (i.e. la pendiente del modelo lineal ajustado al subconjunto de datos correspondientes a los grupos ' $N_{\text{bajo}} - S_{\text{bajo}}$ ', ' $N_{\text{alto}} - S_{\text{alto}}$ ' y ' $N_{\text{bajo}} - S_{\text{alto}}$ ', $R^2 = 0.84$).

La utilización de elevada EIN como rasgo de selección en los programas de mejoramiento está asociada con altos ICN y bajos valores de CNG (ecuación 2). La interrelación descrita entre Nabs/R (o EIN), CNG e ICN concuerda con Savin et al. (2019), quienes destacan la posible reducción de CNG en el proceso de mejoramiento genético de trigo, en líneas que presentan elevada EIN. En cebada cervecera, si bien el rendimiento en grano o EIN son rasgos objetivos en los programas de mejoramiento, CNG es un rasgo que se ha preservado debido a los requerimientos industriales (i.e. el contenido proteico debe encontrarse entre determinados límites). Sin embargo, los cultivares modernos presentaron una mayor EIN e ICN, y una menor CNG respecto a los antiguos (Abeledo et al., 2008).

3.5. Conclusiones

La relación entre concentración de nutriente en grano y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano fue distinta para N y S. A diferencia de la relación estrecha entre CNG y Nabs/R, CSG fue menos sensible a modificaciones en Sabs/R, especialmente en situaciones de moderada-alta Sabs/R. Esto se debió a una mayor disminución en el ICS comparado al ICN cuando aumenta la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano por encima de un determinado umbral (1.3 kg S Mg^{-1} y 15 kg N Mg^{-1}). Por lo tanto, CSG sería muy difícil de modificar a través del agregado de azufre, salvo en situaciones de deficiencia severa, dado que una gran proporción del S absorbido va a tener como destino final el rastrojo. No obstante, pequeñas variaciones en CSG o en la relación N:S del grano podrían impactar de manera significativa en el calidad maltera, aspecto que se aborda en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4. Relación N:S en grano y calidad maltera

4.1. Introducción

Para ser utilizada en la industria cervecera, la malta debe cumplir con una serie de características complejas que describen su calidad. El principal índice de la calidad maltera es el extracto de malta, el cual refleja la cantidad de solutos presentes en el mosto por unidad de malta empleada (Briggs et al., 2004). El mosto se obtiene luego de la maceración de la malta, proceso durante el cual el almidón es degradado a azúcares fermentables y dextrinas, mientras que las proteínas son degradadas a proteínas solubles, péptidos y aminoácidos (Schwarz y Li, 2011). Valores más altos de extracto de malta (i.e. mayor cantidad de solutos en el mosto) implican un mayor rendimiento de la malta en la elaboración de cerveza, por lo cual resulta en una característica deseada en la industria. El extracto de malta se asocia negativamente con la concentración proteica de los granos, lo que es atribuido a una menor tasa de degradación de los gránulos de almidón durante la maceración (Howard et al., 1996). La fertilización nitrogenada incrementa la concentración proteica de los granos en cebada (O'Donovan et al., 2011; Prystupa et al., 2018) y, por lo tanto, reduce el extracto de malta (Prystupa et al., 2019). Sin embargo, existe mucha menos información acerca de la influencia del S sobre el extracto de malta. Algunos trabajos previos observaron una relación positiva entre el agregado de S y el extracto de malta (Holopainen et al., 2015; Prystupa et al., 2019).

Para obtener un alto nivel de extracto y una actividad enzimática adecuada es necesario que la estructura física del grano se haya modificado durante el malteo. La friabilidad es el grado de facilidad con que puede romperse un objeto. En el caso de la malta, la friabilidad es un indicador del grado de modificación física que ha sufrido el grano durante el malteo (Briggs et al., 2004). La modificación física se debe principalmente a la degradación de paredes celulares y las proteínas contenidas en el interior del endosperma (Schwarz y Li, 2011). Cuanto mayor es la modificación sufrida por la malta, más extracto se obtiene de ella (Briggs, 1998) y, más friable y fácil de moler es (Schwarz y Li, 2011). En estudios previos se ha observado que frente al incremento en la concentración proteica de los granos o de la disponibilidad de N, disminuye la friabilidad (Gianinetti et al., 2005; Holopainen et al., 2015), o se incrementa la dureza de la malta (Prystupa et al., 2019). En otros estudios observaron un incremento en la friabilidad de la malta frente al agregado de S (Zhao et al., 2006; Prystupa et al., 2019).

Otros atributos de calidad menos estudiados son el tiempo de sacarificación y el tiempo de filtración del mosto. El tiempo de sacarificación es una medida grosera del tiempo que demora la dextrinización del almidón y está relacionado con el contenido de α -amilasa de la malta (Briggs et al., 2004). La dextrinización del almidón es el proceso por el cual se obtienen azúcares simples y dextrinas (i.e. oligosacáridos) durante la maceración del mosto. Elevados tiempos de sacarificación están asociados a maltas que poseen un reducido complejo enzimático (principalmente la enzima α -amilasa) (Briggs, 1998), lo cual no es deseable en la industria. La filtración del mosto se evalúa a partir del tiempo que demora el pasaje del mosto resultante de la maceración a través de filtros de celulosa con características estandarizadas. La filtración es más lenta en maltas que poseen un bajo grado de modificación y en mostos de elevada viscosidad (Briggs, 1998). A su vez, los tiempos de filtración elevados afectan a los tiempos operativos, por lo que son indeseables en la industria. Se sabe que la velocidad de filtración es afectada por un alto contenido de β -glucanos (Nischwitz et al., 1999) y, además, la presencia de grandes cantidades de β -glucanos es un indicador de una inadecuada modificación del

endosperma del grano (Briggs, 1998). Se ha observado una relación positiva entre la concentración de proteína en los granos y el contenido de β -glucanos tanto en grano y mosto de cebada (Güler, 2003; Edney et al., 2012) como en malta de trigo (Jin et al., 2008), por lo que es probable que elevadas concentraciones de N en el grano se asocien con menores velocidades de filtración del mosto. Por otro lado, Zhao et al. (2006) observaron una disminución en el contenido de β -glucanos frente al agregado de S en el cultivo de cebada, lo que se asociaría con mayores velocidades de filtración. Por lo tanto, la nutrición nitrogenada y la azufrada, al afectar tanto el contenido de β -glucanos como la modificación del endosperma, podrían modificar la velocidad de filtración.

Las proteínas de reserva en cebada cervecera, denominadas hordeínas, difieren en cuanto a su contenido de S. Mientras que las hordeínas-B y las hordeínas- γ son ricas en S en su composición, las hordeínas-C son pobres en S (Shewry y Tatham, 1990). Se ha reportado que una elevada proporción de hordeínas-B o un incremento en la relación entre las hordeínas B:C se asocian a mayores valores de extracto de malta (Peltonen et al., 1994; Molina-Cano et al., 2002; Prystupa et al., 2019). Por lo tanto, la calidad de los granos de cebada no estaría relacionada sólo con la concentración de proteína sino también con la relación N:S en grano (Shewry, 2011). Si bien la concentración de N y S en el grano puede modificarse a través de la fertilización con estos nutrientes, la concentración de N y S en grano presenta diferente sensibilidad frente a modificaciones en la disponibilidad de estos nutrientes para el cultivo (Gómez et al., 2021). En consecuencia, variaciones en la disponibilidad de N o S podrían no reflejarse en modificaciones proporcionales en la relación N:S en grano. Por otro lado, existe escasa información acerca de los efectos de la fertilización azufrada sobre la calidad industrial de la cebada. Los estudios previos que evalúan el efecto del azufre sobre la calidad maltera de cebada en condiciones de campo son unos pocos (Zhao et al., 2006; Holopainen et al., 2015; Prystupa et al., 2019). Estos trabajos estudiaron el efecto del agregado o la deficiencia de S (i.e. efecto del agregado de S solo o en combinación con N) sobre atributos de calidad maltera. Una manera alternativa de evaluar la calidad maltera de los granos podría realizarse directamente a través de un atributo propio del grano: su relación N:S. En un número limitado de ensayos a campo con cebada cervecera, Prystupa et al. (2019) observaron que la relación N:S en grano correlacionaba con el extracto de malta. No existen estudios previos que hayan utilizado a la relación N:S en grano para evaluar la influencia del S en otros atributos de calidad maltera.

El objetivo del presente capítulo fue determinar la influencia de la relación N:S en grano sobre distintos atributos de calidad maltera en el cultivo de cebada.

La hipótesis de trabajo fue que la clasificación de granos según su relación N:S, permitirá distinguir situaciones contrastantes de calidad maltera debido a su asociación con los distintos tipos de hordeínas y, por tanto, con la relación de hordeínas B:C.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Experimentos a campo

Se realizaron 47 experimentos con cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) en condiciones de campo en el centro-norte de la provincia de Buenos Aires, durante el periodo 2014 a 2018. Estos 47 experimentos corresponden a la casi totalidad de los 50 experimentos realizados para el desarrollo del capítulo 3. Los experimentos se realizaron aplicando los tratamientos a una porción de un lote de producción comercial de cebada cervecera. En cada experimento (resultado de la combinación sitio-año) se aplicaron tratamientos con el fin de generar variabilidad del estatus nutricional

nitrogenado y azufrado de los cultivos. Durante el periodo 2014 - 2015 se aplicaron tres tratamientos:

- Productor: consiste de la dosis de fertilización aplicada por el productor. La dosis de fertilización media utilizada por los productores fue 58.8 y 4.5 kg ha⁻¹ para N y S, respectivamente.

- +N: 150 kg N ha⁻¹ (en los años 2014/15/16 y 2018) o 250 kg N ha⁻¹ (año 2017), por sobre la dosis de fertilizante aplicada por el productor.

- +S: 15 kg S ha⁻¹ (en los años 2014/15/16) o 20 kg S ha⁻¹ (año 2017 y 2018), por sobre la dosis de fertilizante aplicada por el productor.

Durante el periodo 2016 a 2018, se agregó un cuarto tratamiento con el fin de conformar un diseño factorial completo:

- +NS: 15 kg S ha⁻¹ (año 2016) o 20 kg S ha⁻¹ (en los años 2017 y 2018) y 150 kg N ha⁻¹ (en los años 2016 y 2018) o 250 kg N ha⁻¹ (año 2017), por sobre la dosis de fertilizante aplicada por el productor.

Los 24 experimentos realizados en el periodo 2014-15 tuvieron un diseño factorial incompleto con dos repeticiones, mientras que los 23 experimentos realizados durante 2016 a 2018 tuvieron un diseño factorial completo con 3 repeticiones. Las prácticas de manejo fueron las usualmente utilizadas en cada lote de producción. Los cultivares empleados en estos experimentos fueron aquellos más ampliamente adoptados por los productores durante el periodo en el que los experimentos se llevaron a cabo, destacándose el predominio del cv. Andreia. El fertilizante nitrogenado (urea) y el azufrado (yeso) fue aplicado al voleo entre siembra y emergencia de los cultivos.

4.2.2. Rendimiento, calibre, concentración de N y S en grano

A la madurez del cultivo, se tomaron muestras de biomasa aérea en 4 m lineales de las hileras centrales de cada parcela y fueron secadas a 65 °C hasta alcanzar peso constante. Estas muestras fueron trilladas para determinar el rendimiento en grano. El rendimiento en grano fue corregido a un contenido de humedad de 0.13 g H₂O g⁻¹. En muestras de granos se determinó la concentración de N y S a través de digestión húmeda y posterior colorimetría (Baethgen y Alley, 1989) y turbidimetría (San Martín et al., 1987), para N y S, respectivamente. El porcentaje de proteína fue calculado multiplicando la concentración de N en grano (en base seca) por un factor de 6.25.

El calibre se determinó con una calibradora Sortimat K-3 (Pfeuffer), que clasifica a los granos en 4 fracciones: mayor a 2.8 mm, entre 2.8 y 2.5 mm, entre 2.5 y 2.2 mm y menor a 2.2 mm. Se considera calibre a la suma del peso de los granos que quedan retenidos por sobre los tamices de 2.5 y 2.8 mm por cada 100 g de muestra tamizada.

4.2.3. Micromalteo y análisis de malta

A la madurez del cultivo, se tomaron muestras de grano de cada parcela (~ 1,5 kg de espigas en cada parcela). Las espigas fueron secadas a 25 °C y luego trilladas. Muestras de 250 g de granos que fueron retenidos en un tamiz de 2.5 mm, provenientes de cada parcela, y fueron malteadas en una micromaltería automática (Phoenix Systems, Kingswood, South Australia). El programa de malteo constó de 25 h de etapas alternas de remojo y descanso, 96 h a 15 °C para la germinación y 18 h entre 50 y 82 °C para el secado. Las raicillas y los vástagos fueron removidas manualmente. Tanto el extracto de malta, los tiempos de sacarificación y de filtración (4.5.1 EBC) como la friabilidad de malta (4.15 EBC) se determinaron siguiendo los protocolos EBC (E.B.C., 1998). La friabilidad de malta se determinó utilizando un friabilímetro (Pfeuffer).

4.2.4. Cuantificación de hordeínas

Se tomaron muestras de granos en siete experimentos y se molieron. La extracción de hordeínas se realizó siguiendo a Celsus et al. (2006). A partir de 300 mg de muestras liofilizadas se realizaron tres extracciones con 1 ml de una solución de NaCl (5% p/v) en agua desionizada, de forma de extraer albúminas y globulinas en el sobrenadante, lo cual fue descartado. Sobre el residuo (que contiene las hordeínas) se realizaron tres extracciones con 1 ml de 1-propanol (55% v/v) y DTT (0,75% p/v). Cada extracción fue agitada en vórtex por 2 minutos a temperatura ambiente y luego agitado en un shaker orbital por 10 minutos a 55 °C (Celus et al., 2006). La suspensión obtenida se centrifugó (1500 g) durante 10 minutos a temperatura ambiente y el sobrenadante obtenido se combinó y llevó a 3.5 ml con el solvente de extracción. Una alícuota de cada extracción se filtró a través de un filtro de membrana de acetato de celulosa de 0.45 μm y se cargó (80 μl) en una columna C8 (Zorbax SB C8 300 Å) en un equipo de Cromatografía Líquida de Alta Performance (Fase Reserva, Agilent series 1100). El sistema de elución consistió en agua destilada con 0.1 % de ácido trifluoroacético (TFA) (solvente 1), y acetonitrilo con 0,1% TFA (solvente 2). Las proteínas se separaron en un gradiente de solvente 2 (del 24 a 56 %) durante 50 minutos y se detectaron a 214 nm utilizando un detector UV (Wieser et al., 1998).

4.2.5. Análisis de datos

Para evaluar el efecto de la relación N:S en grano sobre el extracto, la friabilidad de malta y el tiempo de filtración se conformaron seis grupos de relación N:S. Los grupos de relación N:S en grano se generaron a través del ajuste de regresiones lineales por cuantiles, de forma que las muestras de granos se agruparon en los siguientes grupos: < Q10, Q10-25, Q25-50, Q50-75, Q75-90, > Q90. Las regresiones por cuantiles se ajustaron utilizando el paquete quantreg (Koenker, 2022). Las pendientes ajustadas de estas regresiones lineales por cuantiles, corresponden a las relaciones N:S en grano que indican los límites entre los grupos.

Las relaciones entre extracto de malta y otras variables de interés se evaluaron ajustando modelos lineales y no lineales, teniendo en cuenta la correlación entre errores y la heterogeneidad de varianza (funciones gls y gnls del paquete nlme, Pinheiro et al., 2022). En presencia de heterocedasticidad, se ajustaron modelos con distintas funciones de varianza y se ordenaron de acuerdo al valor de Bayesian Information Criterion (BIC). Se seleccionó el modelo con menor BIC.

La friabilidad de malta es una variable cuya distribución no es normal, por lo que se transformó su escala relativizando los valores observados respecto a 100 (dado que es un porcentaje). De esta forma se pudo ajustar a una distribución beta, la cual es apropiada para datos que son proporciones continuas, en el rango de valores (0, 1) y, a su vez, permitió mantener el significado y la interpretación de la variable original. Las relaciones entre friabilidad y las variables de interés se evaluaron a través de beta-regresiones (Cribari-Neto y Zeileis, 2010), utilizando una función de enlace logística. Los parámetros estimados del modelo lineal correspondieron al predictor lineal $\eta_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p$, y el valor esperado de la variable respuesta correspondió a $E(y_i) = \exp(\eta_i) / [1 + \exp(\eta_i)]$. En presencia de heterocedasticidad, se ajustaron modelos que la contemplaran y se ordenaron de acuerdo al valor de BIC. Se seleccionó el modelo con menor BIC.

La variable tiempo de sacarificación poseía tres categorías de respuesta (i.e. 5-10, 10-15 y 15-20 minutos), por lo que presentó una distribución multinomial. Las relaciones entre el tiempo de sacarificación y las variables de interés se evaluaron con redes neuronales para modelos logísticos multinomiales, utilizando el paquete nnet (Venables y Ripley, 2002).

La variable tiempo de filtración presentó distribución binomial, debido a que la variable respuesta poseía dos categorías (i.e. 'Normal' y '> 60 minutos', es una variable binaria). Las relaciones entre el tiempo de filtración y las variables de interés se evaluaron a través de modelos lineales generalizados, correspondiente a una distribución binomial y donde la función de enlace utilizada fue logística.

Los efectos de interés sobre las variables estudiadas (i.e. extracto y friabilidad de malta, tiempos de sacarificación y filtración) se analizaron a través de pruebas de cociente de verosimilitud (LRT, por sus siglas en inglés), bajo distribuciones χ^2 . La presencia de multicolinealidad se evaluó a través del factor de inflación de la varianza (VIF, por sus siglas en inglés) utilizando el paquete car (Fox y Weisberg, 2019). El R^2 en las beta-regresiones se calculó según Ferrari and Cribari-Neto (2004), mientras que en el resto de los modelos se calculó en base a Nagelkerke (1991). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software R (R Core Team, 2022). Los datos se consideraron como muestras de granos a nivel de parcela, tanto para su análisis como para su ilustración (el número total de observaciones fue de 414, con pequeñas variaciones dependiendo de la variable).

Los atributos de calidad maltera se analizaron considerando dos grupos de datos: 1) el conjunto de datos completo, 2) un subconjunto de datos generado a partir de los límites de concentración proteica en grano establecidos en el requerimiento de la industria cervecera. En Argentina, las bases de comercialización estipulan un rango de proteína en grano entre 9.5 y 13 % (Res. 27/2013, SENASA). Este rango de proteína, es similar al utilizado en otros países, como Australia (9 - 12 %), Estados Unidos (9.5 - 12.5 %), Canadá (10.5 - 13 %) y España (9.5 - 11.5 %).

Las muestras en las que se determinó la composición de hordeínas fueron clasificadas en función de la relación de hordeínas B:C que poseían ('< 1.2' y '≥ 1.2'). El valor de relación B:C que separó ambos grupos (i.e. 1.2) se determinó a partir del cálculo del complemento del cuantil correspondientes a los granos con relación N:S de 17.7 (i.e. N:S = 17.7 correspondió a Q72, mientras que B:C = 1.2 a Q28). Esta clasificación se realizó en base a que los granos con relación N:S > 17.7 presentaron características distintivas en sus atributos de calidad industrial y, a su vez, cumplían los requerimientos de concentración proteica requerida por la industria (concentración de proteína comprendida entre 9.5 y 13 %).

4.3. Resultados

4.3.1. Relaciones N:S en grano

Los valores medios, correspondientes a los cuantiles 25 y 75 %, y los valores extremos (mínimo y máximo) de las principales variables evaluadas, se presentan en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Estadísticas de resumen.

Variable	Media	Q25-Q75 ^b	Mín - Máx
Rendimiento en grano (Mg ha ⁻¹) ^a	6.05	4.75 - 7.33	1.25 - 10.36
Calibre (%)	85.0	81.7 - 93.5	17.8 - 98.0
Proteína (%)	9.2	7.7 - 10.3	3.3 - 15.4
Concentración de S en grano (g kg ⁻¹)	1.06	0.94 - 1.18	0.48 - 1.68
N:S en grano (g N g S ⁻¹)	14.3	11.6 - 15.6	6.5 - 42.2
Hordeínas totales (u.a.)	17773	12034 - 24811	6760 - 32943
Hordeína-B (u.a. g ⁻¹)	31865	25486 - 36915	9896 - 56348
Hordeína-C (u.a. g ⁻¹)	24613	10376 - 38353	6178 - 64243
Hordeína-D (u.a. g ⁻¹) ^d	1106	815 - 1178	433 - 3274
Hordeína- γ (u.a. g ⁻¹) ^d	1148	840 - 1447	117 - 2247
Relación de hordeínas B:C	1.8	1.1 - 2.4	0.3 - 3.7
Extracto de malta (%)	81.1	80.2 - 82.4	75.7 - 85.7
Friabilidad de malta (%)	90.5	85.0 - 98.8	40.6 - 99.8
Tiempo de sacarificación (minutos)	5-10 minutos (n = 13); 10-15 minutos (n = 324); 15-20 minutos (n = 10) ^c		
Tiempo de filtración (minutos)	Normal (n = 237); >60 minutos (n = 110) ^c		

^a El rendimiento se ajustó a 0.13 g H₂O g⁻¹.

^b Q25-Q75: cuantiles 25 y 75 %, respectivamente.

^c n: número de muestras.

^d Para el cálculo de los estadísticos de resumen se retiraron las situaciones en las cuales la cantidad de hordeínas determinadas era 'no detectable' (cantidad < 100 u.a., correspondientes a 12 casos en hordeína-D y 1 caso en hordeína- γ).

En la figura 4.1.a se observan los distintos grupos de relaciones N:S en grano conformados a partir del ajuste de funciones lineales por cuantiles, para los cuantiles (Q25, Q50 y Q75) y los extremos (Q10 y Q90, el decil inferior y superior, respectivamente). El 80 % de las muestras de grano presentaron una relación N:S entre 10.1 y 17.7 (i.e. Q10 y Q90, respectivamente). Se observó cierta asimetría en la distribución de las relaciones N:S en grano, dado que la relación N:S en grano del decil superior fue ~ 37% superior a la mediana, mientras que la relación N:S correspondiente al decil inferior fue ~ 22% menor a la mediana. Las situaciones correspondientes al decil extremo superior (i.e. el grupo > Q90 o las relaciones N:S en grano superiores a 17.7) presentaron mayor variabilidad (Fig. 4.1.a y b). Cabe destacar el gran rango de valores de proteína observado para los distintos grupos de relaciones N:S, lo cual permite explorar diferencias en la concentración de S (y en la relación N:S) para una misma concentración proteica (i.e. diferencias en la composición y no en la concentración proteica de los granos) (Fig. 4.1.b).

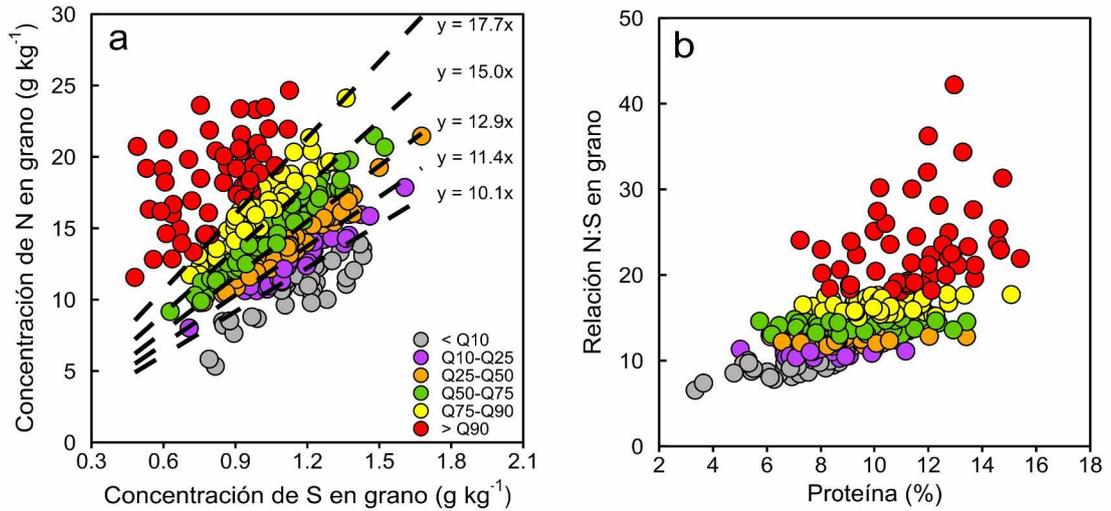


Figura 4.1. a) Relación entre la concentración de N y la concentración de S en grano. b) Relación entre la relación N:S y la concentración proteica en grano. Los colores de los símbolos corresponden a los grupos de relación N:S en grano al cual pertenece cada situación o muestra. En a) las líneas punteadas corresponden a las funciones lineales por cuantiles ajustadas y se indican las distintas relaciones N:S en grano (pendientes de las funciones ajustadas).

4.3.2. Extracto de malta

La media y el rango de valores de la concentración de proteína de los granos y del extracto de malta se presentan en el Cuadro 4.1. El extracto de malta no varió ante cambios en la concentración de proteína de los granos cuando este se encontraba por debajo de 7.4 % (Fig. 4.2.a). Con valores de proteína en grano superiores a 7.4 %, el extracto de malta disminuyó ~ 0.6 % por cada punto de incremento en la concentración proteica de los granos. El ajuste de una función plateau-lineal fue más adecuado respecto al correspondiente a una función lineal simple (una recta, $p < 0.001$). Por otro lado, el extracto de malta se relacionó positivamente con el calibre de los granos ($p < 0.001$, Fig. 4.2.b).

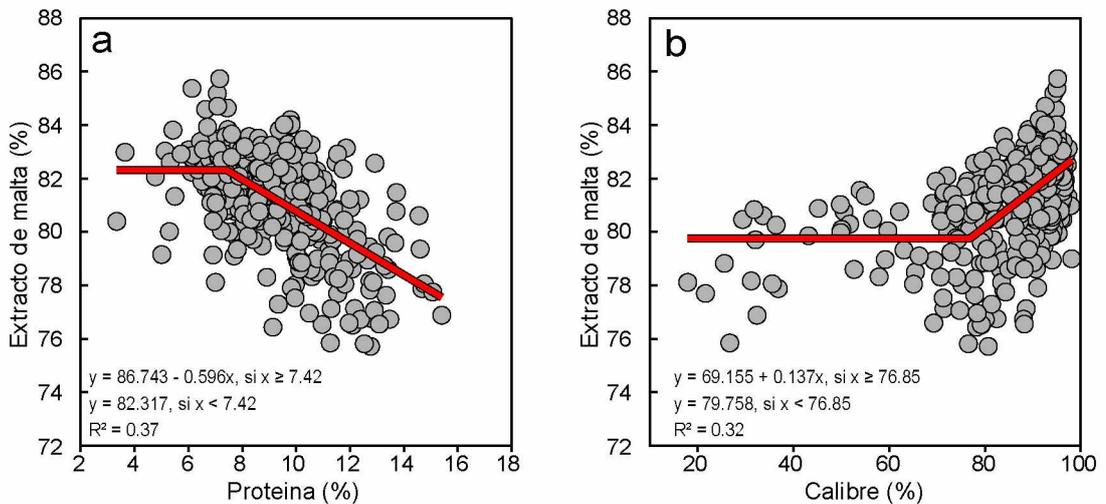


Figura 4.2. a) Relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos. b) Relación entre el extracto de malta y el calibre de los granos.

La relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos fue afectada por la relación N:S de los granos (i.e. interacción proteína-N:S en grano, $p < 0.05$, Fig. 4.3.a). Para establecer diferencias entre los grupos de relaciones N:S en grano, inicialmente se ajustó un modelo que relacionaba el extracto de malta y la concentración proteica de los granos para cada uno de los seis grupos de relaciones N:S en grano (i.e. el modelo completo). Posteriormente, los grupos de relaciones N:S en grano se reagruparon en un menor número de grupos (i.e. el modelo reducido, con un menor número de parámetros) y se evaluó la representación de la relación con el modelo reducido vs el modelo completo (i.e. se puso a prueba el parámetro del grupo de relaciones N:S que diferencia a ambos modelos, donde $H_0: \beta_k = 0$). El modelo lineal más adecuado fue aquel conformado por tres grupos de relaciones N:S en grano (i.e. se redujo el modelo más complejo, con 6 grupos o funciones, a uno de 3 funciones sin incrementar el error, $p = 0.32$). Los grupos de relaciones N:S en grano conformados se correspondieron a relaciones N:S menores a 10.1; entre 10.1 y 17.7; y mayores a 17.7 (Fig. 4.3.a). Los granos cuya relación N:S fue menor a 10.1 no presentaron asociación entre el extracto de malta y su concentración de proteína (la pendiente no fue distinta de cero, $p = 0.83$). Además, los granos con relación N:S menor a 10.1, se correspondieron mayormente con aquellos que poseían las menores concentraciones proteicas (i.e. el 75 % de las muestras con relación N:S < 10.1 poseían una concentración proteica < 7.5 %). Por otro lado, en granos cuya relación N:S fue mayor a 10.1, se observó una relación negativa entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos. Los granos con relación N:S > 17.7 presentaron ~ 1.3 % menos de extracto de malta respecto a granos cuya relación N:S estuvo comprendida entre 10.1 y 17.7, independientemente de la concentración proteica de los granos (las pendientes no son distintas, $p = 0.95$, Fig. 4.3.a).

En el rango de concentración proteica requerida por la industria (i.e. 9.5 a 13 %), el 50% de las muestras cuya relación N:S en grano estuvo entre 10.1 y 17.7 presentaron mayor extracto de malta que las muestras provenientes de granos con relación N:S > 17.7 (i.e. 80.7 vs 78.9 %, para granos con relación N:S entre 10.1 y 17.7, y N:S > 17.7 , respectivamente, Fig. 4.3.b). Las diferencias en extracto de malta entre los granos con relación N:S entre 10.1 y 17.7, y aquellos con relación N:S > 17.7 fueron menores en los extremos de las distribuciones (i.e. decil superior e inferior de frecuencia acumulada, correspondientes a los valores de extracto de malta más bajos y más altos).

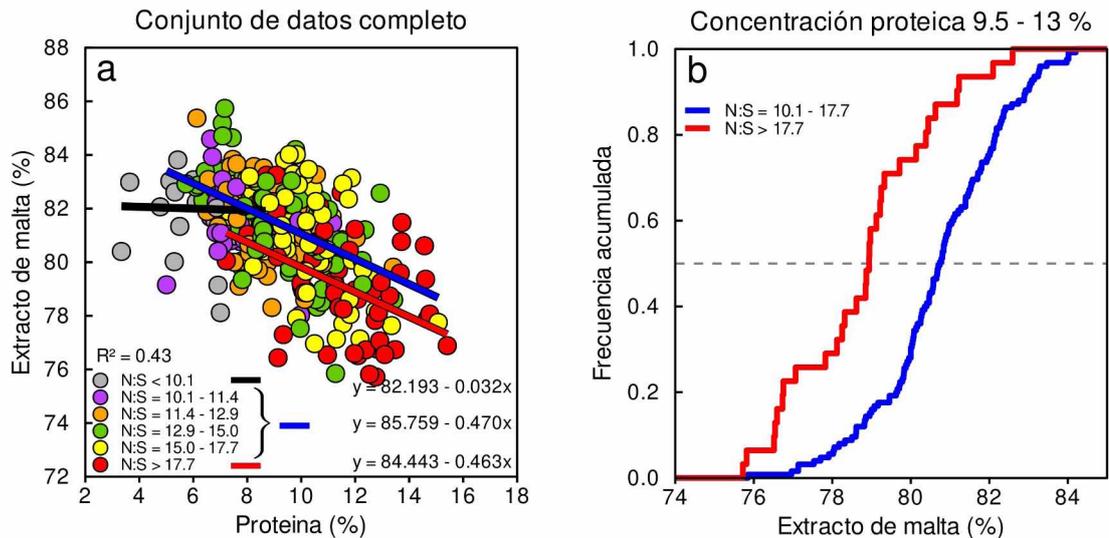


Figura 4.3. a) Relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos, en todo el conjunto de datos. Los colores de los símbolos refieren a los grupos inter-cuantiles de relación N:S en grano. b) Curvas de frecuencia acumulada de extracto de malta, en el subconjunto de datos correspondiente al rango de concentración proteica en grano de 9.5 - 13 %. La línea sólida negra corresponde al ajuste para relaciones N:S < 10.1, la línea azul al ajuste para el rango de relaciones N:S 10.1 a 17.7 y la línea roja para las relaciones N:S en grano > 17.7. La línea discontinua corresponde a la probabilidad acumulada del 50 %. Los modelos ajustados son: i) N:S < 10.1: $y = 82.193 - 0.032x$ (línea negra); ii) N:S 10.1 - 17.7: $y = 85.759 - 0.470x$ (línea azul); iii) N:S > 17.7: $y = 84.443 - 0.463x$ (línea roja). El R^2 del modelo global es 0.43.

4.3.3. Friabilidad de malta

La media y el rango de valores de la friabilidad de malta se presentan en el Cuadro 4.1. La friabilidad de malta se asoció negativamente con la concentración proteica de los granos ($p < 0.001$, Fig. 4.4.a). Frente al incremento en la concentración de proteína de los granos desde 9.5 a 13 % (i.e. el rango de requerimiento proteico demandado por la industria), la friabilidad de malta disminuyó de 92 a 76.1 %. Si bien la friabilidad de la malta se asoció positivamente con el calibre de los granos ($p < 0.001$), el grado de asociación entre estas variables fue relativamente bajo y con una clara dispersión en los valores de friabilidad de malta en granos con calibre menor a 70 % ($R^2 = 0.09$, Fig. 4.4.b).

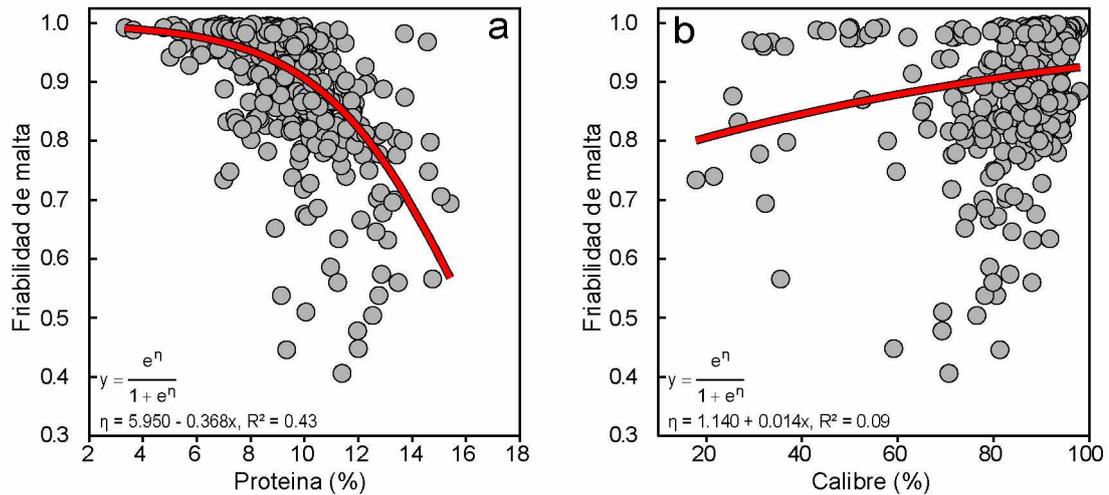


Figura 4.4. a) Relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos. b) Relación entre la friabilidad de malta y el calibre de los granos. Los modelos ajustados corresponden al predictor lineal (η , ver materiales y métodos para más detalles).

La relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos fue distinta según la relación N:S de esos granos (i.e. interacción proteína-N:S en grano, $p < 0.01$, Fig. 4.5.a). El modelo más adecuado para los datos fue el que presentó tres grupos de relaciones N:S en grano (i.e. se redujo a un modelo de 3 funciones, $p = 0.47$). Los grupos de relaciones N:S en grano conformados se correspondieron a relaciones N:S menores a 10.1; entre 10.1 y 17.7; y mayores a 17.7 (Fig. 4.5.a).

La friabilidad de malta no se asoció a la concentración proteica de los granos, en las muestras en las que la relación N:S en grano fue menor a 10.1 (i.e. la pendiente del predictor lineal η no difiere de cero, $p = 0.93$). A su vez, los granos con relación N:S < 10.1 se caracterizaron por poseer una baja concentración proteica ($< 8.7\%$) y elevada friabilidad de malta (97.7 %, calculado a partir del valor medio de concentración proteica del grupo N:S < 10.1). Tanto en granos con relación N:S entre 10.1 y 17.7 como en aquellos cuya relación N:S fue mayor a 17.7, la friabilidad de malta se asoció negativamente con la concentración proteica (i.e. el modelo con pendientes distintas para cada grupo de relaciones N:S fue más adecuado, $p < 0.001$, Fig. 4.5.a). La disminución de la friabilidad de malta frente al incremento en la concentración proteica fue mayor en granos con relación N:S entre 10.1 y 17.7 respecto a aquellos cuya relación N:S fue > 17.7 . La friabilidad de malta en granos con relación N:S entre 10.1 y 17.7 disminuyó de 92.4 a 77.6 % cuando la concentración proteica de los granos incrementó desde 9.5 a 13 %, mientras que en granos cuya relación N:S era mayor a 17.7, frente al incremento en la concentración proteica de 9.5 a 13 %, la friabilidad de malta disminuyó de 77.8 a 71.7 % (Fig. 4.5.a). Sin embargo, los granos cuya relación N:S fue > 17.7 poseían una menor friabilidad de malta, en términos medios (i.e. 93.4 vs 74.3 %, para granos con N:S entre 10.1 y 17.7, y N:S > 17.7 , respectivamente, calculado a partir del valor medio de concentración proteica de cada grupo).

En el rango de concentración proteica en grano requerida por la industria (i.e. 9.5 a 13 %), el 50% de los granos con relación N:S entre 10.1 y 17.7 presentaron mayor friabilidad de malta, respecto a aquellos con relación N:S > 17.7 (i.e. 87 vs 71.2 %, en granos con N:S entre 10.1 y 17.7, y N:S > 17.7 , respectivamente, Fig. 4.5.b). Mientras que no se observaron situaciones con friabilidad de malta por debajo de 68.6 % en

granos cuya relación N:S se encontraba entre 10.1 y 17.7, aproximadamente el 48 % de los granos con relación N:S > 17.7 presentaron una friabilidad de malta menor a 68.6 %. Análogamente, puede destacarse que mientras el 88 % de las muestras cuyos granos poseían una relación N:S entre 10.1 y 17.7 presentaron una friabilidad de malta mayor a 80 %, en el caso de granos con relación N:S > 17.7 sólo se observó valores de friabilidad de malta superiores a 80 % en el 35.4 % de las muestras (Fig. 4.5.b).

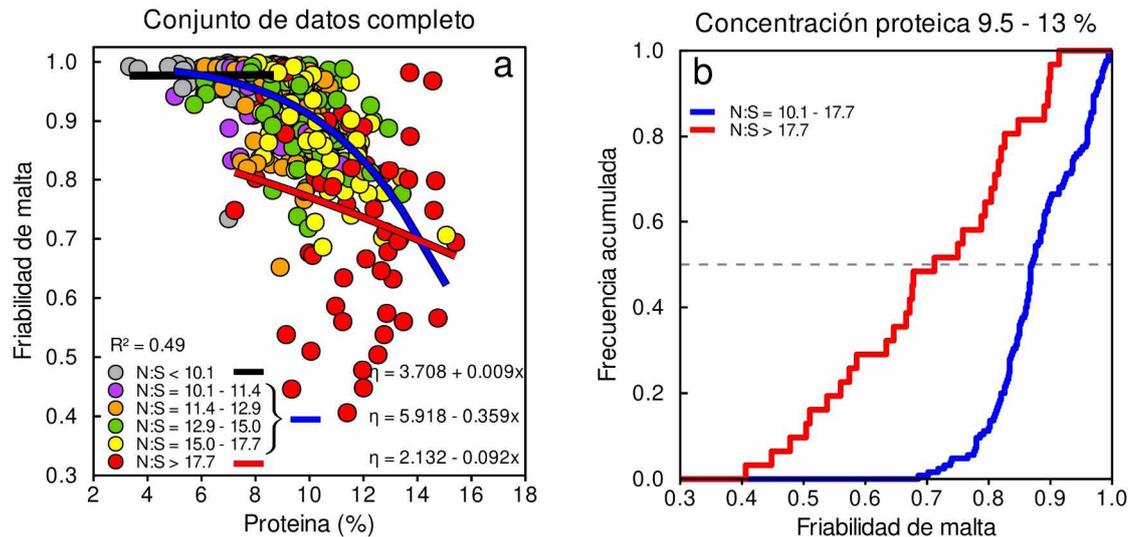


Figura 4.5. a) Relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos, en todo el conjunto de datos. Los colores de los símbolos refieren a los grupos inter-cuantiles de relación N:S en grano. b) Curvas de frecuencia acumulada de friabilidad de malta, en el subconjunto de datos correspondiente al rango de concentración proteica en grano de 9.5 - 13 %. La línea sólida negra corresponde al modelo ajustado para relaciones N:S < 10.1, la línea azul al modelo ajustado para el rango de relaciones N:S 10.1 a 17.7 y la línea roja al modelo ajustado para las relaciones N:S en grano > 17.7. La línea discontinua corresponde a la probabilidad acumulada del 50 %. Los modelos ajustados fueron: i) N:S < 10.1: $\eta = 3.708 + 0.009x$ (línea negra); ii) N:S 10.1 - 17.7: $\eta = 5.918 - 0.359x$ (línea azul); iii) N:S > 17.7: $\eta = 2.132 - 0.092x$ (línea roja). El R^2 del modelo global es 0.49. Los modelos ajustados corresponden al predictor lineal (i.e. η , ver materiales y métodos para más detalles).

4.3.4. Tiempo de sacarificación

En la gran mayoría de las muestras se observaron tiempos de sacarificación entre 10 y 15 minutos (i.e. el 93.4 % de las muestras), mientras que el 3.7 % de las muestras presentó un tiempo de sacarificación entre 5 y 10 minutos, y el 2.9 % de las muestras lo hizo en un periodo de 15 a 20 minutos (Cuadro 4.1). El tiempo de sacarificación no se asoció a la concentración proteica de los granos ($p = 0.19$, Fig. 4.6.a). El tiempo de sacarificación se asoció con la relación N:S en grano considerándola como variable cuantitativa ($p < 0.05$, Fig. 4.6.b). Las relaciones N:S en grano más elevadas se asociaron a incrementos en la probabilidad de obtener tiempos de sacarificación mayores (i.e. 15 a 20 minutos, Fig. 4.6.b). Cabe destacar que la estimación en los casos de muy elevada relación N:S en grano se realizó con pocas observaciones (i.e. mientras que 32 muestras de granos poseían una relación N:S por encima de 20, sólo 6 muestras de granos presentaron una relación N:S > 30). Por otro lado, los valores más bajos de calibre se asociaron a incrementos en la probabilidad de obtener tiempos de sacarificación más altos (i.e. 15 a 20 minutos, $p < 0.01$, Fig. 4.6.c). Si bien se

observaron 71 muestras con un calibre menor a 85%, cabe destacar que sólo 6 poseían un calibre menor a 70%. Teniendo en cuenta estos recaudos al momento de realizar predicciones, en granos con relación N:S de 30, la probabilidad de que el tiempo de sacarificación se encuentre entre 15 y 20 minutos fue del 16 %. En el caso de granos con calibre de 70 %, la probabilidad de que el tiempo de sacarificación sea de 15 a 20 minutos fue del 10 %.

En el rango de proteína requerido por la industria (i.e. 9.5 a 13 %), el 91% de las muestras presentaron un tiempo de sacarificación entre 10 y 15 minutos, mientras que 3.7 % presentaron tiempos de sacarificación entre 5 y 10 minutos y 5.3 % lo hicieron en 15 a 20 minutos. Los granos con mayor concentración proteica tendieron a poseer mayores tiempos de sacarificación ($p = 0.09$, Fig. 4.6.d). El tiempo de sacarificación fue afectado por la relación N:S en grano (como variable cuantitativa, $p < 0.05$) y por el calibre de los granos ($p < 0.01$). A mayor relación N:S en grano, mayor probabilidad de ocurrencia de un mayor tiempo de sacarificación. En granos cuya relación N:S fue 30, la probabilidad de ocurrencia de tiempos de sacarificación de 15 a 20 minutos fue del 23 % (Fig. 4.6.e). Asimismo, los granos con menor calibre presentaron una mayor probabilidad de ocurrencia de un mayor tiempo de sacarificación. En granos cuyo calibre fue de 70 %, la probabilidad de ocurrencia de tiempos de sacarificación en el rango 15-20 minutos fue del 20 % (Fig. 4.6.f).

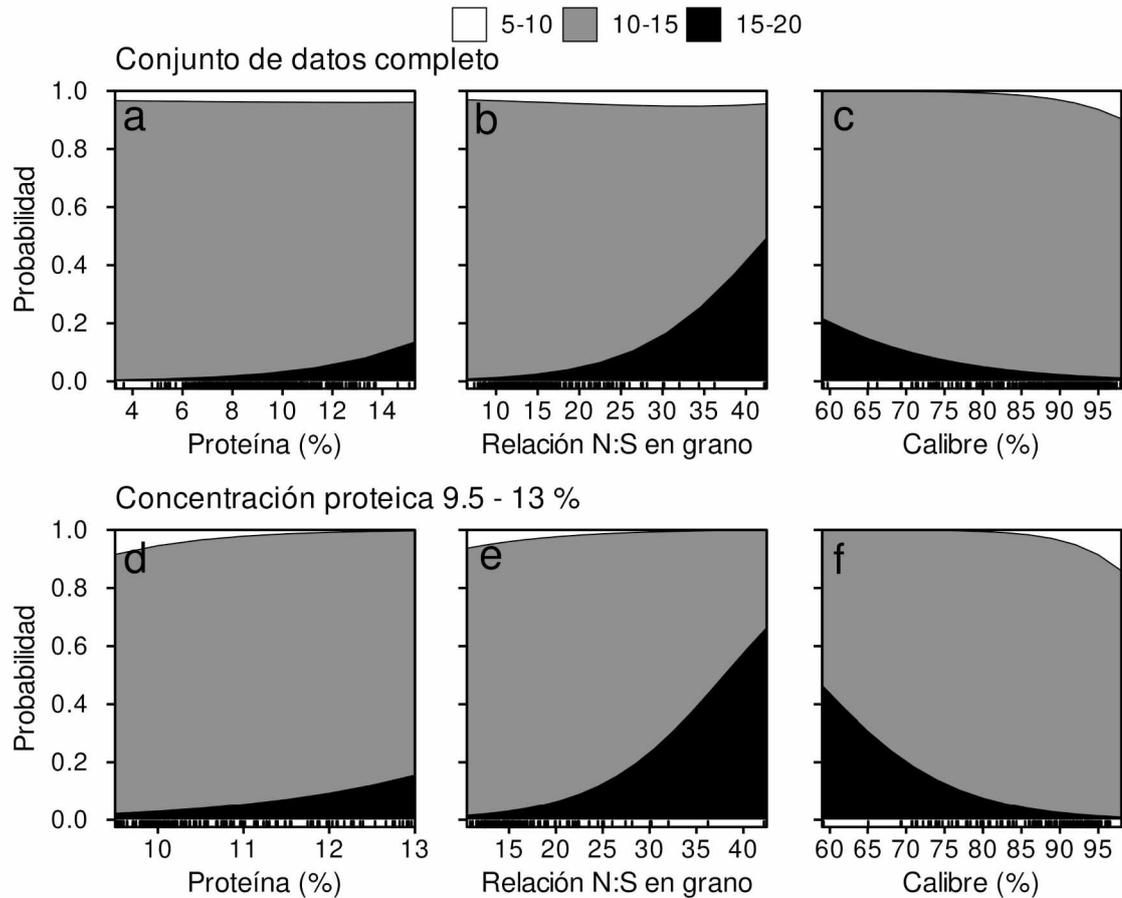


Figura 4.6. Probabilidad de ocurrencia de cada categoría de tiempo de sacarificación (en minutos), en relación a a) y d) la concentración proteica de los granos (%); b) y e) la relación N:S en grano (g N g S⁻¹, como variable cuantitativa); c) y f) el calibre de los granos (%). El panel superior refiere a todo el conjunto de datos, mientras que el panel inferior refiere al subconjunto de datos correspondientes al rango de concentración proteica en grano de 9.5 - 13 %. El relleno del área de los gráficos corresponde a categorías de tiempo de sacarificación: el relleno vacío corresponde a 5 a 10 minutos, el gris a 10-15 minutos y el negro a 15 a 20 minutos. Las líneas verticales sobre el eje de abscisas representan las observaciones. Los modelos ajustados se presentan en el Cuadro S.4.1 del material suplementario.

4.3.5. Tiempo de filtración

La mayoría de las muestras presentaron un tiempo de filtración 'normal' (i.e. el 68.3 % de las muestras, Cuadro 4.1). El tiempo de filtración no se asoció a la concentración proteica ($p = 0.27$) ni al calibre de los granos ($p = 0.84$). El tiempo de filtración se asoció con la relación N:S en grano ($p < 0.01$). El modelo más adecuado para los datos fue el que presentó tres grupos de relaciones N:S en grano (i.e. a partir del modelo con 6 grupos de relaciones N:S en grano, se redujo a un modelo con 3 grupos sin incrementar el error, $p = 0.28$). Los grupos de relaciones N:S en grano conformados se correspondieron a relaciones N:S menores a 10.1; entre 10.1 y 17.7; y mayores a 17.7 (Fig. 4.7.a). La probabilidad de que el tiempo de filtración sea mayor a 60 minutos se incrementó en aquellas muestras en las que la relación N:S de sus granos era mayor. En granos cuya relación N:S era menor a 10.1, la probabilidad de ocurrencia de tiempos de filtración mayor a 60 minutos fue de 13.9 %, mientras que en granos con relación N:S

entre 10.1 y 17.7 fue de 31.3 % y en granos que poseían relación N:S mayor a 17.7 fue del 50 % (Fig. 4.7.a).

En el rango de proteína requerido por la industria (i.e. 9.5 a 13 %), el 66.9 % de las muestras presentaron un tiempo de filtración normal, mientras que el 33.1 % un tiempo de filtración mayor a 60 minutos. En este subconjunto de datos, el tiempo de filtración no se asoció con la concentración proteica de los granos ($p = 0.13$) ni con el calibre de los granos ($p = 0.79$). Sin embargo, el tiempo de filtración se asoció con la relación N:S en grano ($p < 0.01$). El modelo más adecuado para los datos fue el que presentó dos grupos de relaciones N:S en grano (i.e. la reducción del modelo a 2 grupos no incrementó el error, $p = 0.74$). Los grupos de relaciones N:S en grano conformados fueron aquellos con relación N:S entre 10.1 y 17.7; y mayores a 17.7 (Fig. 4.7.b). La probabilidad de obtener un tiempo de filtración mayor a 60 minutos aumentó de 27.2 a 53.3 %, en granos con relación N:S > 17.7 respecto a los que poseen relación N:S entre 10.1 y 17.7 (Fig. 4.7.b).

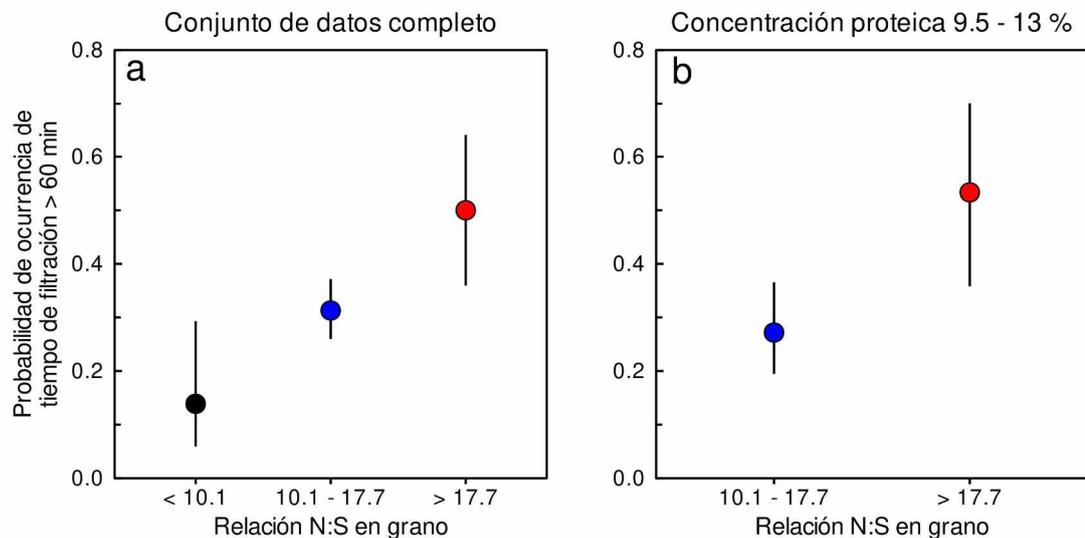


Figura 4.7. Probabilidad de ocurrencia de tiempo de filtración mayor a 60 minutos en distintos grupos de relación N:S en grano (g N g S^{-1}), a) en el conjunto de datos completo y b) en el subconjunto de datos correspondientes al rango de concentración proteica en grano de 9.5 - 13 %. Los círculos llenos indican el valor medio de probabilidad estimada y las barras verticales el intervalo de confianza de la misma. Los modelos ajustados se presentan en el Cuadro S.4.2 del material suplementario.

4.3.6. Hordeínas y relación N:S en grano

Los valores medios y el rango del contenido total de hordeínas, la concentración de los distintos tipos de hordeínas (B, C, D y γ) y la relación de hordeínas B:C se presentan en el Cuadro 4.1.

La cantidad total de hordeínas no se modificó frente a cambios en la concentración proteica de los granos, cuando el mismo fue inferior a 7.2 %. Cuando la concentración proteica de los granos fue superior a 7.2 %, el contenido total de hordeínas se asoció positivamente a la concentración de proteína de los granos (Fig. 4.8.a). La concentración de hordeínas-B y C aumentó frente al incremento en la concentración proteica de los granos. Sin embargo, el incremento en la concentración de hordeínas-C fue mayor, proporcionalmente, respecto al observado en hordeínas-B (Fig. 4.8.b). La relación de hordeínas B:C presentó una asociación negativa con la concentración proteica de los granos (Fig. 4.8.c), mientras que se asoció de manera negativa y

curvilínea con la relación N:S en grano (Fig 4.8.d). La asociación entre la relación de hordeínas B:C y la relación N:S en grano fue más estrecha que la hallada con la concentración proteica de los granos ($R^2 = 0.67$ y 0.43 , respectivamente).

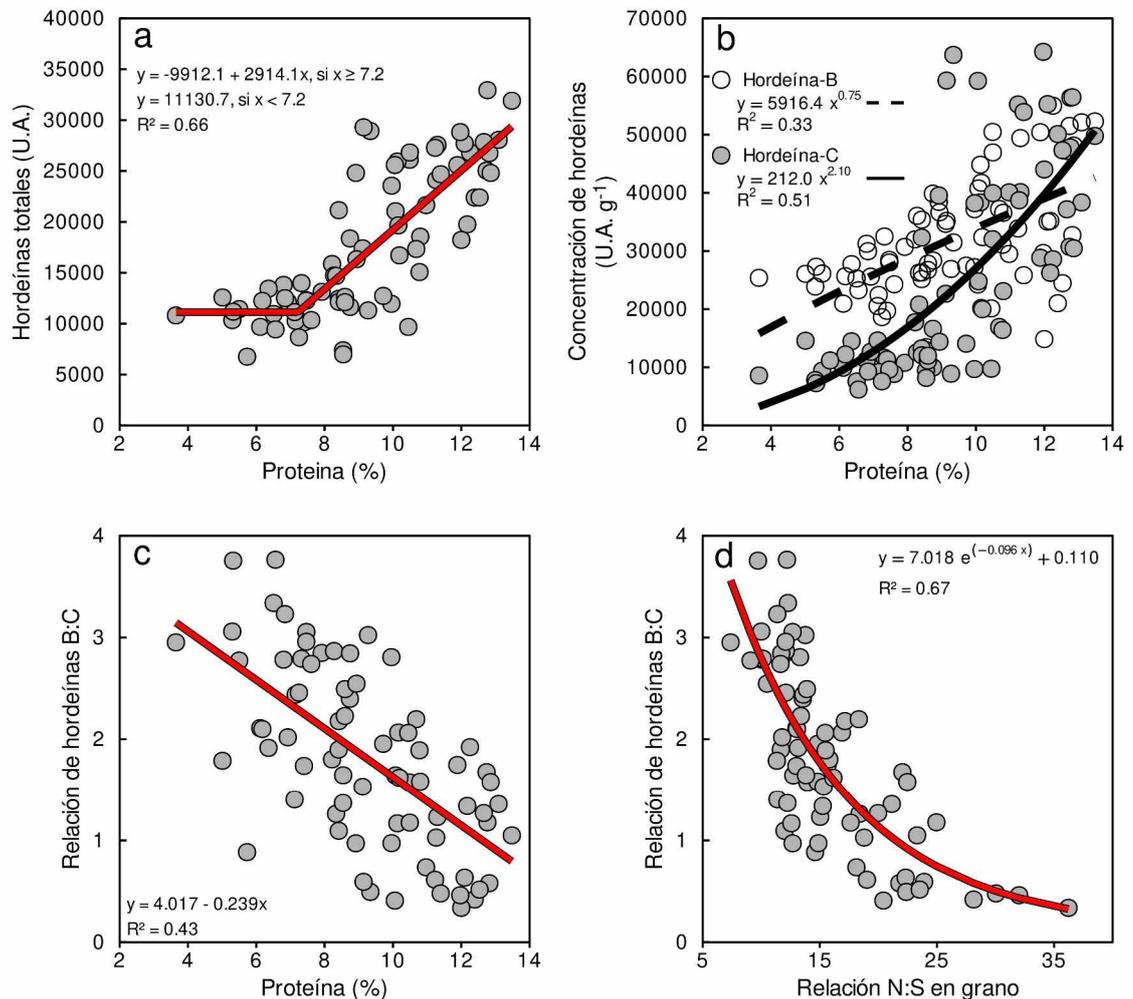


Figura 4.8. a) Relación entre el contenido total de hordeínas y la concentración proteica de los granos. b) Relación entre la concentración de hordeínas-B y C y la concentración proteica de los granos. Los símbolos vacíos refieren a las hordeínas-B, mientras que los círculos llenos a las hordeínas-C. La línea punteada corresponde al modelo ajustado a las hordeínas-B, mientras que la línea sólida al modelo ajustado para las hordeínas-C. c) Relación entre la relación de hordeínas B:C y la concentración proteica de los granos. d) Relación entre la relación de hordeínas B:C y la relación N:S en grano.

La clasificación de muestras en función de la relación N:S en grano y la relación de hordeínas B:C se presentan en la figura 4.9a y 4.9b, respectivamente. La clasificación en dos grupos a partir de la relación N:S en grano se realizó con el mismo límite establecido en el conjunto de datos completo (< 17.7 y ≥ 17.7), que se correspondió con el cuantil 72 de este subconjunto de datos (i.e. el 28 % de las muestras tenían una elevada relación N:S en grano). En el caso de la relación de hordeínas B:C, se dividió este subconjunto de muestras en dos grupos que presentaron valores de relación B:C por debajo o por encima de 1.2, correspondiente al cuantil 28 (i.e. el complemento del cuantil 72 proveniente de la relación N:S en grano de 17.7, Fig. 4.9.b).

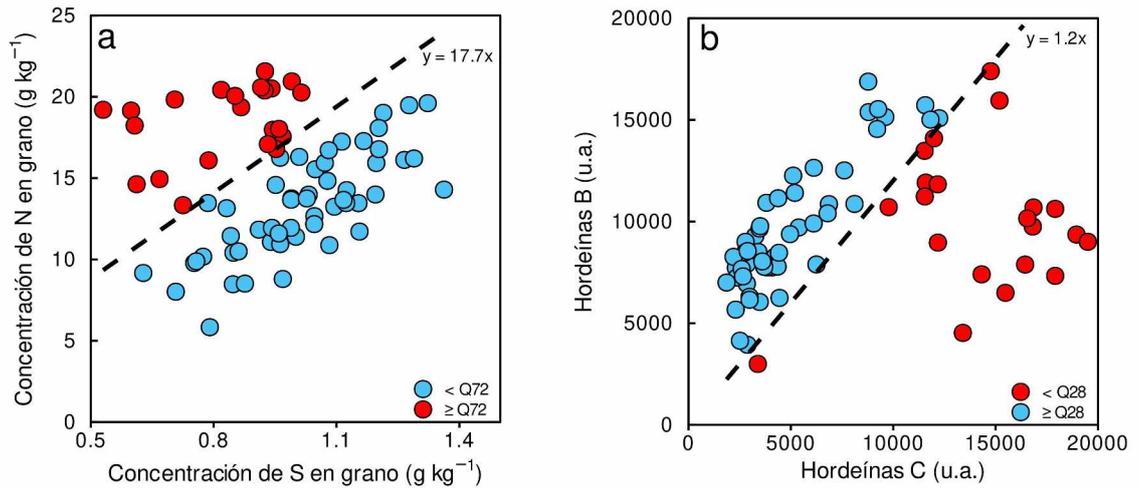


Figura 4.9. a) Relación entre la concentración de N en grano y la concentración de S en grano. La línea punteada corresponde a la relación N:S de 17.7 (i.e. pendiente de la función correspondiente al cuantil 72 %). b) Relación entre la cantidad de hordeínas-B y la cantidad de hordeínas-C. La línea punteada corresponde a la relación de hordeínas B:C de 1.2 (i.e. pendiente de la función correspondiente al cuantil 28 %). En a) los colores de los símbolos refieren a los grupos de relación N:S en grano. Los símbolos celestes corresponden a las observaciones de granos con relación N:S < 17.7 y los símbolos rojos corresponden a las observaciones de granos con relación N:S ≥ 17.7 . En b) los colores de los símbolos refieren a los grupos de relación de hordeínas B:C en grano. Los símbolos celestes corresponden a las observaciones de granos con relación de hordeínas B:C ≥ 1.2 y los símbolos rojos corresponden a las observaciones de granos con relación de hordeínas B:C < 1.2 .

La relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos fue afectada por la relación N:S en grano ($p < 0.001$, Fig. 4.10.a) y por la relación de hordeínas B:C ($p < 0.001$, Fig. 4.10.b). A partir de granos con relación N:S ≥ 17.7 se obtuvo en promedio ~ 2.2 % menos de extracto de malta respecto a granos con relación N:S < 17.7 (84.7 vs. 82.8 %, Fig. 4.10.a). Los granos con relación de hordeínas B:C < 1.2 presentaron en promedio valores de extracto de malta ~ 2.5 % menor respecto al observado en granos con relación de hordeínas B:C ≥ 1.2 (83.2 vs. 85.3, Fig. 4.10.b). El modelo ajustado para relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos según la relación de hordeínas B:C fue más adecuado respecto a aquel ajustado utilizando a la relación N:S en grano para diferenciarlos (BIC 289.4 vs. 276.9 para la relación N:S en grano y la relación de hordeínas B:C; cuanto menor es el valor, mejor; Fig. 4.10.a y b, respectivamente).

La relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos fue afectada por la relación N:S en grano ($p < 0.001$, Fig. 4.10.c) y por la relación de hordeínas B:C ($p < 0.001$, Fig. 4.10.d). En granos con una concentración proteica del 11 %, la friabilidad de malta disminuyó ~ 25.5 % en granos con relación N:S ≥ 17.7 respecto a aquellos cuya relación N:S fue < 17.7 (65.4 vs. 87.8 %, Fig. 4.10.c). En granos con una concentración proteica del 11 %, la friabilidad de malta disminuyó ~ 29.9 % en granos con relación de hordeínas B:C < 1.2 respecto a aquellos cuya relación de hordeínas B:C fue ≥ 1.2 (58.2 vs. 83.1 %, Fig. 4.10.d). Análogamente a lo observado en extracto de malta, el modelo ajustado a la relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos según la relación de hordeínas B:C fue más adecuado que el que utilizó la relación N:S en grano (BIC -188.9 vs. -204.7 para la

relación N:S en grano y la relación de hordeínas B:C; cuanto menor es el valor, mejor; Fig. 4.10.c y d, respectivamente).

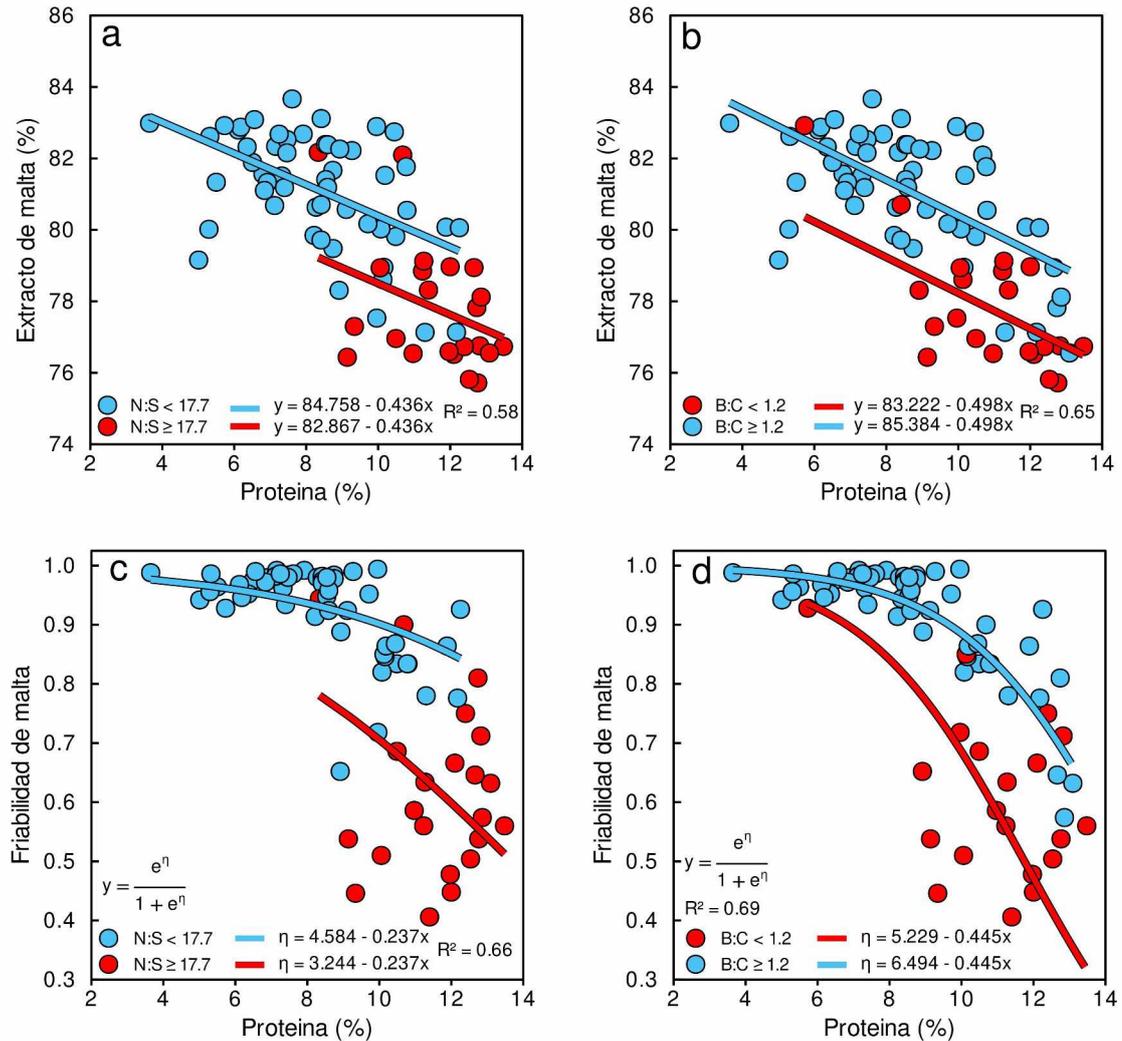


Figura 4.10. a) Relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos, según grupos de relación N:S en grano. b) Relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos, según grupos de relación de hordeínas B:C. c) Relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos, según grupos de relación N:S en grano. d) Relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos, según grupos de relación de hordeínas B:C. En a) y c) los colores de los símbolos refieren a los grupos de relación N:S en grano. Los símbolos celestes corresponden a las observaciones de granos con relación N:S < 17.7 y los símbolos rojos corresponden a las observaciones de granos con relación N:S ≥ 17.7 . En a) los modelos ajustados son: i) N:S < 17.7: $y = 84.758 - 0.436x$ (línea celeste); ii) N:S ≥ 17.7 : $y = 82.867 - 0.436x$ (línea roja). El R^2 para el modelo global es 0.58 y el BIC es 289.4. En c) los modelos ajustados son: i) N:S < 17.7: $\eta = 4.584 - 0.237x$ (línea celeste); ii) N:S ≥ 17.7 : $\eta = 3.244 - 0.237x$ (línea roja). El R^2 para el modelo global es 0.66 y el BIC es -188.9. En b) y d) los colores de los símbolos refieren a los grupos de relación de hordeínas B:C en grano. Los símbolos celestes corresponden a las observaciones de granos con relación de hordeínas B:C ≥ 1.2 y los símbolos rojos corresponden a las observaciones de granos con relación de hordeínas B:C < 1.2. En b) los modelos ajustados son: i) B:C < 1.2: $y = 83.222 - 0.498x$ (línea roja); ii) B:C ≥ 1.2 : $y = 85.384 - 0.498x$ (línea celeste). El R^2 para el modelo global es 0.65 y el BIC es 276.9. En d) los modelos ajustados son: i) B:C < 1.2: $\eta = 5.229 - 0.445x$ (línea roja); ii) N:S ≥ 1.2 : $\eta = 6.494 - 0.445x$ (línea celeste). El R^2 para el modelo global es 0.69 y el BIC es -204.7. En c) y d) los modelos ajustados corresponden al predictor lineal (i.e. η , ver materiales y métodos para más detalles).

4.4. Discusión

Se exploró una gran variabilidad de ambientes (i.e. combinación sitio x año x disponibilidad de N y S), lo cual se reflejó en un amplio rango de rendimientos observados (Cuadro 4.1). La variabilidad explorada también se reflejó en amplias variaciones de las características del grano (calibre y relación N:S en grano) y sus atributos de calidad industrial (concentración proteica de los granos, extracto y friabilidad de malta) (Cuadro 4.1).

El extracto de malta no disminuyó al incrementarse la concentración proteica de los granos en todo el rango de proteína en grano estudiado: el extracto de malta disminuyó frente al incremento en la concentración proteica de los granos cuando la proteína en grano fue mayor a 7.4 y no varió cuando fue inferior a ese valor (Fig. 4.2). La relación inversa entre extracto de malta y la concentración proteica de los granos es ampliamente conocida (Bishop, 1930; Eagles et al., 1995; Prystupa et al., 2021). Esto se debe a que las proteínas que recubren los gránulos de almidón limitan su degradación durante el macerado (Slack et al., 1979). En la mayoría de los estudios previos se observó una disminución lineal del extracto de malta cuando aumenta la concentración proteica de los granos en todo el rango de proteína en grano estudiado (Bishop, 1930; Eagles et al., 1995; Howard et al., 1996; Molina-Cano et al., 1997; Prystupa et al., 2021). Sin embargo, en al menos dos trabajos previos se observó una mayor estabilidad del extracto de malta en las situaciones de valores bajos de proteína en grano. Molina-Cano et al. (2000) observaron una mayor estabilidad del extracto de malta con bajos niveles de concentración proteica en grano y lo representaron con un modelo cuadrático, mientras que Otero et al. (2021) observaron una relación plateau-lineal con distintos umbrales dependiendo el genotipo utilizado. En la mayoría de los trabajos en los que la relación descrita entre el extracto de malta y la concentración proteica en grano fue del tipo lineal, no observaron valores de proteína en grano por debajo del 8 %. Es probable que la falta de asociación entre estas variables sólo se corrobore en los casos de concentraciones proteicas en grano muy bajas. Cabe destacar que los valores de proteína en grano que no se relacionaron con el extracto de malta en este capítulo se encuentran por debajo del mínimo requerido por la industria maltera (i.e. 9.5 %).

La relación N:S en grano afectó al extracto de malta obtenido: para una misma concentración proteica de los granos (principal determinante del extracto de malta), en los granos cuya relación N:S fue 'elevada' ($> 17.7 \text{ g N g S}^{-1}$) se obtuvo una menor cantidad de extracto de malta respecto a granos con una menor relación N:S (Fig. 4.3.a). Los cambios en la relación N:S en grano reflejaron cambios en composición de las hordeínas presentes en el grano. El incremento en la relación N:S en grano estuvo asociada a la disminución en la proporción de las fracciones de hordeínas-B (ricas en S) y, por lo tanto, de la relación de hordeínas B:C (Fig 4.8.d). Confirmando que el menor extracto de malta obtenido en granos con elevada relación N:S se debió a cambios en la composición proteica, las muestras con mayor proporción de hordeínas ricas en S (relación de hordeínas B:C ≥ 1.2) produjeron maltas con mayores valores de extracto a igualdad de concentración de proteínas totales en el grano (Fig. 4.10.b). La forma o patrón observado en la relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos frente a variaciones en la relación N:S en grano fue similar a la observada en la misma relación (i.e. extracto de malta vs. proteína) según la relación de hordeínas B:C. En estas relaciones, se diferenciaron dos grupos de muestras: aquellas con elevada relación N:S en grano o baja relación de hordeínas B:C (de las que se obtuvo menor

extracto de malta), y otras, con baja relación N:S en grano o elevada relación de hordeínas B:C (de las cuales se obtuvo mayor extracto de malta) (Fig. 4.10.a y d). La variación en el extracto de malta logrado en función de la relación N:S en grano (y de la relación de hordeínas B:C) podría atribuirse al comportamiento diferencial de las distintas fracciones de hordeína durante el malteado de los granos. Durante el malteado, las hordeínas-D son totalmente degradadas (Flodrová et al., 2012), una gran proporción de las hordeínas-B son hidrolizadas, mientras que las hordeínas-C poseen una menor tasa de degradación (Celus et al., 2006). En concordancia, Ferrari et al. (2010) observaron que los granos duros ('steely'), los cuales se caracterizaron por poseer una baja tasa de modificación durante el malteado, poseían una elevada proporción de hordeínas-C.

La concentración y la composición de proteínas no fueron dos características totalmente independientes. El incremento de la concentración proteica de los granos estuvo asociado a un mayor incremento de hordeínas-C respecto a las B, y consecuentemente, una disminución de la relación de hordeínas B:C (Fig. 4.8.b y c). Sin embargo, el nivel de asociación entre estas variables y la concentración proteica de los granos fue relativamente bajo, particularmente en el caso de las hordeínas-B ($R^2 = 0.33$, Fig. 4.8.b). Esto sugiere que los cambios en la composición de hordeínas frente al incremento en el contenido proteico de los granos se deben mayormente a un incremento de las hordeínas-C ($R^2 = 0.51$, Fig. 4.8.b). Los cambios observados en las fracciones de hordeínas y la relación de hordeínas B:C asociados a cambios en la concentración proteica total de los granos, son concordantes con los reportados en estudios previos donde se evaluó el efecto de modificaciones en la disponibilidad de N (Kirkman et al., 1982; Griffiths, 1987; Savin et al., 2006; Qi et al., 2006).

La friabilidad de malta se asoció de forma negativa con la concentración proteica de los granos (Fig. 4.4), en concordancia con lo observado en estudios previos que reportaron una relación negativa entre la concentración proteica de los granos o la fertilización nitrogenada y la friabilidad de malta (Gianinetti et al., 2005; Holopainen et al., 2015). Por otro lado, la relación N:S en grano afectó la friabilidad de malta: para un mismo valor de concentración proteica de los granos, la friabilidad de la malta fue menor en granos cuya relación N:S fue 'elevada' ($N:S > 17.7 \text{ g N g S}^{-1}$) (Fig. 4.5.a). No hay antecedentes que indiquen que la relación N:S en grano modifica la relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos. Sin embargo, otros estudios observaron que, frente al agregado de S, se incrementaba la friabilidad (Zhao et al., 2006) o disminuía la dureza de malta (Prystupa et al., 2019). La influencia del S no está del todo clara, aunque en líneas generales se ha observado una mayor actividad enzimática frente al agregado de S. Zhao et al. (2006) reportaron el incremento del poder diastásico y la friabilidad de la malta, mientras que disminuía el contenido de β -glucanos en el mosto frente al agregado de S. La mayor actividad enzimática por agregado de S podría atribuirse al incremento de la proporción de hordeínas-B (ricas en S) dado que estas son más fácilmente hidrolizadas durante el malteo, como se describió anteriormente. Análogamente a lo observado con el extracto de malta, la forma o patrón de la relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos según la relación N:S de los granos fue similar a la observada en la misma relación (i.e. friabilidad de malta vs. proteína) según la relación de hordeínas B:C. En estas relaciones, se diferenciaron dos grupos de muestras: aquellas con elevada relación N:S en grano o baja relación de hordeínas B:C (en las que la friabilidad de malta fue menor) y, por otro lado, aquellas con baja relación N:S en grano o elevada relación de hordeínas B:C (en las que la friabilidad de malta fue mayor) (Fig. 4.10.c y d).

Tanto en el extracto como en friabilidad de malta, la utilización de la relación de hordeínas B:C para diferenciar grupos de relaciones entre estas variables y la concentración proteica de los granos fue más adecuado respecto a la utilización de la relación N:S (i.e. el BIC de los modelos ajustados con la relación de hordeínas B:C fue menor que el obtenido con la relación N:S en grano, Fig. 4.10.a, b, c y d). A pesar de ello, las modificaciones similares observadas en el extracto y la friabilidad de malta (para un mismo contenido proteico) según la relación N:S en grano (Fig. 4.10.a y c) y la relación de hordeínas B:C (Fig. 4.10.b y d), además de la asociación observada entre estas variables (Fig. 4.8.d), sugieren que la relación N:S es un indicador adecuado de la composición proteica de los granos, y de sus efectos sobre el extracto y la friabilidad de malta.

La relación N:S en grano también afectó el tiempo de sacarificación y la velocidad de filtración. Los granos con relación N:S 'elevada' ($N:S > 17.7 \text{ g N g S}^{-1}$) presentaron mayores probabilidades de obtener tiempos de sacarificación y de filtración más largos (Fig. 4.6.b y e, 4.7.a y b). Los mayores tiempos de sacarificación indican una menor actividad enzimática (i.e. enzimas que hidrolizan el almidón, α - y β -amilasa). Cabe destacar que el tiempo de sacarificación es un atributo que normalmente no es analizado estadísticamente y suele reportarse sólo su valor en algunos estudios de calidad de malta (Béndek y Kádár, 1988; Jin et al., 2008; Jin et al., 2012).

Por otro lado, los granos con relación N:S 'elevada' presentaron mayor probabilidad de obtener tiempos de filtración más largos (Fig. 4.7.a y b). Esto podría atribuirse a que los granos con elevada relación N:S poseen una baja proporción de germinación, debido a una dormición impuesta por las glumelas y a la incapacidad de los granos de degradar el ácido abscísico durante su imbibición (Galotta et al., 2019). A su vez, los granos con baja germinación presentan una menor modificación del endosperma debido a una limitación en la degradación de paredes celulares, lo cual se asocia a una menor obtención de extracto de malta, mayor viscosidad del mosto y problemas de filtración (Schwarz y Li, 2011).

En resumen, las elevadas relaciones N:S en grano (o reducidas relaciones de hordeínas B:C) provocaron una menor modificación del grano durante el malteado (que se reflejó en una menor friabilidad), una menor transformación del almidón durante la maceración (por lo que se observaron mayores tiempos de sacarificación) y, por lo tanto, un menor nivel de extracto de malta y un mayor tiempo de filtración. Estos cambios en la transformación de los granos durante el malteado estuvieron asociados a la mayor proporción de hordeínas-C (respecto de las hordeínas-B) en las proteínas de los granos, las cuales sufren una menor degradación durante el malteado.

4.5. Conclusiones

Además de la concentración de N, la relación N:S en grano tuvo un impacto relevante sobre la calidad de malta. Los granos con una elevada relación N:S (i.e. $> 17.7 \text{ g N g S}^{-1}$) presentaron una menor calidad de malta debido a que presentaron menores valores de extracto y friabilidad de malta, y mayor probabilidad de obtener tiempos de sacarificación y de filtración más elevados. El agrupamiento de relaciones N:S que se generaron para los distintos atributos de calidad evaluados fueron similares, y permitieron, en general, una separación de grupos de granos de relación N:S más recurrente (i.e. N:S 10.1 - 17.7, donde se ubica el 80 % de las muestras) y otros grupos con relación N:S baja y elevada. Las tendencias halladas en los distintos atributos de calidad evaluados frente a cambios en la relación N:S en grano, fueron similares tanto

en el conjunto de datos entero como en el subconjunto que correspondió a la concentración proteica en grano requerida por la industria (9.5 a 13 % de proteína). La relación N:S puede considerarse como un indicador de la composición proteica de los granos debida a que se asoció fuertemente con la relación de hordeínas B:C y, por otro lado, se verificó un patrón o comportamiento del extracto y la friabilidad de malta similar frente a la relación N:S en grano como a la relación de hordeínas B:C.

CAPÍTULO 5. Discusión general

En el presente capítulo se contextualizan los principales resultados hallados en esta tesis, se contrastan las hipótesis planteadas en la introducción general (capítulo 1) y se discuten las pruebas abordadas sobre las hipótesis en función de los resultados obtenidos (capítulos 2, 3 y 4). Además, se describen brevemente los conocimientos originales generados en la tesis, las consecuencias prácticas que devienen de ellos y, además, se presentan nuevos resultados prácticos. Por último, se plantean los interrogantes surgidos durante el desarrollo de la tesis y su implicancia en futuras líneas de investigación.

5.1. Contexto de la problemática abordada

Los nutrientes que más frecuentemente limitan la producción de los cultivos de granos en la región pampeana son el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el azufre (S). En el caso del N y el P, las deficiencias se conocen desde hace décadas, se consideran deficiencias generalizadas y han sido ampliamente estudiadas (Prystupa et al., 2004; O'Donovan et al., 2011; McDonald et al., 2018; Reussi Calvo et al., 2022). Por otro lado, las deficiencias de S se han convertido en una limitante importante de la producción agrícola en diversas regiones del mundo (Schnug y Haneklaus, 1998).

Para alcanzar el objetivo de alta productividad y calidad en cebada cervecera, es necesaria una regulación precisa del contenido de proteínas del grano sin detrimento del rendimiento en grano. La industria maltera y cervecera posee requerimientos de concentración de proteína en grano entre 9.5 y 13 %. Los granos por fuera de ese rango de concentración proteica quedan exceptuados de la comercialización para fines malteros y son destinados a forraje, cuyo valor de comercialización es inferior. Tanto los valores bajos como altos de proteína en grano afectan la calidad maltera de los granos (Briggs et al., 2004; Palmer, 2006). En los cultivos de cebada de la región pampeana, la concentración proteica de los granos se encuentra frecuentemente en valores cercanos o menores al 10 % (Prystupa et al., 2018). Cuantificar esta brecha, e identificar sus causas, aportaría información con la cual apoyar recomendaciones de cambios en el manejo del cultivo y contribuirían de soporte a los programas de mejoramiento del cultivo.

La concentración de N en grano junto con la concentración de S conforman la relación N:S en grano, la cual ha sido recomendada como herramienta de diagnóstico de deficiencia azufrada en varios cultivos de grano (Randall et al., 1981; Randall et al., 2003; Reussi Calvo et al., 2011; Salvagiotti et al., 2012; Carciochi et al., 2019). A su vez, las proteínas de reserva en cebada (i.e. hordeínas) difieren en cuanto a su contenido de S. Mientras que las hordeínas-B y las hordeínas-γ son ricas en S en su composición, las hordeínas-C son pobres en S (Shewry y Tatham, 1990). Se ha reportado que una elevada proporción de hordeínas-B o un incremento en la relación entre las hordeínas B:C se asocian a mayores valores de extracto de malta (Peltonen et al., 1994; Molina-Cano et al., 2002; Prystupa et al., 2019). Por lo tanto, la calidad de los granos de cebada no estaría relacionada sólo con la concentración de proteína sino también con la relación N:S en grano (Shewry, 2011). En base a lo planteado, resulta menester conocer cómo se modifica la concentración de N y S en grano en función de la economía interna de estos nutrientes en el cultivo (absorción, removilización y partición hacia granos). Si bien el metabolismo de N y S están relacionados, ha sido poco estudiado cómo se modifica la concentración de S en grano en función de la economía interna de S en el cultivo de cebada. En la figura 5.1 se representan de manera esquemática las relaciones entre la economía interna de N y de S del cultivo, las cuales en definitiva conforman la relación N:S en grano. A su vez, la relación N:S en grano estaría asociada a la calidad maltera de

los granos y, además, permitiría separar poblaciones de cultivos deficientes de S de aquellos que no lo son.

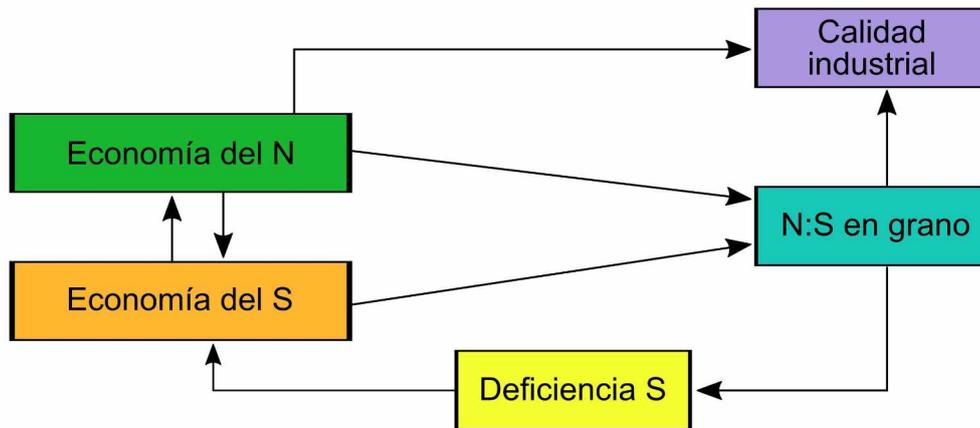


Figura 5.1. Esquema de las interrelaciones entre las variables más relevantes evaluadas.

La presente tesis abordó la influencia de la variación en la disponibilidad de nitrógeno y azufre sobre distintos caracteres o rasgos del cultivo de cebada cervecera en distintos eslabones de su producción: asociados a la producción de granos propiamente dicha (rendimiento y concentración proteica en grano) (capítulo 2), la partición de ambos nutrientes hacia el grano y su influencia en la relación N:S en grano (capítulo 3) y, por último, la incidencia de la relación N:S en grano sobre atributos de calidad maltera (asociados al rendimiento industrial, capítulo 4).

El objetivo general de esta tesis fue determinar el efecto de la nutrición nitrogenada y azufrada del cultivo de cebada cervecera sobre: i- la brecha de rendimiento y proteína, ii- la relación entre absorción, partición, removilización y concentración de N y S en los granos, y iii- la calidad industrial evaluada a través del extracto y la friabilidad de malta.

5.2. Aportes al conocimiento científico realizados en esta tesis

En base a la problemática abordada, en una primera instancia se determinó la brecha de rendimiento en grano y de proteína (i.e. Y_g y GP_g , respectivamente) en el cultivo de cebada cervecera en lotes de producción ubicados en el centro-norte de la provincia de Buenos Aires. La estimación de Y_g se realizó utilizando modelos de simulación y ensayos a campo, mientras que en el caso de GP_g su estimación se realizó a través de ensayos a campo. Se caracterizó el grado o nivel de limitación del rendimiento y de la concentración proteica en grano debida a N, S y la interacción N-S (capítulo 2). Posteriormente, se evaluó la variación de la concentración de N y S en grano, la removilización de N y S y la relación estequiométrica frente a cambios en la disponibilidad de estos nutrientes (capítulo 3). Por último, se analizó la influencia de la nutrición nitrogenada y azufrada (i.e. a través de la concentración proteica y la relación N:S en grano, respectivamente) sobre atributos de calidad maltera de los granos (i.e. extracto y friabilidad de malta, tiempos de sacarificación y de filtración, capítulo 4).

Los principales resultados obtenidos en el capítulo 2 se esquematizaron en la figura 5.2. La brecha de rendimiento en grano media fue de 26.1 % del rendimiento en grano potencial en secado (Y_w), equivalente a 1.7 Mg ha^{-1} . La brecha de proteína en grano media fue de 26.5 % del requerimiento proteico medio de la industria (GPI), equivalente

a 2.9 % de proteína. Tanto el rendimiento como la concentración proteica en grano se encontraron principalmente limitados por N. En promedio, ~ 62 % de Yg se debió a limitaciones por N y S, mientras que en el caso de GPg la proporción fue del 73 %. Del total de la limitación de la limitación del rendimiento y concentración proteica en grano por N y S, la mayor proporción fue atribuida a N (i.e. 66 y 87.5 % para rendimiento y proteína en grano, respectivamente). En concordancia con los resultados obtenidos, Mueller et al. (2012) estimaron que Yg de cebada en Argentina era 30.6 % del rendimiento alcanzable, lo que equivalía a 1.08 Mg ha⁻¹ (expresado en rendimientos del año 2000) y, además, que gran proporción de esta brecha de rendimiento se debía a deficiencias nutricionales. La limitación del rendimiento en grano debido a S ocurrió en situaciones puntuales (i.e. fue menos frecuente), y en general de menor magnitud que la limitación debida a N. La limitación del rendimiento en grano debida a S se asoció a suelos de textura gruesa (con baja humedad inicial y bajo contenido de materia orgánica) y elevada disponibilidad de N, esto último atribuible a la exacerbación de la deficiencia de S en situaciones de alta disponibilidad de N, lo cual ha sido reportado previamente en el cultivo de maíz (Franzen et al., 2016) y colza (Grant et al., 2012). Cabe destacar que la principal forma en que se encuentra el S en el suelo es bajo la forma de S orgánico y, además, una de las principales vías de entradas de S a los cultivos es a través de la mineralización de S desde la materia orgánica (Oenema y Postma, 2003). Respecto a la concentración proteica de los granos, la totalidad de los lotes de producción presentaron valores de proteína menores al requerimiento medio de la industria (i.e. 11 %) y solamente 12 % de los lotes productivos presentaron granos cuya concentración proteica se encontraba por encima del límite inferior de requerimiento de la industria (i.e. 9.5 %). Reussi Calvo et al. (2022) destacan como un rasgo característico de los cultivos de cebada cervecera local la baja concentración proteica de los mismos. En lo que respecta a la brecha de proteína, hasta mi conocimiento, no existen estudios previos que hayan aplicado el marco conceptual de brecha (i.e. la diferencia entre un valor objetivo y uno logrado a nivel de productor) para atributos de calidad comercial en un cultivo de grano.

Por otro lado, si bien la brecha de rendimiento y de proteína en grano fueron independientes entre sí, en la mayoría de los casos la brecha de proteína fue superior a la de rendimiento en grano (~ 62 % de los casos). Esto puede asociarse con el hecho de que el cultivo requirió absorber una mayor cantidad de N para alcanzar la concentración proteica en grano promedio que demanda la industria cervecera (i.e. 11 %), respecto a la cantidad necesaria para alcanzar el rendimiento máximo (i.e. parámetro b de la función ajustada rendimiento en grano vs. N absorbido a madurez). El cultivo requirió absorber 130 kg N ha⁻¹ para obtener el máximo rendimiento en grano (6.3 Mg ha⁻¹) y podría alcanzar una concentración proteica en grano de hasta 9.8 %. Sin embargo, para alcanzar una concentración proteica en grano del 11 % (i.e. el requerimiento medio de la industria), en condiciones medianas, el cultivo requirió absorber ~ 162 kg N ha⁻¹, el cual es un valor muy superior a la cantidad de N requerida para maximizar el rendimiento en grano. En concordancia con la presente tesis, otros autores han observado una relación curvilínea entre el rendimiento en grano y el incremento de la disponibilidad de N, mientras que la concentración proteica en grano incrementaba linealmente (McKenzie et al., 2004; O'Donovan et al., 2011). Incluso, en experimentos realizados en la misma región, Reussi Calvo et al. (2022) determinaron recientemente que la dosis de fertilizante N a la cual se maximiza el beneficio económico en función del rendimiento en grano esperado, en muchas situaciones no permitía alcanzar la mínima concentración proteica en grano requerido por la industria.

Los resultados obtenidos abarcan la hipótesis 1 planteada: "la brecha de proteína es mayor en términos relativos que la de rendimiento, y que la deficiencia de N explicará

una parte relevante de ambas, mientras que la deficiencia de S solo explica una proporción de la brecha de rendimiento y no posee impacto sobre la brecha de proteína". Esta hipótesis **se rechazó**. Si bien, Yg y GPg fueron similares (i.e. 26.1 y 26.5 %, respectivamente), la deficiencia de N explicó una parte importante de ambas brechas (i.e. ~ 37 % de Yg y 64 % de GPg). A pesar de que la deficiencia de N representó en términos medios el 37 % de Yg, cabe destacar que es un único factor que explica casi la misma proporción de Yg atribuible a otros factores (i.e. el 38.4 % que no es debida a N y S, Fig. 5.2).

A partir de los resultados obtenidos y habiendo cuantificado la relevancia de la limitación nitrogenada sobre todo en referencia a la concentración proteica en grano, quedaría por determinar cómo se modifica la concentración de N en grano en función de la economía interna de N del cultivo. Además, como se mencionó previamente en referencia a la calidad industrial de los granos, cobra relevancia también la composición proteica (contenido de S y relación N:S). Como el metabolismo del N y S están interrelacionados, surgió el interés en determinar cómo se modificaría la concentración de S en grano y otros componentes de la economía interna de S del cultivo en función de su disponibilidad. Esto se llevó adelante en el capítulo 3.

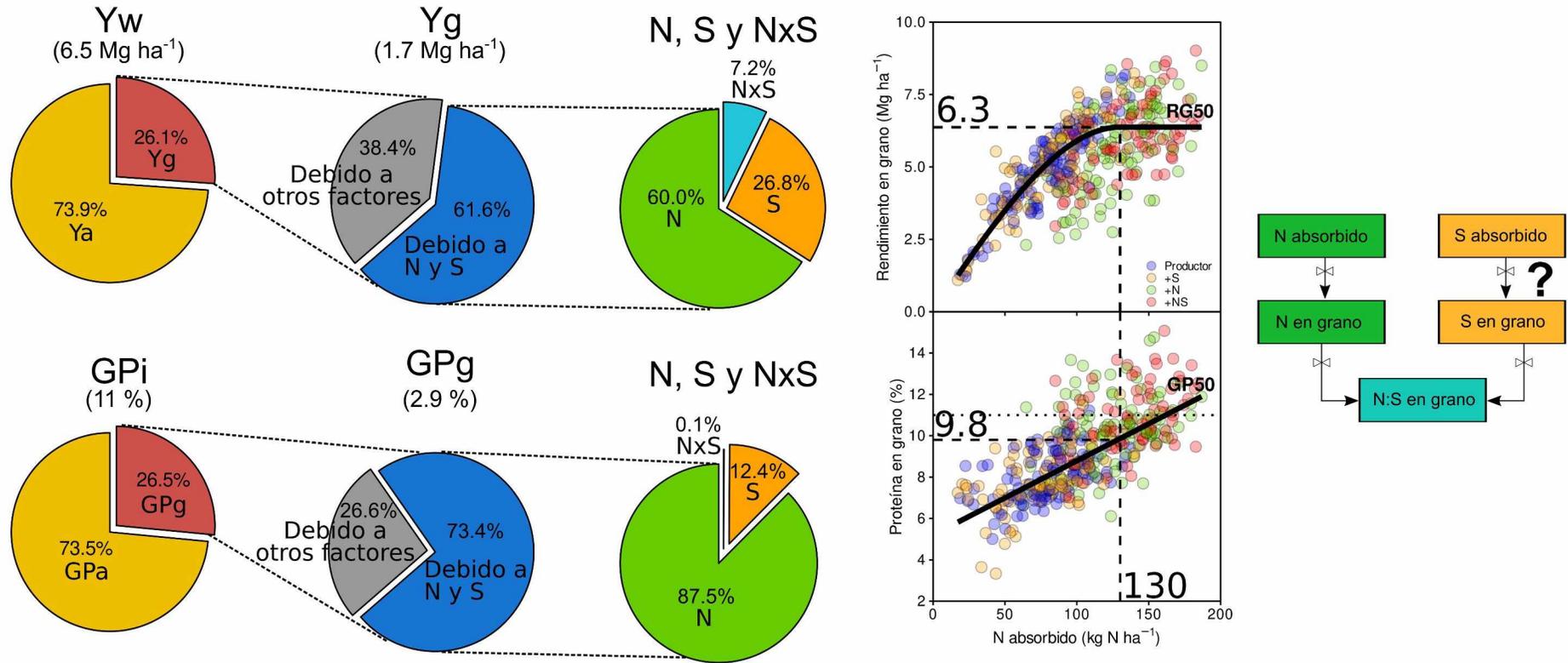


Figura 5.2. Esquema de variables analizadas en el capítulo 2. Se presentan los valores medios de las brechas de rendimiento y proteína en grano. Además, se incluyó la relación entre el rendimiento y la concentración proteica en grano y la cantidad de N absorbido por el cultivo a madurez.

En el capítulo 3 se evaluó la partición y removilización de N y S hacia los granos debido a que, en última instancia, la variación de estos nutrientes en el grano es lo que determina la concentración de proteína y la relación N:S. En dicho capítulo se analizó, comparativamente en N y S, tanto la relación entre la concentración en grano como la partición hacia los granos frente a modificaciones en la disponibilidad de estos nutrientes para los granos (i.e. cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano). Existe información acerca de la forma en que se particiona el N hacia los granos y la concentración de este nutriente en grano. Sin embargo, generalmente se ha evaluado la partición de N y/o la concentración de N en grano a través de la aplicación de tratamientos (fecha de siembra, dosis de fertilizante, evaluación de cultivares) (Abeledo et al., 2008; Maltese et al., 2019; Carciochi et al., 2020b; de Oliveira Silva et al., 2020), sin analizar la interrelación entre estas variables. Por otro lado, a diferencia de lo que ocurre con N, en el caso del S hay mucha menos información en la literatura.

Los principales resultados obtenidos en este capítulo se resumen en el esquema de la figura 5.3. La concentración de nutriente en grano y el índice de cosecha de nutriente presentaron diferente sensibilidad a la modificación en la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano, según el nutriente en cuestión (N o S) y la cantidad de nutriente disponible para particionar hacia los granos (i.e. cantidad de nutriente por unidad de rendimiento en grano). Cuando esta cantidad fue baja, la variación se encontró principalmente asociada a cambios en la concentración de nutriente en grano, mientras que el índice de cosecha de nutriente permaneció constante. Cuando la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento en grano fue media o alta, en el caso de N se observaron variaciones tanto en la concentración de N en grano como en el índice de cosecha de N, mientras que en el caso de S se modificó principalmente el índice de cosecha de S. Incluso, los cambios en el índice de cosecha de S se evidenciaron con menores niveles relativos de nutriente disponible para los granos respecto a lo que ocurrió con el índice de cosecha de N. Además, la tasa de disminución del índice de cosecha de nutriente fue mayor en S respecto a N. La mayor partición de N hacia los granos respecto a lo observado en S, condujo a que la concentración de N en grano tendió a triplicarse, mientras que la concentración de S en grano tendió a duplicarse.

La baja tendencia al cambio en la concentración de S en grano frente a moderados a altos niveles de S disponible para los granos permitiría explicar la nula y/o pequeña e inconsistente modificación de la concentración de S en grano frente al agregado de S, incluso en situaciones de consumo de lujo de este nutriente (Gupta y MacLeod, 1984; Lerner et al., 2006; Zhao et al., 2006; Nanamori et al., 2011; Holopainen et al., 2015; Carciochi et al., 2019).

La removilización de S fue menor que la de N, de manera análoga a lo observado por Eriksen et al. (2001). A su vez, la eficiencia de removilización de S (i.e. cociente entre la cantidad de S removilizado y la cantidad de S absorbido en anthesis) fue menor que la de N y fue afectada en mayor medida por la cantidad de S disponible para los granos, que en el caso de N. Tanto el índice de cosecha de N como de S presentaron una baja asociación con la eficiencia de removilización de N y S ($r = 0.61$ y $r = 0.43$, para N y S, respectivamente). Por último, la relación N:S en grano se asoció a la disponibilidad para los granos de N y no de S, de manera similar a lo observado en otros trabajos previos (Lerner et al., 2006; Zhao et al., 2006). Incluso, la relación estequiométrica N:S en grano se vio afectada únicamente por la situación desbalanceada que genera la condición de elevada disponibilidad de N y baja de S para los granos.

En base a los resultados obtenidos, **no se rechazó** la hipótesis 2: "la concentración de N en grano es más sensible que la de S a cambios en la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento. Comparada con N, la menor sensibilidad de la concentración de S en grano está asociada a una menor removilización de S durante el llenado de grano". Los resultados obtenidos reflejan que la concentración de N en grano fue más sensible (varía más) frente a cambios en la disponibilidad de este nutriente, respecto a lo observado en S. Esto se debió principalmente a una menor partición del S hacia los granos respecto a N (i.e. hay una mayor disminución del ICS respecto al ICN, y además, comienza a disminuir a menor cantidad de nutriente disponible). Tanto en N como en S, la disminución en la partición del nutriente hacia los granos estuvo asociada a una menor eficiencia de removilización del nutriente (i.e. el IC del nutriente se asoció a la eficiencia de removilización del nutriente, $r = 0.61$ y $r = 0.43$, para N y S, respectivamente). Sin embargo, en el caso de S la eficiencia de removilización fue menor a la observada en N (i.e. 69.6 y 46.3 %, para N y S, respectivamente) y, además, presentó una mayor disminución en la eficiencia de removilización frente al incremento en la disponibilidad del nutriente respecto a N (i.e. 9 y 18.3 %, para N y S, respectivamente). La mayor partición de N hacia los granos (o la menor de S) conllevó a que la relación N:S en grano estuviera gobernada por la variación de la concentración de N, dado que fue la que presentó mayor variabilidad (i.e. la concentración de S en grano rápidamente alcanzó un plateau).

Por otro lado, **no se rechazó** la hipótesis 3: "la relación estequiométrica N:S en grano es más estable (i.e. menor coeficiente de variación) que en biomasa vegetativa y, además, la relación estequiométrica N:S en grano no es afectada por el 'consumo de lujo' de uno de los dos nutrientes si el otro no es deficiente". Por un lado, la relación N:S en grano presentó menor variación respecto a la relación N:S en biomasa aérea (CV = 28.5 y 40.8 %, para grano y biomasa aérea, respectivamente). Por otro lado, la relación estequiométrica N:S en grano sólo fue afectada en la situación de elevada disponibilidad de N para los granos (i.e. consumo de lujo de N) y baja disponibilidad de S para los granos ($N_{\text{alto}}-S_{\text{bajo}}$). Esta acumulación de N en los granos por sobre la de S estaría asociada al incremento de proteínas de reserva con menor concentración de S respecto a las otras situaciones evaluadas. Por el contrario, la situación de alta disponibilidad de S y baja de N, no provocó una acumulación de S por sobre la de N. Es decir, la relación estequiométrica N:S no fue distinta de las situaciones con disponibilidad N y S balanceadas (ambas altas o bajas). La figura 5.3 esquematiza el marco conceptual abordado en este capítulo.

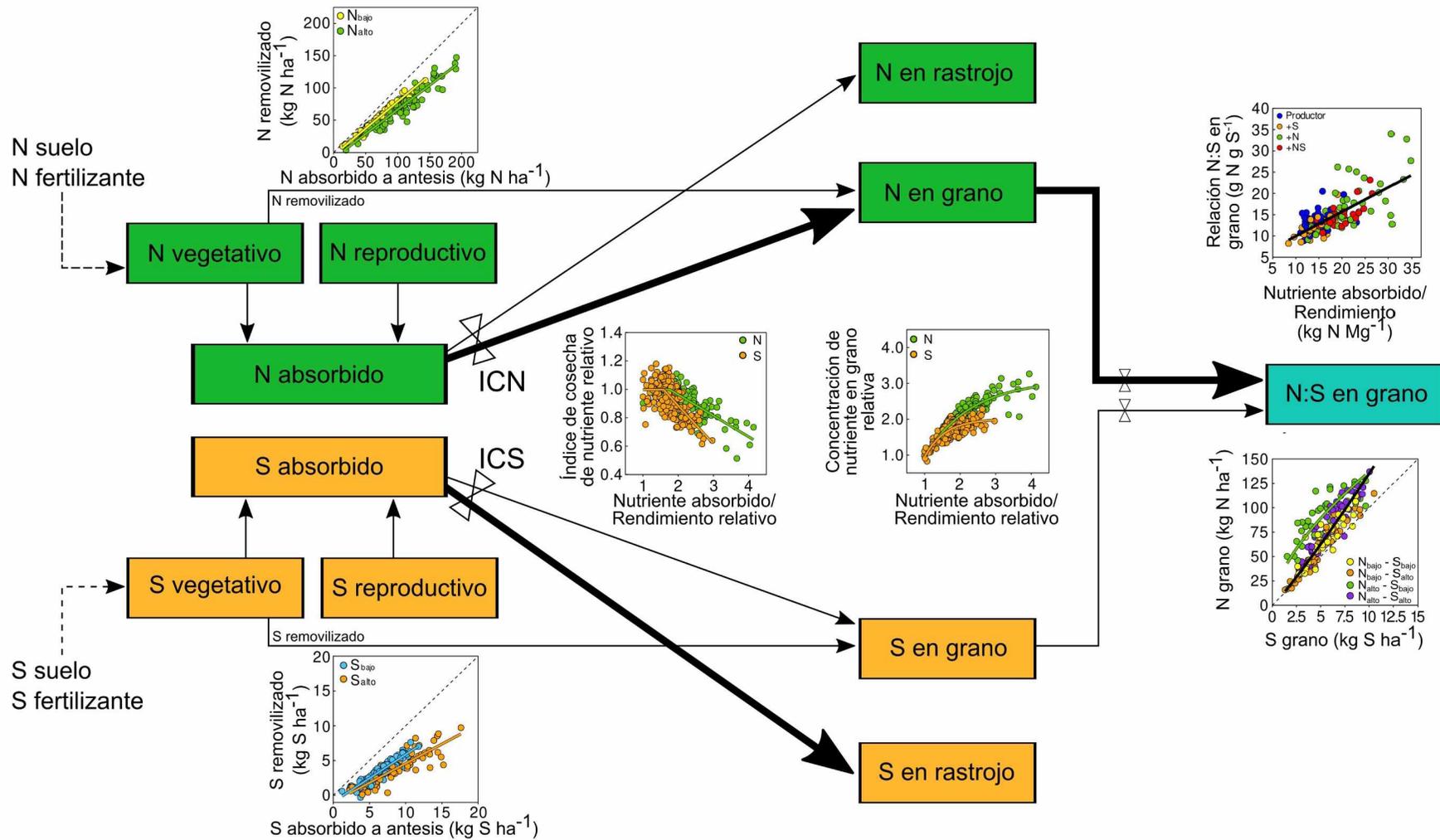


Figura 5.3. Esquema de relaciones evaluadas en el capítulo 3. Las líneas discontinuas corresponden a variables y/o procesos no evaluados. El tamaño de la flecha indica el nivel o grado que influencia de una variable sobre otra. En las relaciones evaluadas de mayor relevancia se adicionó la representación gráfica de los resultados.

Por último, en el capítulo 4 de esta tesis, se evaluó la influencia de la relación N:S en grano sobre distintos atributos de calidad maltera en cebada cervecera. Los rasgos de calidad maltera evaluados fueron la concentración proteica en grano, el extracto y la friabilidad de malta, y los tiempos de sacarificación y de filtración del mosto. Se trabajó con dos conjuntos de datos, de forma de evaluar los rasgos de calidad maltera en a) el conjunto de datos completos y b) el subconjunto de datos que se encontraban en el rango de concentración proteica requerido por la industria (i.e. 9.5 a 13 %). A su vez, se hicieron determinaciones de los distintos tipos de hordeínas de muestras provenientes de 7 experimentos.

Los resultados más relevantes de este capítulo se representaron de manera resumida en el esquema de la figura 5.4. Se puede destacar que el incremento en la concentración proteica de los granos conllevó no solo a un incremento en la cantidad de hordeínas, sino que también afectó la composición de las mismas. Frente al incremento en la concentración proteica de los granos, las hordeínas-C presentaron un incremento mayor respecto al observado en las hordeínas-B y, por tanto, disminuyó la relación de hordeínas B:C. Los cambios observados en las fracciones de hordeínas y la relación de hordeínas B:C asociados a cambios en la concentración proteica total de los granos, son concordantes con los reportados en estudios previos donde se evaluó el efecto de modificaciones en la disponibilidad de N (Kirkman et al., 1982; Griffiths, 1987; Savin et al., 2006; Qi et al., 2006). A su vez, la relación de hordeínas B:C se asoció de manera curvilínea y negativa con la relación N:S en grano.

Todos los atributos de calidad maltera evaluados fueron afectados por la relación N:S en grano. Entre ellos, los más importantes a destacar son el extracto y la friabilidad de malta. La relación N:S en grano afectó al extracto de malta obtenido. Para una misma concentración proteica en grano, en aquellos granos cuya relación N:S fue elevada ($> 17.7 \text{ g N g S}^{-1}$) se obtuvo una menor cantidad de extracto de malta respecto a granos con una menor relación N:S. Los cambios en la relación N:S en grano reflejaron cambios en la composición de las hordeínas presentes en el grano. El incremento en la relación N:S en grano estuvo asociada a la disminución en la proporción de las fracciones de hordeínas-B (ricas en S) y, por lo tanto, de la relación de hordeínas B:C. Confirmando que el menor extracto de malta obtenido en granos con elevada relación N:S se debe a cambios en la composición proteica, las muestras con mayor proporción de hordeínas ricas en S (relación de hordeínas B:C ≥ 1.2) produjeron maltas con mayores valores de extracto a igualdad de concentración proteica en el grano. La forma o patrón observado en la relación entre el extracto de malta y la concentración proteica de los granos frente a variaciones en la relación N:S en grano fue similar a la observada en la misma relación (i.e. extracto de malta vs. proteína) según la relación de hordeínas B:C. En estas relaciones, se diferenciaron dos grupos de muestras: aquellas con elevada relación N:S en grano o baja relación de hordeínas B:C (de las que se obtuvo menor extracto de malta), y otras, con baja relación N:S en grano o elevada relación de hordeínas B:C (de las cuales se obtuvo mayor extracto de malta). La variación en el extracto de malta logrado en función de la relación N:S en grano (y de la relación de hordeínas B:C) podría atribuirse al comportamiento diferencial de las distintas fracciones de hordeínas durante el malteado de los granos. Durante el malteado, una gran proporción de las hordeínas-B son hidrolizadas, mientras que las hordeínas-C poseen una menor tasa de degradación (Celus et al., 2006).

Análogamente al comportamiento diferencial observado para el extracto de malta según la relación N:S en grano, aquellos granos cuya relación N:S era elevada ($> 17.7 \text{ g N g S}^{-1}$) o su relación de hordeínas era baja (< 1.2), presentaron menor friabilidad de malta. Si bien no hay antecedentes que indiquen que la relación N:S en grano modifica la relación entre la friabilidad de malta y la concentración proteica de los granos, otros estudios

observaron que, frente al agregado de S, incrementaba la friabilidad (Zhao et al., 2006) o disminuía la dureza de malta (Prystupa et al., 2019). El efecto particular del S no es claro, aunque en términos generales se ha observado un incremento en la actividad enzimática en tratamientos fertilizados con S, resultando en el incremento del poder diastásico y la friabilidad de malta (Zhao et al., 2006). La mayor actividad enzimática por agregado de S podría atribuirse al incremento de la proporción de hordeínas-B (ricas en S) dado que estas son más fácilmente hidrolizadas durante el malteo, como se describió previamente.

De esta manera, se comprobó que la relación N:S en grano fue un indicador de la composición proteica de los granos. Los granos con elevada relación N:S presentaron una peor calidad de malta: se obtuvo una menor cantidad de extracto de malta, la malta poseía una menor friabilidad y presentaron mayores tiempos de sacarificación y de filtración de mosto (Fig. 5.4).

En base a los resultados obtenidos, **no se rechazó** la hipótesis 4 planteada: "la clasificación de granos según su relación N:S permite distinguir situaciones contrastantes de calidad maltera debido a su asociación con los distintos tipos de hordeínas y, por tanto, con la relación de hordeínas B:C". Por un lado, se estableció una relación relativamente fuerte entre la relación de hordeínas B:C y la relación N:S en grano. Por otro lado, se corroboró el mismo comportamiento tanto para el extracto como la friabilidad de malta, frente a relaciones N:S en grano elevadas o relaciones de hordeínas bajas. Por lo tanto, es factible concluir que la relación N:S en grano es un indicador de la composición proteica de granos en el cultivo de cebada.

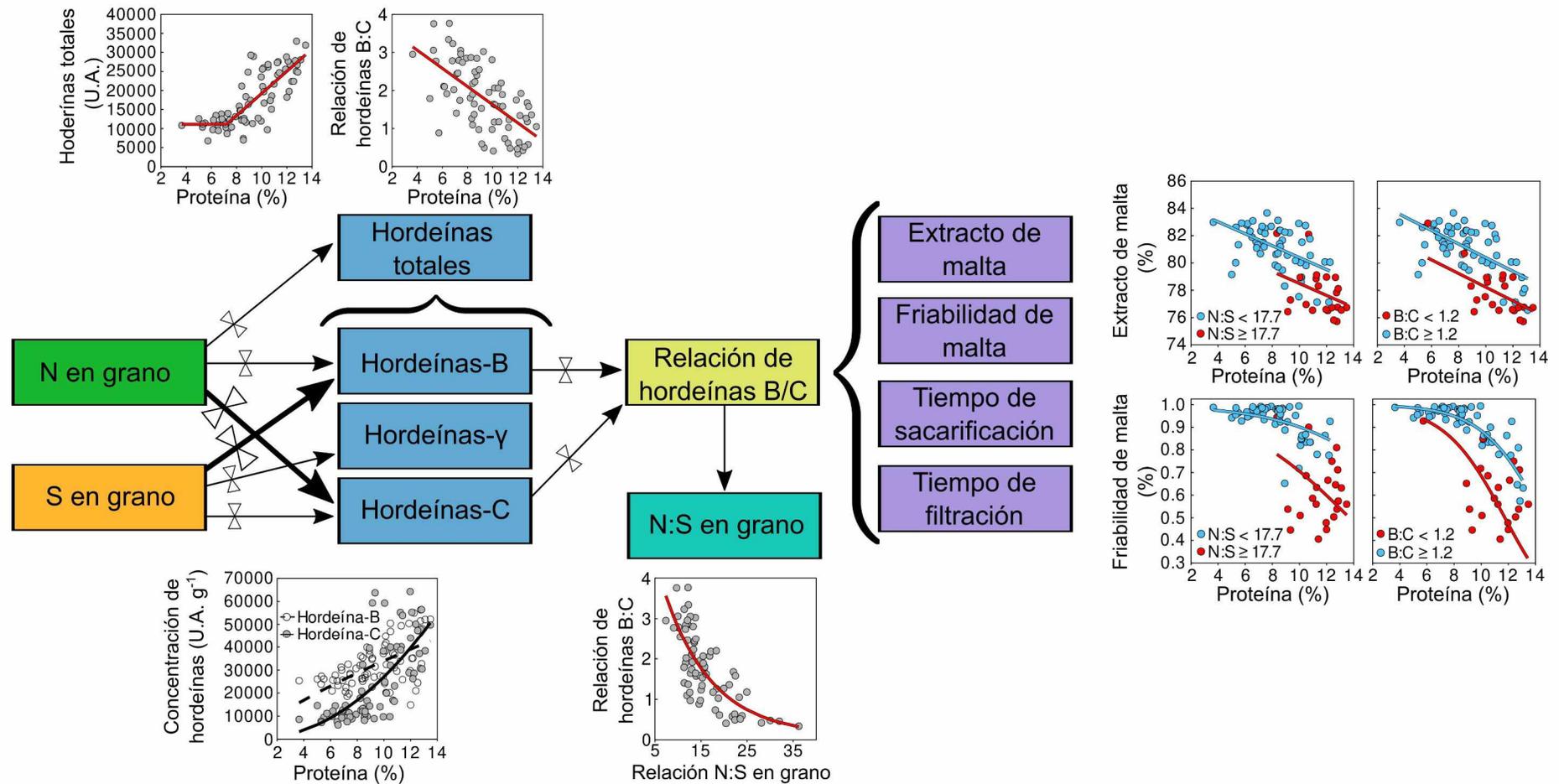


Figura 5.4. Esquema de relaciones evaluadas en el capítulo 4. El tamaño de la flecha indica el nivel o grado que influencia de una variable sobre otra. En las relaciones evaluadas de mayor relevancia se adicionó la representación gráfica de los resultados.

5.3. Aplicaciones prácticas derivadas a partir de la tesis

Los ensayos experimentales que nutren esta tesis se desarrollaron en lotes de producción y tomando como base las prácticas de manejo difundidas en el sistema de producción de cebada cervecera en región pampeana. Ello le otorga fortaleza a las aplicaciones prácticas a derivar de los resultados obtenidos aunque valga aclarar que, por otro lado, el diseño experimental no permite derivar conclusiones basadas en el agregado de un nutriente únicamente sobre el nivel basal de la oferta del suelo, debido a que los tratamientos aplicados se realizaron sobre la base de la fertilización de productor (i.e. no hubo un testigo absoluto). El conjunto de datos utilizado para el análisis desarrollado en esta sección corresponde a los que previamente se utilizaron en el capítulo 3 (50 experimentos).

En términos medios, el rendimiento máximo (i.e. 7.6 Mg ha^{-1} , parámetro b de la ecuación 3 del capítulo 3) se alcanzó cuando el cultivo absorbió $145.5 \text{ kg N ha}^{-1}$ (Fig 5.5.a). El rendimiento alcanzable ($\sim 80\%$ de Y_w , el cual queda limitado a través de la viabilidad económica de distintas prácticas de manejo, Cassman et al., 2003) fue $\sim 6.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ y, para lograrlo, el cultivo requirió absorber 88 kg N ha^{-1} . A su vez, la concentración proteica esperada en términos medios, para esa cantidad de N absorbido por el cultivo fue $\sim 8.6\%$ (Fig 5.5.b). Por lo tanto, el requerimiento necesario de N para alcanzar el límite inferior de concentración proteica requerida por la industria (i.e. 9.5%) fue mayor que el requerido para maximizar el rendimiento. A su vez, para que el cultivo absorba 88 kg N ha^{-1} , requiere tener disponible al inicio de su ciclo $\sim 110 \text{ kg N ha}^{-1}$ en los primeros 60 cm de profundidad del suelo (Fig. 5.5.c). En un trabajo reciente se ha puesto en evidencia que la dosis óptima económica que tiene en cuenta el rendimiento en grano del cultivo de cebada cervecera es inferior a la dosis que considera los requerimientos proteicos de la industria (Reussi Calvo et al., 2022).

En resumen, es necesario incrementar la dosis de fertilización nitrogenada en el cultivo de cebada cervecera, con el fin de alcanzar los límites de concentración proteica demandada por la industria. En términos medios, un cultivo necesitará absorber 164 kg N ha^{-1} para alcanzar una concentración proteica de 11% y, a la vez, habrá cubierto su requerimiento de N para maximizar el rendimiento. Sin embargo, para que el cultivo absorbiera 164 kg N ha^{-1} requirió tener disponible en el suelo (en el estrato 0-60 cm) más de 300 kg N ha^{-1} , el cual es un valor por encima del cual se alcanza un plateau para la absorción de N (i.e. $> 264 \text{ kg N ha}^{-1}$, Fig. 5.5.c). Esto pone de manifiesto la necesidad de utilizar herramientas como el fraccionamiento de la dosis de N durante el ciclo del cultivo y/o la realización de aplicación foliar de N en forma complementaria (i.e. destinadas a suplir la concentración proteica de los granos). Una manera de combinar la concentración proteica y el rendimiento en grano puede ser a través de la relación entre el requerimiento de N del cultivo (i.e. N absorbido por tonelada de rendimiento en grano) y la concentración de proteína de los granos (Fig. 5.5.d). A medida que la concentración proteica se incrementa, el requerimiento del cultivo también lo hace pero de manera más que proporcional (Fig. 5.5.d). Si el valor objetivo de proteína en grano a obtener en un cultivo es del 10% , su requerimiento nitrogenado será de $17.8 \text{ kg N Mg grano}^{-1}$ (Fig. 5.5.d). Si el rendimiento en grano esperado del cultivo es de 5 Mg ha^{-1} , el cultivo requerirá absorber $89.4 \text{ kg N ha}^{-1}$, para lo cual deberá tener disponible al inicio de su ciclo $113.6 \text{ kg N ha}^{-1}$ en los primeros 60 cm de profundidad (Fig. 5.5.c). Si tenemos en cuenta cada variable individualmente (i.e. concentración proteica y rendimiento en grano), un cultivo que absorba $89.4 \text{ kg N ha}^{-1}$ sería esperable que rinda 6.9 Mg ha^{-1} (Fig.5.5.a) y que la concentración proteica fuera de 8.6% (Fig. 5.5.b).

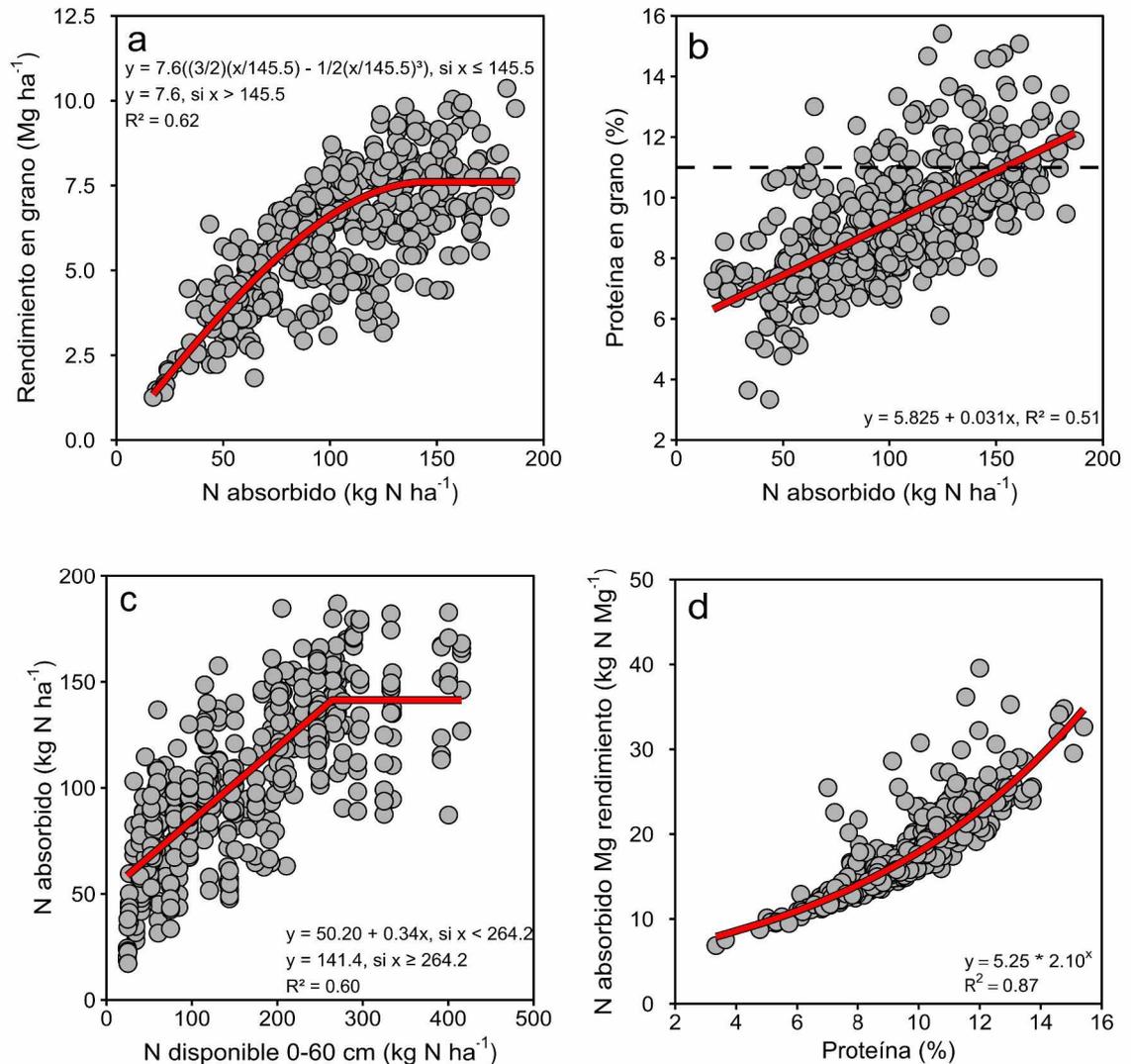


Figura 5.5. a) Relación entre el rendimiento en grano y la cantidad de N absorbido a madurez por el cultivo. b) Relación entre la concentración proteica de los granos y la cantidad de N absorbido a madurez por el cultivo. La línea discontinua corresponde al requerimiento medio de concentración proteica de la industria maltera. c) Relación entre la cantidad de N absorbido por el cultivo a madurez y la cantidad de N disponible (i.e. N suelo + N fertilizante) en los primeros 60 cm de profundidad del suelo. d) Relación entre la cantidad de nutriente absorbido por tonelada de grano y la concentración proteica en grano. Los datos utilizados para ajustar estas funciones son los correspondientes a los utilizados en el capítulo 3 e incluye más cultivares que los ensayos utilizados en el capítulo 2, en el que los experimentos utilizados fueron aquellos en los que el cultivar utilizado fue Andrea.

La relación N:S en grano se modificó principalmente debido a la disponibilidad de N para los granos, mientras que la variabilidad de la relación N:S en grano atribuible a la disponibilidad de S para los granos fue casi nula. Esto puede atribuirse al hecho de la rápida saturación de la concentración de S en grano (i.e. alcanza el plateau con un menor incremento en la disponibilidad de S y la partición hacia grano cae más abruptamente, respecto a lo observado en N). Sin embargo, la relación N:S en grano presentó elevados valores en situaciones donde se dieron conjuntamente elevada

disponibilidad de N (i.e. tratamiento '+N') y baja disponibilidad de S para los granos (Fig. 3.5.b, en el capítulo 3).

A partir de estos resultados, surgió la siguiente inquietud: "¿es posible modificar la relación N:S en granos a través del agregado de S al cultivo de cebada?". En la mayoría de las situaciones, el agregado de S (tratamiento S vs. Productor y NS vs. N) disminuyó la relación N:S en grano (Fig. 5.6.a). Sin embargo, hay casos en los que no. La mayoría de las observaciones correspondientes al tratamiento '+N' que se hallaban por encima del límite de 17.7 (capítulo 4), correspondieron a experimentos en los cuales se encontró respuesta al agregado de S. La respuesta observada en la figura 5.6a es concordante con el hecho de que la relación estequiométrica en grano que se diferenciaba del resto (cerca de la relación isométrica, i.e. pendiente de ~ 1.1) fue para el grupo de observaciones que poseía una elevada disponibilidad de N y baja de S para los granos (Fig. 3.6.a, en el capítulo 3). Incluso, el agregado de S en estos casos implicó "pasar" de una situación de elevada disponibilidad de N y baja de S a una de elevada disponibilidad de ambos nutrientes y, por tanto, el retorno desde la relación alométrica ($N_{\text{alto}}-S_{\text{bajo}}$) a una cercana a la relación isométrica ($N_{\text{alto}}-S_{\text{alto}}$) (Fig. 3.6.a, en el capítulo 3). La magnitud de la modificación de la relación N:S en grano dependió del valor de la relación N:S de cual se partía. Las relaciones N:S en grano iniciales más altas presentaron las mayores variaciones en la relación N:S en grano frente al agregado de S (Fig. 5.6.b).

En resumen, en la mayoría de las situaciones, fertilizar con S disminuyó la relación N:S en grano, lo cual permitiría realizar "correcciones" en cuanto a la calidad maltera de los granos.

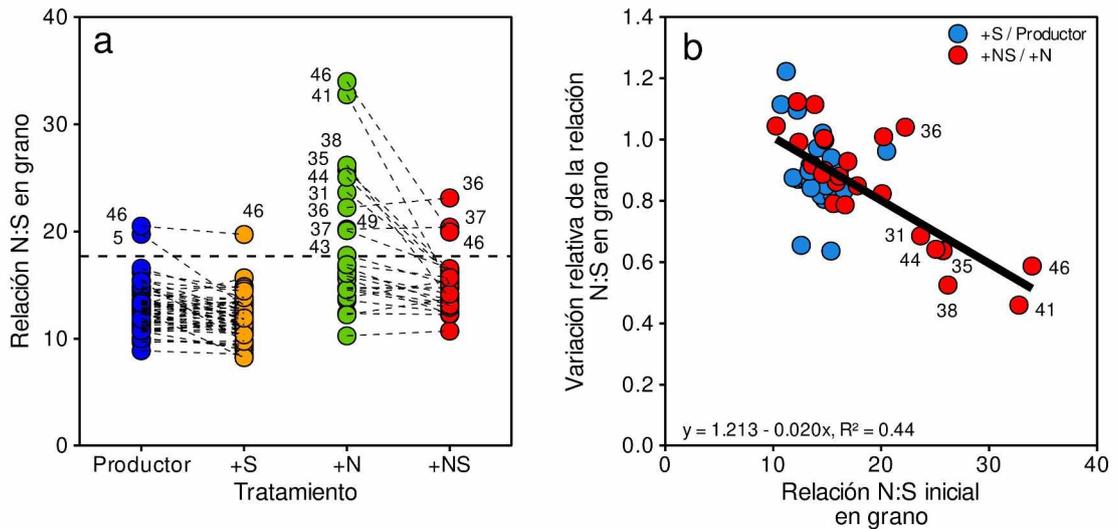


Figura 5.6. a) Relación N:S en grano según los tratamientos utilizados en la experimentación. La línea horizontal discontinua corresponde a la relación N:S en grano de 17.7. Cada símbolo corresponde al valor medio del tratamiento en un experimento. El color de los símbolos corresponde a cada tratamiento. b) Relación entre la variación relativa de la relación N:S en grano y la relación N:S en grano inicial. La variación relativa se calculó como el cociente del tratamiento fertilizado con S respecto al par no fertilizado con S (i.e. tratamiento '+S' / tratamiento 'Productor', tratamiento '+NS' / tratamiento '+N'). La relación N:S en grano inicial corresponde al tratamiento ubicado en el divisor del cociente (i.e. tratamiento 'Productor' y '+N', para los cocientes +S/Productor y +NS/+N, respectivamente). Cada símbolo corresponde al cociente entre pares de tratamientos azufrados y no azufrados, en cada experimento. Los símbolos azules corresponden a tratamientos sin agregado adicional de N (i.e. 'Productor' y '+S'), mientras que los símbolos rojos corresponden a tratamientos nitrogenados ('+N', '+NS'). Los números ubicados en la proximidad de los símbolos indican la codificación de los experimentos utilizados en el capítulo 3.

En referencia a la calidad de los granos, cabe destacar que en la presente tesis se hizo hincapié principalmente sobre dos aspectos de ella: la concentración proteica (en el capítulo 2, en el cual se caracterizó las brechas) y la composición proteica (en el capítulo 4, asociado a calidad maltera). Si bien se mencionó al calibre en el capítulo 4, en el cual se aborda a la calidad maltera de los granos, no se analizó en profundidad dicha variable. Esto se debió a que es una variable que ha sido mucho más estudiada que la concentración de S o la relación N:S como indicador de calidad o de la composición proteica de los granos, lo cual fue el objetivo del capítulo 4. Entre los antecedentes referidos al efecto del calibre sobre distintas variables de calidad maltera se puede destacar a Bishop (1930), Morgan y Riggs (1981), Hoyle et al. (2020), Otero et al. (2021), y Prystupa et al. (2021). Por otro lado, el efecto de la fertilización con N sobre el calibre de los granos ha sido ampliamente estudiado por de Ruiter et al. (1999), McKenzie et al. (2005), O'Donovan et al. (2011), y Prystupa et al. (2018).

En general, se ha observado una relación positiva entre el extracto de malta y el peso de los granos (Bishop, 1930; Otero et al., 2021; Prystupa et al., 2021). Los valores bajos de calibre se asocian a granos pequeños, los cuales poseen normalmente una elevada concentración de N y un bajo contenido de almidón, lo que conlleva a un menor potencial de generar extracto respecto a los granos más grandes y de mayor tamaño (Fox et al., 2003). A su vez, existe evidencia de que la fertilización nitrogenada en el cultivo de cebada produce un incremento del rendimiento en grano a través de un

incremento en el número de granos por unidad de superficie, debido al aumento en el número de macollos por planta (O'Donovan et al., 2011). A su vez, suelen establecerse granos en la parte distal de las espigas, los cuales poseen menor tamaño (Ellis y Marshall, 1998) y menor calibre (O'Donovan et al., 2011). Si bien el efecto de la fertilización azufrada ha sido menos estudiado en cuanto a su repercusión sobre los componentes del rendimiento en grano, se ha observado que esta práctica también genera un mayor número de granos por unidad de superficie (Prystupa y Gutiérrez Boem, 2022).

En términos generales se podría esperar que toda práctica de fertilización que tienda a incrementar el número de granos provenientes de estructuras vegetativas del cultivo (i.e. un aumento del número de macollos), y que afecte al calibre de los granos (o su peso) de manera significativa, podría afectar en última instancia la calidad maltera de los granos. Por ejemplo, Edney et al. (2012) observaron modificaciones en distintos parámetros asociados a la calidad de malta debido a modificaciones en la densidad de siembra. Esto podría atribuirse a que es una práctica que modifica el número de macollos que genera un cultivo (i.e. la mayor densidad de siembra se asocia a un menor número de macollos) (O'Donovan et al., 2011). Sin embargo, hay que tener en cuenta que ante deficiencias severas de un nutriente y la posterior fertilización del mismo o ante situaciones de estrés no nutricional (e.g. hídrico o térmico), se pueden generar situaciones en donde se modifica tanto el peso de los granos (y por tanto su calibre) como la concentración proteica de los mismos (Wei et al., 2009). En estas situaciones, no hay una única variable que determine la calidad maltera, sino que ellas mismas están interrelacionadas.

En lo que respecta al diagnóstico de la deficiencia azufrada en el cultivo de cebada, no se observó ninguna asociación o patrón entre variables que conforman el rendimiento en grano (rendimiento en grano, rendimiento relativo, respuesta del rendimiento en grano al agregado del nutriente en cuestión) y variables que conforman la oferta de S por parte del suelo (concentración de S-sulfato 0-20 cm, masa de S-sulfato 0-20 cm, masa de S-sulfato 0-60 cm, S agregado como fertilizante, masa de S-sulfato medido en suelo 0-60 cm + S agregado como fertilizante). A partir del diagnóstico de deficiencia basado en tejido vegetal se diferenciaron situaciones deficientes de S, utilizando la relación N:S en grano como predictor o variable explicativa. El rendimiento en grano de los cultivos no fertilizados con S disminuyó en promedio 22.4 % en aquellos casos en los que la relación N:S en grano fue superior a 21.3 (Fig. 5.7).

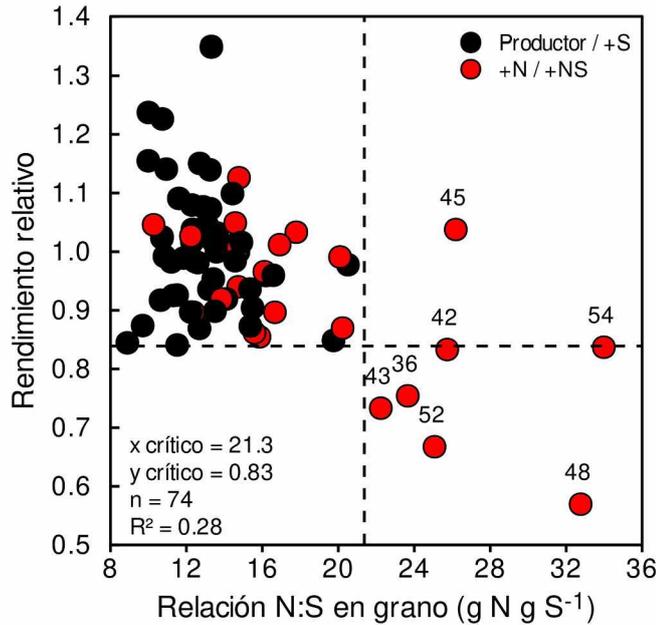


Figura 5.7. Relación entre el rendimiento en grano relativo y la relación N:S en grano. La separación de grupos se realizó en base a Cate y Nelson (1971). Las líneas discontinuas corresponden a los umbrales críticos que separan los grupos. Cada símbolo representa el valor medio del cociente entre el rendimiento en grano del tratamiento sin agregado de S y el par con agregado de S (RR = rendimiento en grano '+S'/rendimiento en grano 'Productor'; RR = rendimiento en grano '+NS'/rendimiento en grano '+N'). Los símbolos negros corresponden a tratamientos sin agregado adicional de N

('Productor' y '+S'), mientras que los símbolos rojos corresponden a tratamientos nitrogenados ('+N', '+NS').

5.4. Interrogantes surgidos y futuras líneas de investigación

A partir de los resultados obtenidos surgieron varias inquietudes y/o interrogantes, los cuales se describen a continuación.

En lo referente a las brechas de rendimiento en grano, un aspecto a abordar a futuro es el agregado o agrupamiento de información con el fin de realizar simulaciones y estimar Yg en escalas geográficas de mayor jerarquía (i.e. regionalizar la estimación a través de zonas climática, <https://www.yieldgap.org/>). A su vez, sería de importancia incorporar en las simulaciones la rutina SWIM3 en el módulo de suelos, con el fin de tener en cuenta la dinámica de la napa freática, la cual es relevante en varias regiones (incluso la estudiada en esta tesis). En referencia a la brecha de proteína, no se abordó la calibración y simulación de la concentración proteica de los granos dado que para la evaluación de la brecha de proteína se tomó como referencia al valor demandado por la industria. Por último, un aspecto relevante a abordar es el análisis de la variabilidad temporal tanto de Yp como Yw mediante el uso de modelos de simulación. Esto permitiría caracterizar climática y ambientalmente la zona (i.e. utilizando distintos niveles de disponibilidad hídrica inicial en distintos tipos o series de suelo) para un gradiente de fechas de siembra en dicha zona. Esto se puede realizar utilizando datos meteorológicos provenientes de estaciones meteorológicas que engloben o sean representativas de la región de estudio.

Respecto a la partición diferencial de N y S hacia los granos, los resultados obtenidos indicarían que la concentración de N en grano está más fuertemente limitada por fuente que el S, o que el S posee una colimitación (posee una limitación por fuente como por destino, según el nivel de disponibilidad en la que se encuentre). El S presentó una fase en la cual el cambio en la disponibilidad de este nutriente conllevó a un incremento en la concentración de S en grano y posteriormente una fase de limitación por destino, donde incrementó la partición hacia el rastrojo. Incluso, el incremento de la partición de

S hacia el rastrojo frente a incrementos en su disponibilidad fue mayor, en términos relativos, a la observada en N. Si el S estuviera limitado por destinos, implicaría que los cambios en la relación N:S en grano podrían estar influenciados por el mejoramiento genético, debido a que este último en la mayoría de los casos conllevó a un incremento en el número de destinos. Si bien el mejoramiento genético incrementó el ICN en cebada cervecera (Abeledo et al., 2008), se desconoce la influencia que puede haber tenido sobre el ICS. Si debido al mejoramiento genético el ICS se modificó (a través de la modificación del número de destinos) en una proporción distinta a la sufrida en el ICN (i.e. $ICN/ICS \neq 1$), podría haberse modificado la relación N:S en grano y por tanto, la composición proteica y la calidad industrial de los granos. Passarella et al. (2003) observó cambios en la composición proteica de los granos debido al mejoramiento genético (incrementó la proporción de hordeínas-B y disminuyó la de hordeínas-C). Sin embargo, estos autores no evaluaron si los cambios en la composición proteica se asociaba a modificaciones en la economía interna de N y S de los distintos cultivares (i.e. ICN/ICS). En la misma línea de mejoramiento genético, podría evaluarse la variabilidad presente en atributos de calidad maltera (principalmente extracto y friabilidad de malta), en la composición de hordeínas y en la relación N:S en grano. Además, comprobar la relación entre estas variables.

Respecto a los resultados observados en la calidad industrial, interesaría considerar la evaluación de los modelos ajustados de extracto y friabilidad de malta vs. proteína según la relación N:S en grano, con el fin de conocer el error predictivo de ambos (utilizando un set de datos independiente). En el caso de que el error se encuentre dentro de un margen que la industria considere tolerable, podría implementarse su utilización mediante la incorporación de la determinación de la concentración de S en grano a los análisis de rutina. A partir de los valores de concentración de N y S en grano, utilizando la información resultante de estos ajustes, se podría predecir la cantidad de extracto y la friabilidad de malta de esos granos. Si el error en la predicción resulta mayor al tolerable, habría que buscar otro rasgo del grano que, mediante una determinación relativamente sencilla, permita predecir variables de calidad como extracto de malta.

Por otro lado, la caracterización de la calidad industrial de granos de cebada cervecera en función de su relación N:S podría reproducirse en granos de trigo y asociarse a la relación N:S en grano a la calidad panadera de los mismos. De manera análoga a lo que ocurre en cebada, las proteínas de reserva de trigo (gliadinas y gluteninas, en conjunto denominadas gluten) se diferencian en cuanto a su composición de acuerdo a su contenido de S: las gliadinas- ω poseen un bajo contenido de S, mientras que las gliadinas- α y las gliadinas- γ poseen un elevado contenido de S. La revisión realizada por Tatham y Shewry (2012) sobre la composición de proteínas de reserva en cereales describe que ha sido reportado en varios trabajos previos la asociación entre la cantidad de gliadinas y composición de gliadinas frente a modificaciones en la disponibilidad de N y S para el cultivo de trigo. En general, se asocia negativamente la calidad panadera y el contenido de gliadinas. Existen trabajos en los que se reporta un incremento en la cantidad de gliadinas y en la extensibilidad de la masa frente al agregado de N. En otros trabajos observaron un incremento en gliadinas- ω debido a deficiencia S, lo cual se asociaba a una menor fuerza y una mayor extensibilidad de la masa (Tatham y Shewry, 2012). Por lo tanto, podría esperar lograr una clasificación de calidad panadera en granos de trigo (propiedades reológicas) a partir de la composición proteica de los granos y, por tanto, de su relación N:S.

BIBLIOGRAFÍA

- Abeledo, L.G., Calderini, D.F., Slafer, G.A. 2003. Genetic improvement of barley yield potential and its physiological determinants in Argentina (1944-1998). *Euphytica*, 130: 325-334. <https://doi.org/10.1023/A:1023089421426>.
- Abeledo, L.G., Calderini, D.F., Slafer, G.A. 2008. Nitrogen economy in old and modern malting barleys. *Field Crops Research*, 106: 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.11.006>.
- Agus, F., Andrade, J.F., Rattalino Edreira, J.I., Deng, N., Purwantomo, D.K.G., Agustiani, N., Aristya, V.E., Batubara, S.F., Herniwati, Hosang, E.Y., Krisnadi, L.Y., Makka, A., Samijan, Cenacchi, N., Wiebe, K., Grassini, P. 2019. Yield gaps in intensive rice-maize cropping sequences in the humid tropics of Indonesia. *Field Crops Research*, 237: 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.006>.
- Albrizio, R., Todorovic, M., Matic, T., Stellacci, A.M. 2010. Comparing the interactive effects of water and nitrogen on durum wheat and barley grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 115: 179-190. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.11.003>.
- Alvarez, R.; Steinbach, H.S.; Bono, A. 2011. An artificial neural network approach for predicting soil carbon budget in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 75: 965-975. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0427>.
- Álvarez, R. 2015. Carbono orgánico. En: Álvarez, R. (Ed.), *Fertilidad de suelos y fertilización en la región pampeana*. Editorial Facultad de Agronomía. Buenos Aires, pp. 47-91.
- Anderson, J.W. y Fitzgerald, M.A. 2003. Sulphur distribution and redistribution in vegetative and generative plants. En: Abrol, Y.P y Ahmad, A. (Eds.), *Sulphur in plants*. Springer Netherlands, pp. 113-134.
- Andrade F.H. y Sadras V.O. 2000. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. INTA Buenos Aires.
- Andrade, J., Poggio, S., Ermácora, M., Satorre, E. 2015. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European Journal of Agronomy*, 67: 37-51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.03.001>.
- Angus, J.F. 2001. Nitrogen supply and demand in Australian agriculture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41: 277-288. <https://doi.org/10.1071/EA00141>.
- Arata, A.F., Lerner, S.E., Tranquilli, G.E., Arrigoni, A.C., Rondanini, D.P. 2017. Nitrogen × sulfur interaction on fertiliser-use efficiency in bread wheat genotypes from the Argentine Pampas. *Crop and Pasture Science*, 68: 202-212. <https://doi.org/10.1071/cp16330>.
- Baethgen W.E., Alley M.M., 1989. A manual colorimetric procedure for measuring ammonium nitrogen in soil and plant Kjeldahl digest. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 20: 961-969. <https://doi.org/10.1080/00103628909368129>.
- Balboa, G.R., Archontoulis, S.V., Salvagiotti, F., Garcia, F.O., Stewart, W.M., Francisco, E., Prasad, P.V.V., Ciampitti, I.A. 2019. A systems-level yield gap assessment of maize-soybean rotation under high- and low-management inputs in the Western US Corn Belt using APSIM. *Agricultural Systems*, 174: 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.04.008>.
- Bannayan, M. y Crout, N. 1999. A stochastic modelling approach for real-time forecasting of winter wheat yield. *Field Crops Research*, 62: 85-95. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00008-8).

- Barracough, P.B., Lopez-Bellido, R., Hawkesford, M.J., 2014. Genotypic variation in the uptake, partitioning and remobilisation of nitrogen during grain-filling in wheat. *Field Crops Research*, 156: 242-248. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.10.004>.
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S. 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67: 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>.
- Bédek, G., Kádár, I. 1988. Influence of soil nutrient levels on harvest yield and malting quality of brewing barley. *Journal of the Institute of Brewing*, 94: 375-378. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.1988.tb04597.x>.
- Beza, E., Silva, J.V., Kooistra, L., Reidsma, P. 2017. Review of yield gap explaining factors and opportunities for alternative data collection approaches. *European Journal of Agronomy*, 82: 206-222. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.016>.
- Bishop, L.R. 1930. Statistical studies of the analytical data accumulated in the course of the barley investigations. I.- The prediction of extract. *Journal of the Institute of Brewing*, 36: 421-434. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.1930.tb05275.x>.
- Briggs, D.E. 1998. *Malts and Malting*. Blackie Academic & Professional, London.
- Briggs, D.E., Boulton, C.A., Brookes, P.A., Stevens, R. 2004. *Brewing. Science and practice*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England & CRC Press. Boca Raton. U.S.A.
- Brihet, J.M. 2015. Relevamiento de Tecnología Agrícola Aplicada. Campaña 2012/13. *Bolsa de Cereales*, Buenos Aires, 206 pp.
- Brown, H.E., Huth, N.I., Holzworth, D.P., Teixeira, E.I., Zyskowski, R.F., Hargreaves, J.N.G., Moot, D.J. 2014. Plant Modelling Framework: Software for building and running crop models on the APSIM platform. *Environmental Modelling & Software*, 62: 385-398. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.005>.
- Bulman, P., Mather, D., Smith, D. 1993. Genetic improvement of spring barley cultivars grown in eastern Canada from 1910 to 1988. *Euphytica*, 71: 35-48. <https://doi.org/10.1007/BF00023465>.
- Bulman, P. y Smith, D.L. 1993. Grain protein response of spring barley to high rates and post-anthesis application of fertilizer nitrogen. *Agronomy Journal*, 85: 1109-1113. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500060003x>.
- Burnham, K.P. y Anderson, D.R. 2002. *Model Selection and Inference: a Practical Information-theoretic Approach*, 2nd edition. Springer-Verlag, New York.
- Cade, B.S. y Noon, B.R. 2003. A gentle introduction to quantile regression for ecologists. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1: 412-420. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2003\)001\[0412:AGITQR\]2.0.CO.2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2003)001[0412:AGITQR]2.0.CO.2).
- Calderini, D.F., Torres-León, S., Slafer, G.A. 1995. Consequences of wheat breeding on nitrogen and phosphorus yield, grain nitrogen and phosphorus concentration and associated traits. *Annals of Botany*, 76: 315-322. <https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1101>.
- Calviño, P.A., Sadras, V.O., Andrade, F.H. 2003. Quantification of environmental and management effects on the yield of late-sown soybean. *Field Crops Research*, 83: 67-77. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00062-5).
- Carciochi, W.D., Wyngaard, N., Divito, G.A., Reussi Calvo, N.I., Cabrera, M.L., Echeverría, H.E. 2016. Diagnosis of sulfur availability for corn based on soil analysis. *Biology and Fertility of Soils*, 52: 917-926. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1130-8>.
- Carciochi, W.D., Reussi Calvo, N.I., Wyngaard, N., Divito, G.A., Eyherabide, M., Echeverría, H.E. 2019. Prognosis and diagnosis of sulfur status in maize by plant analysis. *European Journal of Agronomy*, 108: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.04.008>.

- Carciochi, W.D., Salvagiotti, F., Pagani, A., Reussi Calvo, N.I., Eyherabide, M., Sainz Rozas, H.R., Ciampitti, I.A. 2020a. Nitrogen and sulfur interaction on nutrient use efficiencies and diagnostic tools in maize. *European Journal of Agronomy*, 116: 126045. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126045>.
- Carciochi, W.D., Sadras, V.O., Pagani, A., Ciampitti, I.A. 2020b. Co-limitation and stoichiometry capture the interacting effects of nitrogen and sulfur on maize yield and nutrient use efficiency. *European Journal of Agronomy*, 113: 125973. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125973>.
- Caviglia, O.P.; Sadras, V.O.; Andrade, F.H.; 2013. Modelling long-term effects of cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the South-eastern Pampas. *Field Crops Research*, 149: 300-311. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.05.003>.
- Caviglia, O.P.; Rizzalli, R.H.; Monzon, J.P.; García, F.O.; Melchiori, R.J.M.; Martinez, J.J.; Cerrudo, A.; Irigoyen, A.; Barbieri, P.A.; Opstal, N.V.V.; Andrade, F.H. 2019. Improving resource productivity at a crop sequence level. *Field Crops Research*, 235: 129-141. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.011>.
- Cassman, K.G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96: 5952-5959. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.5952>.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., Yang, H. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*, 28: 315-358. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.040202.122858>.
- Cate, R.B., Nelson, L.A. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Science Society of America Journal*, 35: 658-660. <https://doi.org/10.2136/sssaj1971.03615995003500040048x>.
- Cattaneo, M. 2021. Cebada: Distribución varietal estimada en Argentina (2021). Disponible en: <https://cebadacervecera.com.ar/comportamiento-sanitario-en-cultivo-de-variedades-de-cebada/>.
- Celus, I., Brijs, K., Delcour, J.A. 2006. The effects of malting and mashing on barley protein extractability. *Journal of Cereal Science*, 44: 203-211. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.003>.
- Chenu, K., Porter, J.R., Martre, P., Basso, B., Chapman, S.C., Ewert, F., Bindi, M., Asseng, S. 2017. Contribution of crop models to adaptation in wheat. *Trends in Plant Science*, 22: 472-490. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.02.003>.
- Ciampitti, I.A. y Vyn, T.J. 2012. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: a review. *Field Crops Research*, 133: 48-67. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.008>.
- Ciampitti, I.A. y Vyn, T.J. 2013. Grain nitrogen source changes over time in maize: a Review. *Crop Science*, 53: 366-377. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.07.0439>.
- Ciampitti, I.A., Camberato, J.J., Murrell, S.T., Vyn, T.J. 2013. Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: I. Macronutrients. *Agronomy Journal*, 105: 783-795. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0467>.
- Correndo, A.A., Rubio, G., García, F.O., Ciampitti, I.A. 2021. Subsoil-potassium depletion accounts for the nutrient budget in high-potassium agricultural soils. *Scientific Reports*, 11:11597. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90297-1>.
- Cossani, C.M., Slafer, G.A., Savin, R. 2009. Yield and biomass in wheat and barley under a range of conditions in a Mediterranean site. *Field Crops Research*, 112: 205-213. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.003>.

- Cribari-Neto, F. y Zeileis, A. 2010. Beta Regression in R. *Journal of Statistical Software*, 34: 1-24. <https://doi.org/10.18637/jss.v034.i02>.
- Dalglish, N., Hochman, Z., Huth, N., Holzworth, D. 2015. A protocol for the development of soil parameter values for use in APSIM. Ver1.20 (190815). Disponible en: <https://www.apsim.info/documentation/model-documentation/soil-modules-documentation/>.
- de Felipe, M., Gerde, J.A., Rotundo, J.L. 2016. Soybean Genetic Gain in Maturity Groups III to V in Argentina from 1980 to 2015. *Crop Science*, 56: 1-12. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.04.0214>.
- de Oliveira Silva, A., Ciampitti, I.A., Slafer, G.A., Lollato, R.P. 2020. Nitrogen utilization efficiency in wheat: a global perspective. *European Journal of Agronomy*, 114: 126008 <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126008>.
- De Ruiter, J. y Brooking, I. 1996. Effect of sowing date and nitrogen on dry matter and nitrogen partitioning in malting barley. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 24: 65-76. <https://doi.org/10.1080/01140671.1996.9513936>.
- De Vita, P., Nicosia, O.L.D., Nigro, F., Platani, C., Riefolo, C., Di Fonzo, N., Cattivelli, L. 2007. Breeding progress in morpho-physiological, agronomical and qualitative traits of durum wheat cultivars released in Italy during the 20th century. *European Journal of Agronomy*, 26: 39-53. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.08.009>.
- de Wit, C. 1992. Systems approaches for agricultural Resource use efficiency in agriculture. *Agricultural Systems*, 40: 125-151. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(92\)90018-J](https://doi.org/10.1016/0308-521X(92)90018-J).
- DeBruin, J.L., Schussler, J.R., Mo, H., Cooper, M. 2017. Grain Yield and Nitrogen Accumulation in Maize Hybrids Released during 1934 to 2013 in the US Midwest. *Crop Science*, 57: 1431-1446. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.08.0704>.
- Delogu, G., Cattivelli, L., Pecchioni, N., De Falcis, D., Maggiore, T., Stanca, A.M. 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 9: 11-20. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00019-7).
- Divito, G.A., Echeverría, H.E., Andrade, F.H., Sadras, V.O. 2015. Diagnosis of S deficiency in soybean crops: Performance of S and N:S determinations in leaf, shoot and seed. *Field Crops Research*, 180: 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.06.006>.
- Dobermann, A., Cassman, K.G. 2002. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant and Soil*, 247: 153-175. <https://doi.org/10.1023/A:1021197525875>.
- Dobermann, A. 2007. Nutrient use efficiency-measurement and management. *In Proc. of IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practice*, 7-9 March 2007, Brussels, Belgium. Int. Fertilizer Industry, Paris., pp. 1-28.
- Dordas, C. 2012. Variation in dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in barley as affected by fertilization, cultivar, and source-sink relations. *European Journal of Agronomy*, 37: 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.10.002>.
- Duru, M., Lemaire, G., Cruz, P. 1997. Grasslands. En: Lemaire, Gilles (Ed.), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Springer-Verlag. pp. 59-71.
- Duvick, D.N., Cassman, K.G. 1999. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Science*, 39: 1622-1630. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961622x>.
- Eagles, H., Bedgood, A., Panozzo, J., Martin, P. 1995. Cultivar and environmental effects on malting quality in barley. *Australian Journal of Agricultural Research*, 46: 831-844. <https://doi.org/10.1071/ar9950831>.

- Edney, M.J., O'Donovan, J.T., Turkington, T.K., Clayton, G.W., McKenzie, R., Juskiw, P., Lafond, G.P., Brandt, S., Grant, C.A., Harker, K.N., Johnson, E., May, W. 2012. Effects of seeding rate, nitrogen rate and cultivar on barley malt quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92: 2672-2678. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5687>.
- Elser, J.J., Fagan, W.F., Denno, R.F., Dobberfuhl, D.R., Folarin, A., Huberty, A., Interlandi, S., Kilham, S.S., McCauley, E., Schulz, K.L., Siemann, E.H., Sterner, R.W. 2000a. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 408: 578-580. <https://doi.org/10.1038/35046058>.
- Elser, J.J., Sterner, R.W., Gorokhova, E., Fagan, W.F., Markow, T.A., Cotner, J.B., Harrison, J.F., Hobbie, S.E., Odell, G.M. y Weider, L.J. 2000b. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 3: 540-550. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2000.00185.x>.
- Ercoli, L., Lulli, L., Arduini, I., Mariotti, M., Masoni, A. 2011. Durum wheat grain yield and quality as affected by S rate under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 35: 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.03.007>.
- Eriksen, J., Nielsen, M., Mortensen, J.V., Schjørring, J.K. 2001. Redistribution of sulphur during generative growth of barley plants with different sulphur and nitrogen status. *Plant and Soil*, 230: 239-246. <https://doi.org/10.1023/A:1010328115203>.
- European Brewery Convention. 1998. *Analytica-EBC*, fifth ed. Verlag Hans Carl Getranke-Fachverlag, Nürnberg.
- Fensterseifer, C.A., Streck, N.A., Baigorria, G.A., Timilsina, A.P., Zanon, A.J., Cera, J.C. y Rocha, T.S. 2017. On the number of experiments required to calibrate a cultivar in a crop model: The case of CROPGRO-soybean. *Field Crops Research*, 204: 146-152. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.007>.
- Ferrari, B., Baronchelli, M., Stanca, A.M., Gianinetti, A. 2010. Constitutive differences between steely and mealy barley samples associated with endosperm modification. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90: 2105-2113. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4058>.
- Ferrari, S. y Cribari-Neto, F. 2004. Beta Regression for Modelling Rates and Proportions, *Journal of Applied Statistics*, 31: 799-815. <https://doi.org/10.1080/0266476042000214501>.
- Fitzgerald, M.A., Ugalde, T.D., Anderson, J.W. 1999. S nutrition affects the pools of S available to developing grains of wheat. *Journal of Experimental Botany*, 50: 1587-1592. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.339.1587>.
- Flåte, N., Hollung, K., Ruud, L., Sogn, T., Færgestad, E., Skarpeid, H., Magnus, E., Uhlen, A. 2005. Combined nitrogen and sulphur fertilisation and its effect on wheat quality and protein composition measured by SE-FPLC and proteomics. *Journal of Cereal Science*, 41: 357-369. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.01.003>.
- Flodrová, D., Šalplachta, J., Benkovská, D., Bobálová, J. 2012. Application of Proteomics to Hordein Screening in the Malting Process. *European Journal of Mass Spectrometry*, 18: 323-332. <https://doi.org/10.1255/ejms.1184>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1997. *FAOSTAT statistical database*. [Rome] :FAO.
- Fox, G.P.; Panozzo, J.F.; Li, C.D.; Lance, R.C.M.; Inkerman, P.A.; Henry, R.J. 2003. Molecular basis of barley quality. *Australian Journal of Agricultural Research*, 54: 1081-1101. <https://doi.org/10.1071/AR02237>.
- Fox, J. y Weisberg, S. 2019. *An R Companion to Applied Regression*, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>.

- Franzen, D.W., Sharma, L.K., Bu, H., Denton, A. 2016. Evidence for the ability of active-optical sensors to detect sulfur deficiency in corn. *Agronomy Journal*, 108: 2158-2162. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.05.0287>.
- Galotta, M.F., Rey, M.F., Gómez, F.M., Pugliese, P., Gutiérrez-Boem, F.H., Prystupa, P., Roberts, I.N. 2019. Sulphur deficiency and its effect on barley grain germination. Trabajo finalista del Brian Chambers Award, presentado en la International Fertiliser Society (IFS) Agronomic Conference, 12-13 diciembre, Cambridge, UK (<https://fertiliser-society.org/ifs-events/2019-ifs-agronomic-conference/>).
- García, G.A., Miralles, D.J., Serrago, R.A., Alzueta, I., Huth, N., Dreccer, M.F. 2018. Warm nights in the Argentine Pampas: Modelling its impact on wheat and barley shows yield reductions. *Agricultural Systems*, 162: 259-268. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.12.009>.
- Giese, H., Andersen, B. y Doll, H. 1983. Synthesis of the major storage protein, hordein, in barley. *Planta*, 159: 60-65. <https://doi.org/10.1007/BF00998815>.
- Gómez, F.M., Prystupa, P., Boero, J.J., Gutiérrez-Boem, F.H. 2021. Sulfur partitioning and grain concentration differed from that for nitrogen in malting barley. *Field Crops Research*, 263: 108053. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108053>.
- Gutierrez Boem, F.H.; Ventimiglia, L.; Bergh, R.; Ferraris, G.; Prystupa, P.; Loewy, T.; Couretot, L. 2008. Fertilización de cebada cervecera cv. scarlett: II. efecto del azufre y su interacción con el nitrógeno inicial. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, San Luis, Mayo.
- Grant, C.A., Mahli, S.S., Karamanos, R.E. 2012. Sulfur management for rapeseed. *Field Crops Research*, 128: 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.018>.
- Grassini, P., Thorburn, J., Burr, C. y Cassman, K. 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. *Field Crops Research*, 120: 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.09.012>.
- Grassini, P., van Bussel, L.G., van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., van Ittersum, M.K. y Cassman, K.G. 2015. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. *Field Crops Research*, 177: 49-63. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004>.
- Greenwood, D.J., Gastal, F., Lemaire, G., Draycott, A., Millard, P., Neeteson, J.J. 1991. Growth Rate and % N of Field Grown Crops: Theory and Experiments. *Annals of Botany*, 67: 181-190. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a088118>.
- Greenwood, D.J., Karpinets, T.V., Zhang, K., Bosh-Serra, A., Boldrini, A. y Karawulova, L. 2008. A unifying concept for the dependence of whole-crop N:P ratio on biomass: theory and experiment. *Annals of Botany*, 102: 967-977. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn188>.
- Gregersen, P.L. 2011. Senescence and nutrient remobilization in crop plants. En: Hawkesford, M.J., Barraclough P. (Eds.), *The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops*, John Wiley and Sons, pp. 83-102.
- Griffiths, D.W. 1987. The ratio of B to C hordeins in barley as estimated by high performance liquid chromatography. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 38: 229-235. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740380306>.
- Güler, M. 2003. Barley grain β -glucan content as affected by nitrogen and irrigation. *Field Crops Research*, 84: 335-340. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(03\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(03)00100-X).
- Gupta, U.C., Macleod, J.A. 1984. Effect of various sources of sulfur on yield and sulfur concentration of cereals and forages. *Canadian Journal of Soil Science*, 64: 403-409. <https://doi.org/10.4141/cjss84-041>.

- Gutiérrez Boem, F.H., Gomez, F., Caputo, C., Prystupa, P. 2014. Fertilización de cebada: I. eficiencia de utilización y concentración de N-P-S en grano. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, mayo.
- Gutiérrez Boem, F.H., Prystupa, P. y Ferraris, G. 2007. Seed number and yield determination in sulfur deficient soybean crops. *Journal of Plant Nutrition*, 30: 93-104. <https://doi.org/10.1080/01904160601055095>.
- GYGA, 2022. The Global Yield Gap and Water Productivity Atlas (GYGA). <http://www.yieldgap.org/>. Verificado septiembre 2022.
- Habtegebrial, K., Singh, B.R. 2009. Response of wheat cultivars to nitrogen and sulfur for crop yield, nitrogen use efficiency, and protein quality in the semiarid region. *Journal of Plant Nutrition*, 32: 1768-1787. <https://doi.org/10.1080/01904160903152616>.
- Haneklaus, S., Bloem, E., Schnug, E., de Kok, L.J., Stulen, I. 2007a. Sulfur. In: Barker, A.V. y Pilbeam, D.J. (Eds.), *Handbook of plant nutrition*, pp. 183-238. Taylor & Francis. Boca Raton, Florida.
- Haneklaus, S., Bloem, E., Schnug, E. 2007b. Sulfur interactions in crop ecosystems. In: Hawkesford, M.J. y de Kok, L.J. (Eds.), *Sulfur in plants - an ecological perspective*, pp. 17-58. Springer, Dordrecht.
- Hawkesford, M.J. 2012. Sulfate uptake and assimilation—whole plant regulation. En: De Kok, L.J., Rennenberg, H. y Hawkesford, M.J. (Eds.), *Sulfur metabolism in plants*. Springer Netherlands, pp. 11-24.
- He, D., Wang, E., Wang, J. y Robertson, M.J. 2017. Data requirement for effective calibration of process-based crop models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 234–235: 136-148. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.015>.
- Hirel, B., Le Gouis, J., Ney, B. y Gallais, A. 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *Journal of Experimental Botany*, 58: 2369-2387. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm097>.
- Hitsuda, K., Sfredo, G.J. y Klepker, D. 2004. Diagnosis of sulfur deficiency in soybean using seeds. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 1445-1451. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1445>.
- Holopainen, U.R.M., Rajala, A., Jauhiainen, L., Wilhelmson, A., Home, S., Kauppila, R., Peltonen-Sainio, P. 2015. Influence of sulphur application on hordein composition and malting quality of barley (*Hordeum vulgare* L.) in northern European growing conditions. *Journal of Cereal Science*, 62: 151-158. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.02.002>.
- Hothorn, T., Bretz, F., Westfall, P. 2008. Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal*, 50: 346-363. <https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>.
- Howard, K.A., Gayler, K.R., Eagles, H.A., Halloran, G.M. 1996. The relationship between D hordein and malting quality in barley. *Journal of Cereal Science*, 24: 47-53. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1996.0036>.
- Howarth, J.R., Parmar, S., Jones, J., Shepherd, C.E., Corol, D.I., Galster, A.M., Hawkins, N.D., Miller, S.J., Baker, J.M., Verrier, P.J., Ward, J.L., Beale, M.H., Barraclough, P.B., Hawkesford, M.J. 2008. Co-ordinated expression of amino acid metabolism in response to N and S deficiency during wheat grain filling. *Journal of Experimental Botany*, 59: 3675-3689. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern218>.
- Paynter, B.H.; Young, K.J. 2004. Grain and malting quality in two-row spring barley are influenced by grain filling moisture. *Australian Journal of Agricultural Research*, 55: 539-550. <https://doi.org/10.1071/AR02093>.

- Janssen, B.H., Guiking, F.C.T., van der Eijk, D., Smaling, E.M.A., Wolf, J. y van Reuler, H. 1990. A system for quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46: 299-318. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(90\)90021-Z](https://doi.org/10.1016/0016-7061(90)90021-Z).
- Janssen, B.H. 1998. Efficient use of nutrients: an art of balancing. *Field Crops Research*, 56: 197-201. [https://doi.org/10.1016/s0378-4290\(97\)00130-5](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(97)00130-5).
- Jin, Y., Zhang, K., Du, J. 2008. Effects of Wheat Protein Content on Endosperm Composites and Malt Quality. *Journal of the Institute of Brewing*, 114: 289-293. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2008.tb00771.x>.
- Jin, Y., Du, J., Zhang, K., Xie, L., Li, P. 2012. Relationship between Kolbach index and other quality parameters of wheat malt. *Journal of the Institute of Brewing*, 118: 57-62. <https://doi.org/10.1002/jib.15>.
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.M., Machet, J.M. y Thelier-Huche, L. 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*, 74: 397-407. <https://doi.org/10.1006/anbo.1994.1133>.
- Kirkman, M.A., Shewry, P.R. y Mifflin, B.J. 1982. The effect of nitrogen nutrition on the lysine content and protein composition of barley seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 33: 115-127. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740330203>.
- Koenker, R. 2022. quantreg: Quantile Regression. R package version 5.88. <https://CRAN.R-project.org/package=quantreg>.
- Lavado, R.S. y Taboada, M.A. 2009. The Argentinean Pampas: A key region with a negative nutrient balance and soil degradation needs better nutrient management and conservation programs to sustain its future viability as a world agresource. *Journal of Soil and Water Conservation*, 64: 150A-153A. <https://doi.org/10.2489/jswc.64.5.150A>.
- Lemaire, G. y Gastal, F. 2009. Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency. En: Sadras, V.O. y Calderini, D.F. (Eds), *Crop physiology: applications for genetic improvement and agronomy*, pp. 171-211. Academic Press: San Diego, CA.
- Lenth, R.V. 2022. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.7.2. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>.
- Lerner, S., Seghezzo, M., Molfese, E., Ponzio, N., Cogliatti, M., Rogers, W. 2006. N- and S-fertiliser effects on grain composition, industrial quality and end-use in durum wheat. *Journal of Cereal Science*, 44: 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.12.006>.
- Liaw, A., Wiener, M. 2002. Classification and Regression by randomForest. *R News*, 2: 18-22.
- Lobell, D.B., Cassman, K.G. y Field, C.B. 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34: 179-204. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.041008.093740>.
- Lollato, R.P., Ruiz Diaz, D.A., DeWolf, E., Knapp, M., Peterson, D.E., Fritz, A.K. 2019. Agronomic practices for reducing wheat yield gaps: A quantitative appraisal of progressive producers. *Crop Science*, 59: 333-350. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.04.0249>.
- Lord, E.I., Mitchell, R.D.J. 1998. Effect of nitrogen inputs to cereals on nitrate leaching from sandy soils. *Soil Use and Management*, 14: 78-83. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1998.tb00619.x>.
- Malhi, S.S. 2006. Effects of four consecutive annual applications of elemental S and sulphate-S fertilizers on yield, S uptake and seed quality of wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, 86: 399-412. <https://doi.org/10.4141/P05-115>.
- Maltese, N., Melchiori, R., Maddonni, G., Ferreyra, J., Caviglia, O. 2019. Nitrogen economy of early and late-sown maize crops. *Field Crops Research*, 231: 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.007>.

- Martínez, F. y Cordone, G. 1998. Resultados de ensayos de fertilización azufrada en soja. Soja, campaña 97/98, INTA EEA Oliveros, pp. 53-57.
- McDonald, G.K., Taylor, J.D., Gong, X., Bovill, W. 2018. Responses to phosphorus among barley genotypes. *Crop and Pasture Science*, 69: 574-586. <https://doi.org/10.1071/CP17406>.
- McKenzie, R.H., Middleton, A.B., Hall, L., DeMulder, J., Bremer, E. 2004. Fertilizer response of barley grain in south and central Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, 84: 513-523. <https://doi.org/10.4141/s04-013>.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2023. Datos Agricultura, Ganadería y Pesca.
- Molina-Cano, J.L., Francesch, M., Perez-Vendrell, A.M., Ramo, T., Voltas, J., Brufau, J. 1997. Genetic and environmental variation in malting and feed quality of barley. *Journal of Cereal Science*, 25: 37-47. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1996.0067>.
- Molina-Cano, J.L., Rubio, A., Igartua, E., Gracia, P., Montoya, J.L. 2000. Mechanisms of malt extract development in barleys from different European regions: I. Effect of environment and grain protein content on malt extract yield. *Journal of the Institute of Brewing*, 106: 111-116. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2000.tb00047.x>.
- Molina-Cano, J.L., Romera, E., Aikasalo, R., Pérez-Vendrell, A.M., Larsen, J. y Rubió, A. 2002. A reappraisal of the differences between scandinavian and spanish barleys: effect of b-glucan content and degradation on malt extract yield in the cv. Scarlett. *Journal of the Institute of Brewing*, 108: 221-226. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2002.tb00544.x>.
- Monaghan, J.M., Scrimgeour, C.M., Stein, W.M., Zhao, F.J., Evans, E.J. 1999. Sulphur accumulation and redistribution in wheat (*Triticum aestivum*): a study using stable sulphur isotope ratios as a tracer system. *Plant, Cell & Environment*, 22: 831-839. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00445.x>.
- Morgan, A.G. y Riggs, T.J. 1981. Effects of drought on yield and on grain and malt characters in spring barley. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 32: 339-346. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740320405>.
- Mueller, N.D., Gerber, J.S., Johnston, M., Ray, D.K., Ramankutty, N. y Foley, J.A. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490: 254-257. <https://doi.org/10.1038/nature11907>.
- Nagelkerke, N. J. D. 1991. A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika*, 78: 691-692. <https://doi.org/10.1093/biomet/78.3.691>.
- Nakagawa, S. y Schielzeth, H. 2013. A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution* 4: 133-142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00261.x>.
- Nanamori, M., Watanabe, T., Shinano, T., Kihara, M., Kawahara, K., Yamada, S., Osaki, M. 2011. Changes in saccharide, amino acid and S-methylmethionine content during malting of barley grown with different nitrogen and sulfur status. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91: 85-93. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4154>.
- Niklas, K.J. 2006. Plant allometry, leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry, and interspecific trends in annual growth rates. *Annals of Botany*, 97: 155-163. <https://doi.org/10.1093/aob/mcj021>.
- Nischwitz, R., Cole, N.W., MacLeod, L. 1999. Malting for Brewhouse Performance. *Journal of the Institute of Brewing*, 105: 219-228. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.1999.tb00022.x>.
- O'Donovan, J.T., Turkington, T.K., Edney, M.J., Clayton, G.W., McKenzie, R.H., Juskiw, P.E., Lafond, G.P., Grant, C.A., Brandt, S., Harker, K.N., Johnson, E.N., May, W.E. 2011. Seeding rate, nitrogen rate, and cultivar effects on malting barley

- production. *Agronomy Journal*, 103: 709-716.
<https://doi.org/10.2134/agronj2010.0490>.
- O'Donovan, J.T., Anbessa, Y., Grant C.A., Macleod A.L., Edney M.J., Izydorczyk M.S., Turkington T.K., Juskiw P.E., Lafond G.P., May W.E., Harker K.N., Johnson E.N., Beres B.L., McAllister T.A., Smith E.G. y Chapman, W. 2015. Relative responses of new malting barley cultivars to increasing nitrogen rates in western Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 95: 831-839.
<https://doi.org/10.4141/cjps-2014-415>.
- Oenema, O. y Postma, R. 2003. Managing sulphur in agroecosystems. In: Abrol, Y.P. y Ahmad, A. (Eds.), *Sulphur in plants*, pp. 45-70. Springer, Dordrecht.
- Otero, E.A., Miralles, D.J., Peton, A., Conti, V.A., Giménez, F.J., Benech-Arnold, R.L. 2021. On-field assessment of the environmental modulation of malting quality in barley crops. *Field Crops Research*, 271: 108252.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108252>.
- Otero, E.A., Miralles, D.J., Peton, A., Conti, V.A., Giménez, F.J., Benech-Arnold, R.L. 2021. On-field assessment of the environmental modulation of malting quality in barley crops. *Field Crops Research*, 271: 108252.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108252>.
- Pagani, A., Echeverría, H., Andrade, F. y Sainz Rozas, H. 2012. Effects of nitrogen and sulfur application on grain yield, nutrient accumulation, and harvest indexes in maize. *Journal of Plant Nutrition*, 35: 1080-1097.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2012.671410>.
- Palmer, G.H. 2006. Barley and Malt. En: Fergus G.P y Graham G.S. (Eds.), *Handbook of Brewing*, CRC Press, pp. 139-160.
- Pask, A., Sylvester-Bradley, R., Jamieson, P., Foulkes, M. 2012. Quantifying how winter wheat crops accumulate and use nitrogen reserves during growth. *Field Crops Research*, 126: 104-118. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.021>.
- Peltonen, J., Rita, H., Aikasalo, R. y Home, S. 1994. Hordein and malting quality in northern barleys. *Hereditas*, 120: 231-239. <https://doi.org/10.1111/j.1601-5223.1994.00231.x>.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., R Core Team. 2022. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-155. <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- Pöttsch, F., Lux, G., Lewandowska, S., Schmidtke, K. 2019. Sulphur demand, accumulation and fertilization of *Pisum sativum* L. in pure and mixed stands with *Hordeum vulgare* L. Under field conditions. *Field Crops Research*, 239: 47-55.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.05.005>.
- Prystupa, P., Savin, R., Slafer, G.A. 2004. Grain number and its relationship with dry matter, N and P in the spikes at heading in response to N x P fertilization in barley. *Field Crops Research*, 90: 245-254. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.03.001>.
- Prystupa, P., Bergh, R., Ferraris, G., Loewy, T., Ventimiglia, L., Gutierrez Boem, F.H. y Couretot, L. 2008. Fertilización nitrogenada y azufrada en cebada cervecera cv. Scarlett. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 38: 5-11.
- Prystupa, P., Ferraris, G., Ventimiglia, L., Loewy, T., Couretot, L., Bergh, R. y Gutiérrez Boem, F.H. 2016. Fertilización nitrogenada y azufrada de cebada cervecera cv. Scarlett en la provincia de Buenos Aires: I. Efectos sobre el rendimiento y el contenido proteico de los granos. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 21: 7-14.
- Prystupa, P., Ferraris, G., Ventimiglia, L., Loewy, T., Couretot, L., Bergh, R., Gómez, F., Gutierrez Boem, F. H. 2018. Environmental control of malting barley response to

- nitrogen in the Pampas, Argentina. *International Journal of Plant Production*, 12: 127-137. <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0013-3>.
- Prystupa, P., Peton, A., Pagano, E., Gutiérrez-Boem, F.H. 2019. Sulphur fertilization of barley crops improves malt extract and fermentability. *Journal of Cereal Science*, 85: 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.12.014>.
- Prystupa, P., Peton, A., Pagano, E., Ferraris, G., Ventimiglia, L., Loewy, T., Gómez, F., Gutiérrez-Boem, F.H. 2021. Grain hordein content and malt quality as affected by foliar nitrogen fertilisation at heading. *Journal of the Institute of Brewing*, 127: 224-231. <https://doi.org/10.1002/jib.662>.
- Prystupa P. y Gutiérrez-Boem F. 2023. Crop growth rate during the critical period is associated with grain number under sulfur deficiency in barley crops subjected to different levels of nitrogen availability. *Crop & Pasture Science*, 74: 173-181. <https://doi.org/10.1071/CP22096>.
- Przulj, N., Momcilovic, V. 2001. Genetic variation for dry matter and nitrogen accumulation and translocation in two-rowed spring barley: II. Nitrogen translocation. *European Journal of Agronomy*, 15: 255-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(01\)00108-3](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(01)00108-3).
- R Core Team. 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Rahman, S., Shewry, P.R., Forde, B.G., Kreis, M. y Mifflin, B.J. 1983. Nutritional control of storage-protein synthesis in developing grain of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Planta*, 159: 366-372. <https://doi.org/10.1007/BF00393176>.
- Randall, P.J., Spencer, K., Kerry, J.R. 1981. Sulfur and nitrogen fertilizer effects on wheat. I. Concentration of sulfur and nitrogen and the nitrogen to sulfur ratio in grain, in relation to the yield response. *Australian Journal of Agricultural Research*, 32: 203-212. <https://doi.org/10.1071/ar9810203>.
- Randall, P., Freney, J., Spencer, K. 2003. Diagnosing sulfur deficiency in rice by grain analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 65: 211-219. <https://doi.org/10.1023/A:1022631020728>.
- Rattalino Edreira, J.I., Mourtzinis, S., Conley, S.P., Roth, A.C., Ciampitti, I.A., Licht, M. A., Kandel, H., Kyveryga, P.M., Lindsey, L.E., Mueller, D.S., Naeve, S.L., Nafziger, E., Specht, J.E., Stanley, J., Staton, M.J., Grassini, P. 2017. Assessing causes of yield gaps in agricultural areas with diversity in climate and soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247: 170-180. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.010>.
- Reussi Calvo, N.I., Echeverría, H.E. y Sainz Rozas, H. 2008. Usefulness of foliar nitrogen-sulfur ratio in spring red wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 31: 1612-1623. <https://doi.org/10.1080/01904160802244829>.
- Reussi Calvo, N., Echeverría, H., Sainz Rozas, H. 2011. Diagnosing sulfur deficiency in spring red wheat: Plant analysis. *Journal of Plant Nutrition*, 34: 573-589. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.538118>.
- Reussi Calvo, N.I., Carciochi, W.D., Prystupa, P., Queirolo, I., Sainz Rozas, H.R. 2022. Economic optimum nitrogen rate analysis for feed and malting barley. *Crop Science*, 62: 1997-2010. <https://doi.org/10.1002/csc2.20808>.
- Richmond P.F. y Rillo, S.N. 2009. Caracterización de la dinámica de incorporación de residuos de cosecha al suelo en un sistema agrícola en siembra directa en el centro-oeste de Buenos Aires. *IPNI*, 43: 22-26.
- Rizzo, G., Monzon, J.P., Ernst, O. 2021. Cropping system-imposed yield gap: Proof of concept on soybean cropping systems in Uruguay. *Field Crops Research*, 260: 107944. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107944>.

- Rubio, G., Lavado, R.S., Taboada, M.A., Scheiner, J.D., Zubillaga, M.M., Vrdoljak, G. 1996. Ventajas de la fertilización combinada en colza-canola. *Oleaginosos* 14: 16-19.
- Rubio, G., Pereyra, F.X., Taboada, M.A. 2019. Soils of the Pampean region. In: Rubio, G., Lavado, R., Pereyra, F. (Eds.), *The Soils of Argentina*. World Soils Book Series. Springer, Cham.
- Sadras V.O. 2006. The N:P stoichiometry of cereal, grain legume and oilseed crops. *Field Crops Research*, 95: 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.020>.
- Sadras, V.O., Grassini, P., Costa, R., Cohan, L. y Hall, A. 2014. How reliable are crop production data? Case studies in USA and Argentina. *Food Security*, 6: 447-459. <https://doi.org/10.1007/s12571-014-0361-5>.
- Sadras, V.O., Cassman, K.G., Grassini, P., Hall, A.J., Bastiaansen, W.G.M., Laborte, A.G., Milne, A.E., Sileshi, G. y Steduto, P. 2015. Yield gap analysis of rainfed and irrigated crops: methods and case studies. *FAO Water Reports No. 41*, Roma, 82 p.
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, H.E., Echeverría, H.E., Barbieri, P., Angelini, H., Larrea, G.E., Ferraris, G.N. y Barraco, M. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? *Simposio Fertilidad 2013*, pp 62-72.
- Salvagiotti, F. y Miralles, D. 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy*, 28: 282-290. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.08.002>.
- Salvagiotti, F., Ferraris, G., Quiroga, A., Barraco, M., Vivas, H., Prystupa, P., Echeverría, H., Gutiérrez Boem, F.H. 2012. Identifying sulfur deficient fields by using sulfur content, N:S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. *Field Crops Research*, 135: 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.011>.
- San Martín, N., Navarro, C. y Echeverría, H. 1987. Determinación de azufre total en material vegetal. *IDIA*, 457-462: 40-45.
- Sattari, S.Z., van Ittersum, M.K., Bouwman, A.F., Smit, A.L., Janssen, B.H. 2014. Crop yield response to soil fertility and N P, K inputs indifferent environments: testing and improving the QUEFTS model. *Field Crops Research*, 157: 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.005>.
- Savin, R., Sadras, V.O., Slafer, G.A. 2019. Benchmarking nitrogen utilisation efficiency in wheat for Mediterranean and non-Mediterranean European regions. *Field Crops Research*, 241: 107573. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107573>.
- Saxton, K.E.; Rawls, W.J.; Romberger, J.S.; Papendick, R.I. 1986. Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 1031-1036. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000040039x>.
- Schils, R., Olesen, J.E., Kersebaum, K.-C., Rijk, B., Oberforster, M., Kalyada, V., Khitrykau, M., Gobin, A., Kirchev, H., Manolova, V., Manolov, I., Trnka, M., Hlavinka, P., Palosuo, T., Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Lorgeou, J., Marrou, H., Danalatos, N., Archontoulis, S., Fodor, N., Spink, J., Roggero, P.P., Bassu, S., Pulina, A., Seehusen, T., Uhlen, A.K., Żyłowska, K., Nieróbca, A., Kozyra, J., Silva, J.V., Maçãs, B.M., Coutinho, J., Ion, V., Takáč, J., Mínguez, M.I., Eckersten, H., Levy, L., Herrera, J.M., Hiltbrunner, J., Kryvobok, O., Kryvoshein, O., Sylvester-Bradley, R., Kindred, D., Topp, C.F.E., Boogaard, H., de Groot, H., Lesschen, J.P., van Bussel, L., Wolf, J., Zijlstra, M., van Loon, M.P., van Ittersum, M.K. 2018. Cereal yield gaps across Europe. *European Journal of Agronomy*, 101: 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.09.003>.
- Schnug, E. y Haneklaus, S. 1998. Diagnosis of sulphur nutrition. En: Schnug E. (Ed.), *Sulphur in Agroecosystems*, pp 1-38. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

- Schwarz, P. y Li, Y. 2011. Malting and brewing uses of barley. En: Ullrich, S.E. (Ed.), *Barley: Production, improvement, and uses* (pp. 478-521). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470958636.ch15>.
- SENASA, Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Sanitaria, 2013. Norma V de Calidad y Comercialización de Cebada. Resolución 27/2013.
- Setiyono, T.D., Walters, D.T., Cassman, K.G., Witt, C., Dobermann, A. 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Research*, 118: 158-168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.05.006>.
- Shewry, P.R., Franklin, J., Parmar, S., Smith, S.J., Miflin, B.J. 1983. The effects of sulphur starvation on the amino acid and protein compositions of barley grain. *Journal of Cereal Science*, 1: 21-31. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(83\)80005-8](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(83)80005-8).
- Shewry, P.R., Tatham, A.S. 1990. The prolamin storage proteins of cereal seeds: structure and evolution. *Biochemical Journal*, 267, 1-12. <https://doi.org/10.1042/bj2670001>.
- Shewry, P.R., Tatham, A.S. y Halford, N.G. 2001. Nutritional control of storage protein synthesis in developing grain of wheat and barley. *Plant Growth Regulation*, 34: 105-111. <https://doi.org/10.1023/A:1013382803849>.
- Shewry, P.R., Halford, N.G. 2002. Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany*, 53: 947-958. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.947>.
- Shewry, P.R. 2011. Effects of nitrogen and sulfur nutrition on grain composition and properties of wheat and related cereals. En: Hawkesford, M.J., Barraclough P. (Eds.), *The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops*, John Wiley and Sons, pp. 103-120.
- Silva, J.V., Reidsma, P., Laborte, A.G. y van Ittersum, M.K. 2017. Explaining rice yields and yield gaps in Central Luzon, Philippines: An application of stochastic frontier analysis and crop modelling. *European Journal of Agronomy*, 82: 223-241. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.017>.
- Skwierawska, M., Zawartka, L., Zawadzki, B. 2008. The effect of different rates and forms of applied sulphur on nutrient composition of planted crops. *Plant, Soil and Environment*, 54: 179-189. <https://doi.org/10.17221/398-PSE>.
- Snijders, T.A.B. y Bosker, R.J. 1999. *Multilevel analysis: An introduction to basic and advanced multilevel modeling*. Sage, London.
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J., 1995. *Biometry. The Principles and Practices of Statistics in Biological Research*. WH Freeman and Company, New York.
- Stewart, W.M., Dibb, D.W., Johnston, A.E., Smyth, T.J. 2005. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agronomy Journal*, 97: 1-6. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0001>.
- Sumner, M.E. 1977. Preliminary N, P, and K foliar diagnostic norms for soybeans. *Agronomy Journal*, 69: 226-230. <https://doi.org/10.2134/agronj1977.00021962006900020008x>.
- Sutradhar, A.K., Kaiser, D.E., Fernández, F.G. 2017. Does Total Nitrogen/Sulfur Ratio Predict Nitrogen or Sulfur Requirement for Corn? *Soil Science Society of America Journal* 81, 564-577. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.10.0352>.
- Tatham, A.S., Shewry, P.R. 2012. The S-poor prolamins of wheat, barley and rye: Revisited. *Journal of Cereal Science*, 55: 79-99. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.10.013>.
- Tosi, J.C. 2013. *Alternativas de cultivos de invierno*. Area economía, INTA EEA Balcarce, 10 p.
- Triboi, E., Martre, P., Girousse, C., Ravel, C., Triboi-Blondel, A.M. 2006. Unravelling environmental and genetic relationships between grain yield and nitrogen

- concentration for wheat. *European Journal of Agronomy*, 25: 108-118.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.004>.
- van Bussel, L.G., Grassini, P., Wart, J.V., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., Saito, K., Cassman, K.G. y van Ittersum, M.K. 2015. From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research*, 177: 98-108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.005>.
- van Ittersum, M. y Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52: 197-208. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00037-3).
- van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittone, P., Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. *Field Crops Research*, 143: 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>.
- van Keulen, H., van Heermst, H.D.J. 1982. Crop response to the supply of macronutrients. *Agric. Res. Rep.* 916, C. *Agric. Publ. Doc.*, Wageningen, 45 p.
- Veliz, C.G., Criado, M.V., Roberts, I.N., Echeverria, M., Prystupa, P., Prieto, P., Gutierrez Boem, F.H., Caputo, C. 2014. Phloem sugars and amino acids as potential regulators of hordein expression in field grown malting barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Cereal Science*, 60: 433-439. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.04.008>.
- Venables, W.N., Ripley, B.D. 2002. *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0.
- Viglizzo, E.F., Frank, F.C., Carreno, L.V., Jobbagy, E.G., Pereyra, H., Clatt, J., Pincen, D., Ricard, M.F. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17: 959-973.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02293.x>.
- Walkley, A., Black, I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.
- Wang, J., Chen, J., Dai, F., Wu, F., Yang, J., Zhang, G. 2007. Protein fractions in barley grains as affected by some agronomic factors and their relationships to malt quality. *Cereal Research Communications*, 35: 129-140.
<http://www.jstor.org/stable/23789805>.
- Warton, D.I., Wright, I.J., Falster, D.S., Westoby, M. 2006. Bivariate line-fitting methods for allometry. *Biological Reviews*, 81: 259-291.
<https://doi.org/10.1017/S1464793106007007>.
- Warton, D.I., Duursma, R.A., Falster, D.S., Taskinen, S. 2012. smatr 3 - an R package for estimation and inference about allometric lines. *Methods in Ecology and Evolution*, 3: 257-259. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00153.x>.
- Wei, K.; Dai, F.; Wu, F.; Zhang, G. 2009. The Variation of β -amylase Activity and Protein Fractions in Barley Grains as Affected by Genotypes and Post-anthesis Temperatures. *Journal of the Institute of Brewing*, 115: 208-213.
<https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2009.tb00370.x>.
- Wieser, H., Antes, S., Seilmeier, W. 1998. Quantitative determination of gluten protein types in wheat flour by Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography. *Cereal Chemistry*, 75: 644-650. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1998.75.5.644>.
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14: 415-421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>.
- Zeileis, A.; Kleiber, C.; Krämer, W.; Hornik, K. 2003. Testing and Dating of Structural Changes in Practice. *Computational Statistics & Data Analysis*, 44: 109-123.
<https://doi.org/10.1016/S0167-9473%2803%2900030-6>.

- Zhao, F.J., Hawkesford, M.J. y McGrath, S.P. 1999a. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. *Journal of Cereal Science*, 30: 1-17.
<https://doi.org/10.1006/jcrs.1998.0241>.
- Zhao, F., Salmon, S., Withers, P., Monaghan, J., Evans, E., Shewry, P., McGrath, S. 1999b. Variation in the breadmaking quality and rheological properties of wheat in relation to sulphur nutrition under field conditions. *Journal of Cereal Science*, 30: 19-31. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1998.0244>.
- Zhao, F., Fortune, S., Barbosa, V., McGrath, S., Stobart, R., Bilsborrow, P., Booth, E., Brown, A., Robson, P. 2006. Effects of sulphur on yield and malting quality of barley. *Journal of Cereal Science*, 43: 369-377.
<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.12.003>.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Cuadro S.2.1. Parámetros del modelo modificados durante el proceso de calibración del cv. 'Andreia'.

Parámetro	Valor
[Phenology].VrnSensitivity.FixedValue	2
[Phenology].PpSensitivity.FixedValue	5.5
[Phenology].GrainFilling.Target.FixedValue	480
[Grain].NumberFunction.GrainNumber.GrainsPerGramOfStem.FixedValue	27

[Phenology].VrnSensitivity.FixedValue: sensibilidad a la vernalización (hojas);

[Phenology].PpSensitivity.FixedValue: Sensibilidad al fotoperiodo (hojas);

[Phenology].GrainFilling.Target.FixedValue: duración del llenado de granos (°Cd);

[Grain].NumberFunction.GrainNumber.GrainsPerGramOfStem.FixedValue: número de granos por gramo de vástago (granos g⁻¹).

Cuadro S.2.2. Variables descriptivas de cada experimento.

Exp ¹	Año	Coordenadas (lat, long)	Clasificación taxonómica	MO (%)	pH	Fecha de siembra	Dosis de fertilización N (kg N ha ⁻¹)	Dosis de fertilización S (kg S ha ⁻¹)	Antecesor ²	Humedad inicial (mm) ³	Presencia de napa ⁴
1	2014	34°19' S, 61°8' O	Argiudol ácuico	2.7	5.7	10-jun	59.2	0	Soja 2	267	no
2	2014	34°41' S, 60°59' O	Argiudol ácuico	2.9	5.7	03-jul	8.8	0	Soja 2	269	no
3	2014	34°44' S, 60°58' O	Argiudol ácuico	2.9	5.9	07-jul	4.2	1.1	Soja	357	ind
4	2015	35°22' S, 60°3' O	Hapludol éntico	1.9	5.8	10-jun	10.4	0	Soja	185	no
5	2015	35°22' S, 60°3' O	Udipsament típico	1.0	5.9	10-jun	10.4	0	Soja	132	no
6	2015	35°23' S, 60°4' O	Hapludol éntico	2.8	6.1	10-jun	8.8	0	Girasol	281	sí
7	2015	35°23' S, 60°4' O	Hapludol éntico	1.9	5.9	10-jun	8.8	0	Soja	268	sí
8	2015	34°13' S, 61°22' O	Hapludol típico	2.2	5.7	17-jun	101.2	9.8	Soja	285	ind
9	2015	34°14' S, 61°23' O	Hapludol típico	3.2	5.7	08-jun	82.8	9.8	Soja	339	sí

10	2015	34°43' S, 60°58' O	Argiudol ácuico	2.9	6.1	07-jul	70.0	1.2	Soja	321	sí
11	2015	34°42' S, 60°59' O	Argiudol típico	3.0	5.8	07-jul	65.0	1.2	Soja	280	sí
12	2015	34°41' S, 60°58' O	Argiudol ácuico	3.3	6.0	23-jun	72.0	1.2	Trigo	283	sí
13	2015	33°51' S, 61°11' O	Natralbol típico	2.8	5.9	09-jun	71.7	4.8	Soja	nd	nd
14	2015	33°51' S, 61°12' O	Argiudol típico	2.4	6.1	09-jun	65.9	4.8	Soja	nd	nd
15	2016	35°23' S, 60°4' O	Hapludol éntico	1.5	5.7	07-jun	15.4	0	Girasol	188	no
16	2016	35°22' S, 60°3' O	Hapludol tapto árgico	1.0	5.8	07-jun	69.8	0	Soja	180	no
17	2016	34°17' S, 61°21' O	Hapludol típico	2.1	5.9	21-jun	119.6	16.8	Soja	276	ind
18	2016	34°12' S, 61°24' O	Hapludol típico	1.7	5.6	19-jun	119.6	16.8	Soja	241	no
19	2016	34°38' S, 60°56' O	Hapludol típico	0.9	5.9	12-jul	41.8	4.6	Soja	192	no
20	2016	34°18' S, 61°10' O	Hapludol típico	2.1	6.0	13-jul	73.6	6.7	Soja	332	ind

21	2016	33°51' S, 61°12' O	Argiudol típico	2.4	5.9	07-jun	76.7	3.6	nd	nd	nd
22	2017	34°16' S, 61°18' O	Hapludol típico	2.5	5.8	20-jun	101.2	0	Soja	338	ind
23	2017	34°38' S, 60°2' O	Argiudol típico	4.1	6.2	25-jun	109.6	0	Soja	354	sí
24	2017	34°38' S, 60°3' O	Argiudol típico	4.1	6.3	23-jun	109.6	0	Soja	377	sí
25	2017	35°35' S, 60°11' O	Udipsament típico	1.4	5.8	01-jul	11	0	Soja	135	no
26	2017	35°35' S, 60°11' O	Hapludol éntico	1.5	6.1	25-jun	11	0	Soja	199	sí
27	2017	34°21' S, 61°7' O	Hapludol típico	2.3	6.1	20-jul	94.2	6.5	Soja	252	ind
28	2017	34°19' S, 61°8' O	Argiudol ácuico	2.1	4.9	13-jun	78.2	6.7	Soja	343	sí
29	2017	34°19' S, 61°7' O	Argiudol ácuico	2.4	6.0	13-jun	78.2	6.7	Soja	358	sí
30	2017	34°38' S, 60°56' O	Hapludol éntico	1.3	6.0	21-jul	43.2	0	Soja	174	no
31	2017	34°3' S, 60°29' O	Argiudol típico	nd	6.0	19-jun	121.9	14.9	nd	nd	nd

32	2018	34°14' S, 61°21' O	Hapludol típico	1.9	5.4	20-jun	87.4	16.1	Soja	295	no
33	2018	34°10' S, 61°24' O	Hapludol típico	2.0	5.3	06-jun	109.6	9.8	Soja	251	no
34	2018	34°38' S, 60°56' O	Hapludol típico	2.0	5.3	16-jun	86.6	6	Soja	249	no
35	2018	35°1' S, 60°31' O	Argiudol típico	2.0	6.3	25-jun	132.6	11.2	Soja	248	no
36	2018	34°39' S, 60°56' O	Hapludol típico	0.8	6.4	22-jun	87.0	0	Soja	181	no
37	2018	35°23' S, 60°2' O	Hapludol éntico	1.4	6.2	18-jun	78.3	22.5	Soja	183	sí
38	2018	35°22' S, 60°4' O	Hapludol éntico	2.0	5.8	25-may	51.6	11.2	Girasol	193	sí
39	2018	34°27' S, 61°1' O	Argiudol ácuico	1.8	5.5	03-jul	107.7	6.3	Maíz	353	sí
40	2018	35°21' S, 60°3' O	Hapludol éntico	2.5	5.8	27-jun	106.3	0	Soja	353	sí
41	2019	33°55' S, 60°31' O	Hapludol típico	2.5	5.2	26-jun	61.5	4.6	Barbecho	191	no
42	2019	33°55' S, 60°34' O	Hapludol éntico	2.2	5.4	26-jun	61.5	4.6	Barbecho	189	no

nd: dato no disponible.

¹ Exp refiere a experimento.

² Soja2 refiere al cultivo de soja realizado a continuación de un cultivo invernal.

³ Determinada a 1 metro de profundidad al inicio del ciclo del cultivo.

⁴ En zona de influencia radical (< 1.8 m): sí, no, ind (indicio de presencia).

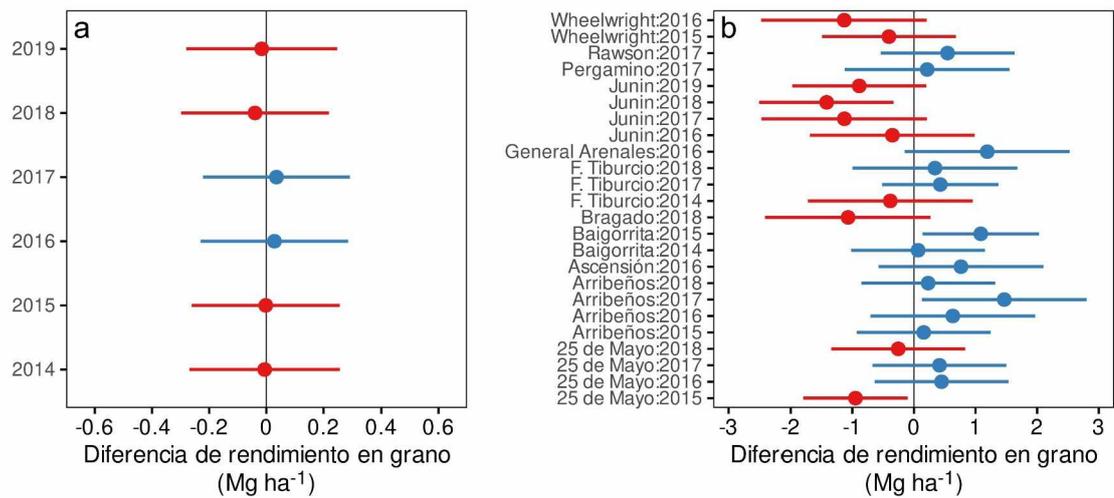


Figura S.2.1. Diferencia entre el rendimiento en grano logrado por el productor y el rendimiento en grano medio anual del departamento al cual pertenece (i.e. Y_a - rendimiento en grano medio departamental). En a) efecto aleatorio año, en b) efecto aleatorio departamento anidado en año. Los símbolos corresponden al valor medio del efecto aleatorio y las barras horizontales corresponden al intervalo de confianza estimado (IC 95 %). Símbolos y barras azules corresponden a valores medios positivos, mientras que símbolos y barras rojas corresponden a valores medios negativos. Los efectos aleatorios se estimaron a través de un modelo de efectos aleatorios en el que se consideró el año y la localidad anidado en el año como factores aleatorios. Los lotes de producción fueron asociados a una localidad por sus coordenadas geográficas.

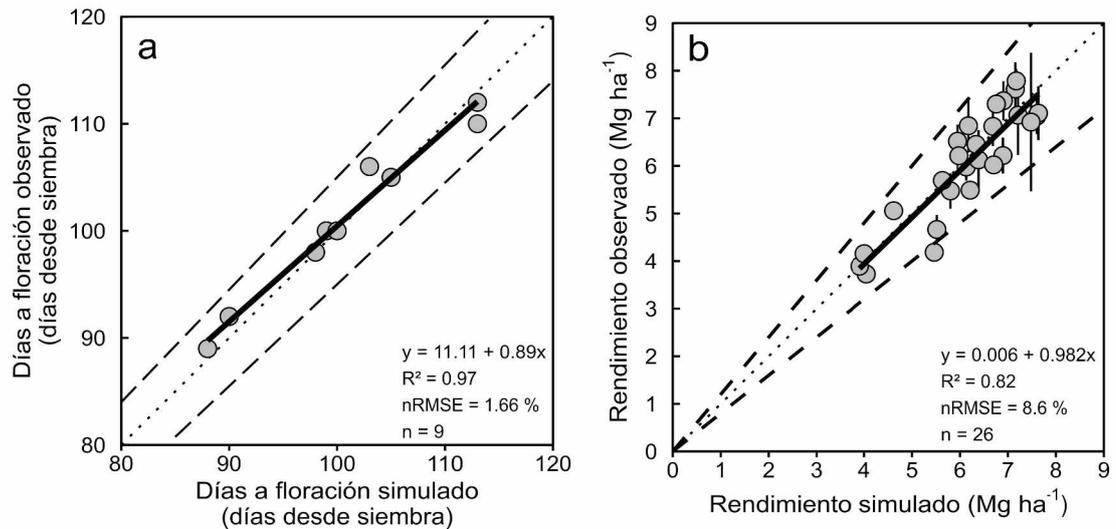


Figura S.2.2. Calibración del modelo de simulación Apsim Next Generation (versión 2021.1.20.5937) para el cv. 'Andreia' de cebada cervecera. a) Días a floración, b) Rendimiento en grano. Los modelos lineales fueron ajustados a través de mínimos cuadrados ponderados (WLS, por sus siglas en inglés). Se indica el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio relativo (nRMSE) y el número de observaciones (n). Las líneas punteadas refieren a la relación 1:1 y las líneas discontinuas refieren a ± 5 y 20% respecto a la relación 1:1, en a) y b), respectivamente. En b) cada símbolo corresponde al valor medio resultante de la combinación experimento-tratamiento y las barras verticales corresponden al error estándar.

Los experimentos utilizados durante el proceso de calibración del modelo para fenología fueron: 2, 11, 20, 27, 29, 30, 34, 39 y 42.

Los experimentos utilizados durante el proceso de evaluación del modelo para fenología fueron: 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 40 y 41.

Los experimentos utilizados durante el proceso de calibración del modelo para rendimiento en grano fueron: 3, 9, 11, 12, 17, 19, 22, 27, 29, 30, 32, 39 y 42.

Los experimentos utilizados durante el proceso de evaluación del modelo para rendimiento en grano fueron: 1, 2, 4, 5, 8, 10, 15, 18, 20, 23, 25, 28, 31, 33, 34, 36, 38 y 41.

Cuadro S.2.3.1. Efecto del agregado de N, S e interacción N-S sobre el rendimiento en grano y la concentración proteica de los granos para cada experimento (Exp). Se indica la magnitud del efecto en caso de encontrarse diferencias (al nivel de significancia de $\alpha = 0.05$), caso contrario, se indica solamente el valor- p .

Exp	Rendimiento en grano (kg ha ⁻¹)			Proteína en grano (%)		
	N	S	N x S	N	S	N x S
1	$p = 0.76$	$p = 0.10$	—	$p = 0.15$	$p = 0.92$	—
2	1535.7 **	$p = 0.29$	—	2.2 *	$p = 0.97$	—
3	2333.3 ***	$p = 0.11$	—	2.3 ***	$p = 0.94$	—
4	3070.3 ***	$p = 0.60$	—	$p = 0.99$	$p = 0.96$	—
5	1447.5 *	$p = 0.99$	—	3.0 ***	$p = 0.85$	—
6	$p = 0.12$	$p = 0.18$	—	0.92 *	$p = 0.97$	—
7	1654.4 **	$p = 0.16$	—	$p = 0.15$	$p = 0.52$	—
8	$p = 0.16$	$p = 0.93$	—	1.4 ***	$p = 0.10$	—
9	$p = 0.99$	$p = 0.90$	—	2.7 ***	1.1 **	—
10	$p = 0.22$	$p = 0.33$	—	$p = 0.13$	$p = 0.84$	—
11	$p = 0.87$	$p = 0.19$	—	$p = 0.95$	$p = 0.95$	—
12	1087.5 •	$p = 0.98$	—	1.1 **	$p = 0.72$	—
13	$p = 0.71$	$p = 0.61$	—	1.9 ***	-0.9 *	—
14	$p = 0.12$	$p = 0.10$	—	2.4 ***	$p = 0.44$	—
15	1369.9 ***	$p = 0.87$	$p = 1.00$	2.4 ***	$p = 0.74$	$p = 0.45$
16	1602.2 *	$p = 0.93$	$p = 0.70$	2.3 ***	$p = 0.89$	$p = 0.83$
17	$p = 0.92$	$p = 0.74$	$p = 0.47$	1.7 ***	$p = 0.99$	$p = 0.81$
18	1085.1 **	$p = 0.71$	$p = 0.91$	1.7 ***	$p = 0.65$	$p = 0.22$
19	$p = 0.98$	700.0 **	699.3 **	3.5 ***	$p = 0.47$	$p = 0.70$
20	-776.1 •	$p = 0.21$	$p = 0.99$	1.9 ***	$p = 0.46$	$p = 0.98$
21	692.3 *	$p = 0.13$	$p = 0.32$	3.2 ***	$p = 0.18$	$p = 0.90$
22	$p = 0.99$	$p = 0.94$	$p = 0.99$	$p = 0.98$	$p = 0.99$	$p = 0.65$
23	$p = 0.26$	$p = 0.99$	$p = 0.99$	2.1 ***	$p = 0.37$	$p = 0.86$

24	$p = 0.99$	$p = 0.56$	$p = 0.39$	3.0 ***	$p = 0.12$	1.5 •
25	$p = 0.55$	$p = 0.73$	967.3 ***	5.2 ***	2.0 ***	1.5 ***
26	675.6 *	$p = 0.89$	644.3 *	4.8 ***	$p = 0.76$	$p = 0.94$
27	$p = 0.74$	$p = 0.98$	$p = 0.83$	2.7 ***	$p = 0.55$	$p = 0.71$
28	1465.6 ***	$p = 0.10$	$p = 0.23$	3.2 ***	-2.0 ***	$p = 0.94$
29	$p = 0.99$	$p = 0.72$	$p = 0.99$	3.2 ***	1.5 **	$p = 0.35$
30	$p = 0.83$	1130.5 ***	877.1 **	4.8 ***	-1.7 **	$p = 0.96$
31	$p = 0.72$	$p = 0.87$	$p = 0.98$	1.9 ***	$p = 0.63$	$p = 0.99$
32	$p = 0.44$	$p = 0.96$	$p = 0.80$	1.7 **	$p = 0.53$	$p = 0.95$
33	857.1 **	$p = 0.94$	$p = 0.99$	1.8 ***	$p = 0.99$	$p = 0.80$
34	$p = 0.81$	1339.2 •	$p = 0.46$	3.0 ***	$p = 0.99$	$p = 0.95$
35	2767.4 ***	$p = 0.99$	$p = 0.98$	1.3 ***	$p = 0.81$	$p = 0.42$
36	$p = 0.59$	$p = 0.26$	$p = 0.50$	3.5 ***	$p = 0.59$	$p = 0.93$
37	2965.7 ***	$p = 0.99$	$p = 0.18$	1.9 ***	-1.1 ***	$p = 0.99$
38	1469.3 ***	$p = 0.95$	$p = 0.99$	1.6 **	$p = 0.92$	$p = 0.41$
39	1118.8 ***	$p = 0.89$	$p = 0.97$	2.0 ***	$p = 0.96$	$p = 0.78$
40	$p = 0.64$	$p = 0.46$	$p = 0.30$	2.0 ***	$p = 0.94$	$p = 0.99$
41	$p = 0.86$	$p = 0.94$	$p = 0.28$	2.7 ***	$p = 0.23$	$p = 0.48$
42	$p = 0.63$	$p = 0.98$	$p = 0.95$	2.2 ***	$p = 0.80$	$p = 0.94$

•: $p < 0.10$, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

Cuadro S.2.3.2. Contrastes entre tratamientos para los experimentos que presentaron interacción N-S para el rendimiento en grano y la concentración proteica de los granos. Se indica la magnitud del efecto en caso de encontrarse diferencias (al nivel de significancia de $\alpha = 0.05$), caso contrario, se indica sólo el valor- p .

Rendimiento en grano (kg ha ⁻¹)				
Experimento				
Contraste	19	25	26	30
+S vs. Productor	$p = 1.0$	$p = 0.15$	$p = 0.48$	$p = 0.87$
+NS vs. +N	1399.4 ***	1202.4 **	806.1 •	2007.6 ***
+N vs. Productor	- 763.0 •	$p = 0.21$	$p = 0.99$	- 1072.3 *
+NS vs. +S	$p = 0.14$	1271.3 **	1320.0 **	$p = 0.19$

Proteína en grano (%)		
Experimento		
Contraste	24	25
+S vs. Productor	$p = 0.99$	$p = 0.47$
+NS vs. +N	3.1 *	3.6 ***
+N vs. Productor	$p = 0.41$	3.7 ***
+NS vs. +S	4.6 ***	6.7 ***

•: $p < 0.10$, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

Cuadro S.2.4. Pendiente estimada, intervalo de confianza al 95 % (IC 95 %) y valor-*p* de la relación entre la concentración proteica y el rendimiento en grano en cada experimento. El valor-*p* corresponde a la evaluación de la hipótesis nula donde el valor de la pendiente es cero (nivel de significancia de $\alpha = 0.05$).

Exp	Pendiente	IC 95 %	valor- <i>p</i>
1	-0.299	-3.336; 2.738	0.84
2	0.726	-0.714; 2.166	0.32
3	1.050	-0.248; 2.359	0.11
4	0.017	-0.900; 0.936	0.96
5	0.821	-0.744; 2.387	0.30
6	0.447	-1.458; 2.354	0.64
7	0.373	-1.420; 2.168	0.68
8	1.189	-1.525; 3.905	0.38
9	1.550	-4.001; 7.102	0.58
10	0.878	-1.528; 3.286	0.47
11	0.650	-1.8687 3.169	0.61
12	0.181	-1.516; 1.880	0.83
13	0.193	-6.043; 6.431	0.95
14	1.626	-1.156; 4.409	0.25
15	1.316	0.057; 2.576	< 0.05
16	0.540	-0.029; 1.110	0.06
17	0.045	-1.771; 1.863	0.96
18	0.836	-0.117; 1.790	0.08
19	-0.481	-1.905; 0.944	0.50
20	-1.339	-3.791; 1.113	0.28
21	1.203	-0.407; 2.815	0.14
22	0.195	-1.053; 1.444	0.75
23	0.758	-1.123; 2.641	0.42
24	1.762	0.142; 3.383	< 0.05
25	2.759	1.177; 4.342	< 0.001
26	1.939	0.506; 3.372	< 0.01
27	0.245	-0.518; 1.009	0.52
28	0.977	0.114; 1.841	< 0.05
29	0.408	-0.923; 1.740	0.54
30	-1.334	-2.435; -0.234	< 0.05
31	2.513	-0.817; 5.844	0.13
32	0.644	-0.924; 2.214	0.41
33	1.419	-0.379; 3.218	0.12
34	0.090	-0.758; 0.939	0.83
35	0.474	-0.158; 1.108	0.14
36	0.101	-1.971; 2.175	0.92
37	0.568	-0.024; 1.161	0.06

38	0.789	-0.220; 1.799	0.12
39	1.487	0.033; 2.941	< 0.05
40	0.144	-1.684; 1.973	0.87
41	0.200	-1.963; 2.366	0.85
42	0.231	-1.255; 1.719	0.75

Cuadro S.2.5. Parámetros estimados de las funciones de borde superior, mediana y de borde inferior ajustadas a la relación entre rendimiento en grano y la cantidad de N absorbido (RG90, RG50 y RG10) y a la relación lineal entre la concentración proteica en grano y la cantidad de N absorbido (GP90, GP50 y GP10).

Variable dependiente	Función por cuantil	Parámetros estimados	
		b	c
Rendimiento en grano	RG90	7.93	145.0
	RG50	6.37	130.1
	RG10	4.74	137.5
		Ordenada al origen	Pendiente
Concentración proteica en grano	GP90	6.854	0.041
	GP50	5.207	0.035
	GP10	3.836	0.036

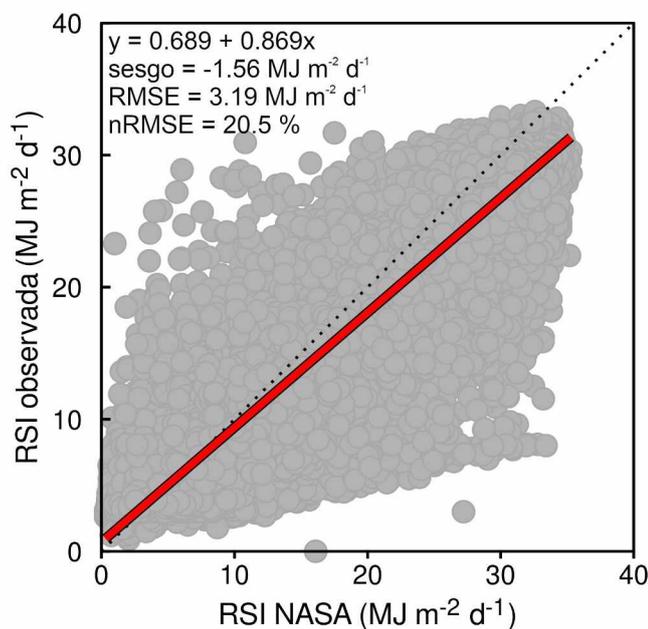


Figura S.2.3. Relación entre la radiación solar incidente de datos medidos en 10 estaciones meteorológicas y las estimaciones de radiación solar incidente obtenidas de The POWER Project (NASA). Se indica el sesgo, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la raíz del error cuadrático medio relativo (nRMSE) con sus respectivas unidades. La línea punteada refiere a la relación 1:1. El modelo ajustado fue un modelo lineal mixto, en el que se consideró a la radiación solar incidente estimada como efecto fijo, mientras que la estación meteorológica y la

interacción entre la radiación solar incidente estimada en cada estación meteorológica como efecto aleatorio. Además, se tuvo en cuenta la presencia de heterocedasticidad. R^2 marginal = 0.925, R^2 condicional = 0.929 (Nakagawa y Schielzeth, 2013).



Figura S.2.4. Parcelas correspondientes al tratamiento '+N' (i.e. 250 kg N ha^{-1} , izquierda) y '+NS' (250 kg N ha^{-1} y 20 kg S ha^{-1} , derecha) en antesis del cultivo, en el experimento 30 realizado en 2017.

Cuadro S.3.2. Información de sitio, cultivar y fertilización realizada por el productor en los experimentos

Experimento	Año	Coordenadas (lat, long)	Clasificación ¹ taxonómica	MO ² (%)	pH ³	Dosis ⁴ de fertilización N (kg N ha ⁻¹)	Dosis de fertilización S (kg S ha ⁻¹)	Cultivar	Rainfall ⁵ (mm)	Temperatura (°C)
1	2014	35° 22' S, 60° 4' O	Hapludol éntico	1.8	5.5	6.0	10.5	Shakira	1462	17.3
2	2014	35° 22' S, 60° 4' O	Hapludol éntico	1.9	5.4	38.2	10.5	Shakira	1462	17.3
3	2014	35° 23' S, 60° 4' O	Hapludol éntico	2.1	5.6	4.8	8.4	Shakira	1462	17.3
4	2014	35° 23' S, 60° 4' O	Hapludol éntico	2.4	6.0	13.2	0	Shakira	1462	17.3
5	2014	34° 19' S, 61° 8' O	Argiudol ácuico	2.7	5.7	59.2	0	Andreia	1532	16.9
6	2014	34° 41' S, 60° 59' O	Argiudol ácuico	2.9	5.7	8.8	0	Andreia	1638	16.9
7	2014	34° 42' S, 60° 57' O	Hapludol típico	3.3	5.7	4.2	1.1	Scarlett	1638	16.9
8	2014	34° 44' S, 60° 58' O	Argiudol ácuico	2.9	5.9	4.2	1.1	Andreia	1638	16.9
9	2014	34°45' S, 61° 0' O	Hapludol típico	3.0	5.9	4.5	1.2	Scarlett	1638	16.9
10	2014	34° 45' S, 61° 0' O	Hapludol típico	2.9	5.9	4.5	1.2	Scarlett	1638	16.9

11	2014	35° 14' S, 60° 2' O	Hapludol típico	2.4	5.4	83.3	0	Jeniffer	1462	17.3
12	2014	34° 45' S, 60° 50' O	Hapludol típico	3.1	5.9	67.3	0	Shakira	1638	16.9
13	2014	34° 33' S, 61° 1' O	Hapludol éntico	1.8	5.7	5.0	2.0	Shakira	1638	16.9
14	2015	35° 22' S, 60° 3' O	Hapludol éntico	1.9	5.8	10.4	0	Andreia	1264	17.5
15	2015	35° 22' S, 60° 3' O	Udipsament típico	1.0	5.9	10.4	0	Andreia	1264	17.5
16	2015	35° 23' S, 60° 4' O	Hapludol éntico	2.8	6.1	8.8	0	Andreia	1264	17.5
17	2015	35° 23' S, 60° 4' O	Hapludol éntico	1.9	5.9	8.8	0	Andreia	1264	17.5
18	2015	35° 15' S, 60° 52' O	Hapludol típico	2.7	6.2	91.1	0	Explorer	1093	17.5
19	2015	35° 14' S, 60° 51' O	Argiudol típico	4.7	6.3	91.1	0	Explorer	1093	17.5
20	2015	35° 14' S, 60° 52' O	Hapludol típico	2.7	6.1	91.1	0	Explorer	1093	17.5
21	2015	34° 24' S, 60° 59' O	Hapludol típico	2.5	6.0	5.6	0	Traveler	1348	17.0
22	2015	34° 13' S, 61° 22' O	Hapludol típico	2.2	5.7	101.2	9.8	Andreia	1390	17.0
23	2015	34° 14' S,	Hapludol típico	3.2	5.7	82.8	9.8	Andreia	1390	17.0

		61° 23' O								
24	2015	34° 43' S, 60° 58' O	Argiudol ácuico	2.9	6.1	70.0	1.2	Andreia	1348	17.0
25	2015	34° 42' S, 60° 59' O	Argiudol típico	3.0	5.8	65.0	1.2	Andreia	1348	17.0
26	2015	34° 41' S, 60° 58' O	Argiudol ácuico	3.3	6.0	72.0	1.2	Andreia	1348	17.0
27	2016	35° 23' S, 60° 4' O	Hapludol éntico	1.5	5.7	15.4	0	Andreia	984	16.7
28	2016	35° 22' S, 60° 3' O	Hapludol tapto árgico	1.0	5.8	69.8	0	Andreia	984	16.7
29	2016	34° 17' S, 61° 21' O	Hapludol típico	2.1	5.9	119.6	16.8	Andreia	1390	16.4
30	2016	34° 12' S, 61° 24' O	Hapludol típico	1.7	5.6	119.6	16.8	Andreia	1390	16.4
31	2016	34° 38' S, 60° 56' O	Hapludol típico	0.9	5.9	41.8	4.6	Andreia	1109	16.4
32	2016	34° 18' S, 61° 10' O	Hapludol típico	2.1	6.0	73.6	6.7	Andreia	1390	16.4
33	2017	34° 16' S, 61° 18' O	Hapludol típico	2.5	5.8	101.2	0	Andreia	1475	17.2
34	2017	34° 38' S, 60° 2' O	Argiudol típico	4.1	6.2	109.6	0	Andreia	938	17.2
35	2017	34° 38' S, 60° 3' O	Argiudol típico	4.1	6.3	109.6	0	Andreia	938	17.2

36	2017	35° 35' S, 60° 11' O	Udipsament típico	1.4	5.8	11.0	0	Andreia	926	17.4
37	2017	35°35' S, 60°11' O	Hapludol éntico	1.5	6.1	11.0	0	Andreia	926	17.4
38	2017	34° 21' S, 61° 7' O	Hapludol típico	2.3	6.1	94.2	6.5	Andreia	1475	17.2
39	2017	34° 19' S, 61° 8' O	Argiudol ácuico	2.1	5.9	78.2	6.7	Andreia	1475	17.2
40	2017	34° 19' S, 61° 7' O	Argiudol ácuico	2.4	6.0	78.2	6.7	Andreia	1475	17.2
41	2017	34° 38' S, 60° 56' O	Hapludol éntico	1.3	6.0	43.2	0	Andreia	1209	17.2
42	2018	34° 14' S, 61° 21' O	Hapludol típico	1.9	5.4	87.4	16.1	Andreia	1159	16.9
43	2018	34° 10' S, 61° 24' O	Hapludol típico	2.0	5.3	109.6	9.8	Andreia	1159	16.9
44	2018	34° 38' S, 60° 56' O	Hapludol típico	2.0	5.3	86.6	6.0	Andreia	1234	16.9
45	2018	35° 1' S, 60° 31' O	Argiudol típico	2.0	6.3	132.6	11.2	Andreia	974	17.1
46	2018	34° 39' S, 60° 56' O	Hapludol típico	0.8	6.4	87.0	0	Andreia	1234	16.9
47	2018	35° 23' S, 60° 2' O	Hapludol éntico	1.4	6.2	78.3	22.5	Andreia	1426	17.1
48	2018	35° 22' S,	Hapludol éntico	2.0	5.8	51.6	11.2	Andreia	1426	17.1

		60° 4' O								
49	2018	34° 27' S, 61° 1' O	Argiudol ácuico	1.8	5.5	107.7	6.3	Andreia	1159	16.9
50	2018	35° 21' S, 60° 3' O	Hapludol éntico	2.5	5.8	106.3	0	Andreia	1426	17.1

¹ Clasificación basada en la serie de suelo identificada para cada experimento a partir de la carta de suelos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (<http://www.geointa.inta.gob.ar>).

² MO, Materia orgánica (0-20 cm), a través del método de Walkley and Black (1934).

³ pH, (0-20 cm) con una relación suelo:agua de 1:2.5.

⁴ La mayoría de los productores fertilizó entre siembra y macollaje. Solamente en el experimento 33 la fertilización con N fue fraccionada en dos momentos: a la siembra y al comienzo de la elongación del tallo. La mayoría de los productores realizaba siembra directa, con excepción en los experimentos 4, 16, 27 y 48 donde realizaron labranza con discos. El cultivo antecesor más frecuente fue soja. Las fechas de siembra estuvieron comprendidas desde los primeros días de Junio y los finales de Julio.

⁵ Tanto la precipitación como la temperatura media anual fueron obtenidas de estaciones meteorológicas cercanas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN, <http://www.smn.gov.ar/>).

- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37, 29-37.

Cuadro S.3.3. Modelos logarítmicos ajustados a través del método de ejes principales estandarizados (SMA) para la relación entre la cantidad de N absorbido y la cantidad de S absorbido, en grano y en biomasa aérea. Los valores entre paréntesis corresponden a los intervalos de confianza de los parámetros a un nivel de 95%.

Modelo: $\log_{10} y \sim a + b \log_{10} x$	Grupo	Parámetro de la función		R ²
		Ordenada al origen (a)	Pendiente (b)	
Ngrano ~ Sgrano	'N _{alto} - S _{bajo} '	1.518 (1.430; 1.607)	0.616 (0.507; 0.749)	0.65
	'N _{bajo} - S _{bajo} ', 'N _{alto} - S _{alto} ', 'N _{bajo} - S _{alto} '	1.022 (0.971; 1.073)	1.107 (1.040; 1.179)	0.86
	'N _{alto} - S _{bajo} '	1.582 (1.431; 1.732)	0.578 (0.437; 0.765)	0.27
Nabsorbido ~ Sabsorbido	'N _{bajo} - S _{bajo} ', 'N _{alto} - S _{alto} ', 'N _{bajo} - S _{alto} '	0.865 (0.782; 0.949)	1.117 (1.034; 1.206)	0.79

Ngrano y Sgrano: cantidad de nitrógeno y azufre absorbido en grano, respectivamente.
Nabsorbido y Sabsorbido: cantidad de nitrógeno y azufre absorbido en biomasa aérea, respectivamente.

Cuadro S.4.2. Predictores lineales (η) y BIC de los modelos multinomiales ajustados para tiempo de sacarificación, en relación a la concentración proteica de granos, la relación N:S (como variable cuantitativa) y el calibre de granos. Para el ajuste de los modelos se consideró el conjunto de datos completo y el subconjunto correspondiente al rango de concentraciones proteicas en grano entre 9.5 y 13 %.

Variable independiente	Predictor lineal (η)	BIC
Conjunto de datos completo		
Proteína	10-15 / 5-10: 3.432 - 0.024 Proteína	220.4
	15-20 / 5-10: -2.838 + 0.266 Proteína	
N:S (variable cuantitativa)	10-15 / 5-10: 3.655 - 0.031 N:S	215.5
	15-20 / 5-10: -1.986 + 0.103 N:S	
Calibre	10-15 / 5-10: 16.641 - 0.147 Calibre	213.8
	15-20 / 5-10: 19.979 - 0.225 Calibre	
Subconjunto de datos con rango de proteína en grano 9.5 - 13 %		
Proteína	10-15 / 5-10: -6.555 + 0.938 Proteína	135.6
	15-20 / 5-10: -15.766 + 1.517 Proteína	
N:S (variable cuantitativa)	10-15 / 5-10: 1.602 + 0.102 N:S	108.0
	15-20 / 5-10: -4.055 + 0.251 N:S	
Calibre	10-15 / 5-10: 19.953 - 0.185 Calibre	105.8
	15-20 / 5-10: 26.416 - 0.297 Calibre	

Cuadro S.4.3. Predictores lineales (η) y BIC de los modelos ajustados que relacionaban el tiempo de filtración y los grupos de relaciones N:S en grano conformados. Para el ajuste de los modelos se consideró el conjunto de datos completo y el subconjunto correspondiente al rango de concentraciones proteicas en grano entre 9.5 y 13 %. El grupo 'N:S < 10.1' se consideró como nivel de referencia del factor (grupo) cuando se analizó el conjunto de datos completo, mientras que el nivel de referencia fue el grupo 'N:S 10.1-17.7' cuando se analizó el subconjunto. Los coeficientes ajustados para cada nivel expresan la diferencia respecto al nivel de referencia.

	Predictor lineal (η)	BIC
Conjunto de datos completo	> 60 min / Normal: -1.824 + 1.038(N:S10.1-17.7) + 1.824(N:S>17.7)	435.9
Subconjunto de datos con rango de proteína en grano 9.5 - 13 %	> 60 min / Normal: -0.985 + 1.118(N:S>17.7)	171.7