

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**ANÁLISIS DE LA CALIDAD COMERCIAL DE CEBADA CERVECERA EN
CONDICIONES DE PRODUCCIÓN**

por

Tomás SOBREDO TOSCANO

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**PAYSANDÚ
URUGUAY
2026**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial**”



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a: _____
Ing. Agr. (Mag.) Maximiliano Verocai

Tribunal:

Ing. Agr. (Mag.) Maximiliano Verocai

Lic. Bio. (Mag.) Lorena Cammarota

Ing. Agr. (Dr.) Ariel Julio Castro Tabó

Fecha: 21 de mayo de 2026

Estudiante: _____
Tomás Sobreto Toscano

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia por su apoyo y por ser un sostén constante a lo largo de todo este camino, ya que sin ellos todo hubiese sido mucho más difícil. También a Clara, que estuvo siempre presente durante mi último año de carrera y el desarrollo de la tesis, siendo un pilar muy importante para mí.

A mis compañeros, con quienes compartí estos años, haciendo de esta carrera una experiencia más enriquecedora y amena. Asimismo, a mis amigos, que siempre estuvieron apoyando.

En segundo lugar, quiero agradecer a mi tutor, el Ing. Agr. Maximiliano Verocai, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo final de grado, así como por su compromiso y acompañamiento constante durante todo el proceso.

Por último, agradezco profundamente a Maltería Oriental S.A. por facilitar la base de datos, sin la cual no hubiese sido posible llevar a cabo este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUCCIÓN	10
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Cebada cervecera	11
2.1.1 Importancia del cultivo	11
2.1.2 Situación actual: producción y calidad	11
2.1.3 Mercados e industrias malteras	12
2.1.4 Caracterización varietal según origen	13
2.1.4.1 Variedades de origen nacional.....	13
2.1.4.2 Variedades de origen europeo	14
2.1.5 Variedades comerciales de cebada cervecera: recambio varietal	14
2.1.6 Calidad	15
2.1.6.1 Humedad	16
2.1.6.2 Porcentaje de proteína.....	17
2.1.6.3 Pureza varietal	17
2.1.6.4 Calibre	17
2.1.6.5 Capacidad germinativa	18
2.1.6.6 Hagberg Falling Number	18
2.1.7 Periodo de determinación de los parámetros de calidad	19
2.1.8 Factores que afectan la calidad del grano.....	20
2.1.8.1 Genético	20
2.1.8.1.1 Dormición de los granos	21
2.1.8.2 Ambiental.....	22
2.1.8.3 Manejo agronómico	24
3 MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1 Ajuste del modelo fenológico usando la base de datos de INIA INASE	26
3.2 Partición de los datos y validación del modelo.....	26
3.3 Modelo estadístico.....	26
3.4 Evaluación del desempeño predictivo del modelo	27
3.5 Base de datos independiente y preprocesamiento	27
3.6 Selección espacial de chacras mediante distancia geográfica.....	28
3.7 Predicción de eventos fenológicos	28
3.8 Análisis exploratorio y detección de valores atípicos en las predicciones	28
3.9 Reconstrucción de fechas fenológicas y subdivisión del período de llenado	28

3.10	Caracterización climática de la zafra 2024	28
3.11	Obtención y procesamiento de variables climáticas.....	31
3.12	Definición de períodos fenológicos	32
3.13	Integración de variables climáticas a la base de datos	32
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1	Distribución temporal de las fechas de siembra según variedad.....	33
4.2	Cobertura espacial de las chacras registradas	34
4.3	Caracterización ambiental de los subperíodos de llenado de grano	36
4.4	Caracterización de la calidad comercial.....	37
4.5	Desempeño predictivo del modelo fenológico.....	43
4.6	Evaluación de la calidad industrial a través de regresión por cuantiles.....	44
4.7	Factores ambientales y varietales asociados a la calidad del grano (Falling Number y Clasificación).	48
4.7.1	Falling Number.	48
4.7.2	Clasificación.	51
5	CONCLUSIÓN	56
6	BIBLIOGRAFÍA	59
7	ANEXO	64

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1 Comparación de Falling Number entre variedades comerciales mediante modelo GAM.....	48
Tabla 2 Relación de variables ambientales y geográficas con el Falling Number mediante modelo GAM	49
Tabla 3 Resultados de la regresión por cuantiles para Falling Number	50
Tabla 4 Comparación de Clasificación entre variedades comerciales mediante modelo GAM	51
Tabla 5 Relación de variables ambientales y geográficas con la Clasificación mediante modelo GAM	52
Tabla 6 Resultados de la regresión por cuantiles para Clasificación	53
Figura 1 Anomalías de precipitación en porcentaje para el año 2024.....	29
Figura 2 Precipitación acumulada promedio, a escala país, para los meses del año 2024.	30
Figura 3 Mapa de temperatura media.	31
Figura 4 Temperatura media mensual según los terciles de la distribución climatológica.....	31
Figura 5 Distribución acumulada de las fechas de siembra registradas para cada variedad de cebada cervecera evaluada.....	34
Figura 6 Regionalización de variedades de cebada según ubicación geográfica de las chacras	35
Figura 7 Distribución de la temperatura media para los distintos subperíodos del llenado de grano	36
Figura 8 Distribución de las precipitaciones acumuladas para los distintos subperíodos del llenado de grano	37
Figura 9 Distribución porcentual de la Clasificación (% de granos de 1° + 2°) para las variedades de cebada cervecera evaluadas	38
Figura 10 Distribución porcentual de los valores de Falling Number para las variedades de cebada cervecera evaluadas	39
Figura 11 Distribución porcentual del nivel de proteína en grano por variedad de cebada cervecera evaluadas	39
Figura 12 Distribución espacial del Falling Number en Uruguay (a) y por variedad (b)	41
Figura 13 Distribución espacial de la Clasificación en Uruguay (a) y por variedad (b).	42
Figura 14 Relación entre valores observados y predichos para días hasta floración (validación del modelo).....	43
Figura 15 Relación entre valores observados y predichos para días hasta madurez fisiológica (validación del modelo).....	44
Figura 16 Efecto estimado de cada variedad sobre el Falling Number según cuantil	45
Figura 17 Efecto estimado de cada variedad sobre la Clasificación según cuantil	46

RESUMEN

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) es un cultivo clave en Uruguay, ocupando el cuarto lugar en superficie sembrada y destacándose en la producción invernal. Se concentra principalmente en el litoral y centro del país. Sus destinos principales son la alimentación animal, la producción de malta y el consumo humano; en Uruguay, más del 90 % se exporta como malta. Su producción se comercializa mediante contratos con malterías, donde se establecen estrictas condiciones de calidad, fundamentales para un correcto proceso de malteo. En este contexto, el presente trabajo se enfoca en analizar el efecto del ambiente sobre parámetros de comercialización en variedades de cebada cervecera, particularmente el impacto de las precipitaciones y la temperatura durante el llenado de grano sobre el Falling Number y el calibre. En primer lugar, se ajustó un modelo fenológico utilizando la base de datos INIA-INASE. Se trabajó con cinco variedades de cebada cervecera (INIA Arrayán, INIA Osiris, Fana, Danielle y Nahara), empleando registros de fecha de siembra, floración y madurez fisiológica. A partir de estos datos se generaron las variables días a floración y días a madurez fisiológica, las cuales fueron modeladas mediante modelos lineales mixtos, considerando como efectos aleatorios la variedad, la fecha de siembra y el año agrícola. Este procedimiento permitió generar gráficos de diagnóstico para comparar valores observados y predichos, así como analizar la distribución de residuos. Para aplicar los modelos ajustados, se utilizó además una base de datos provista por la empresa MOSA, correspondiente a chacras comerciales de cebada cervecera, lo que permitió predecir los días a floración y madurez fisiológica. A fin de asegurar la representatividad espacial, se seleccionaron chacras ubicadas dentro del rango definido por las localidades de La Estanzuela y EEMAC, utilizadas en el ajuste del modelo. A partir de los modelos fenológicos se reconstruyeron las fechas de floración, madurez fisiológica y cosecha (considerada diez días posteriores a la madurez). El período de llenado de grano se subdividió en tres fases (p1, p2 y p3) para caracterizar etapas críticas en la determinación de la calidad. Los datos climáticos se obtuvieron de la base NASA POWER, considerando temperatura media diaria y precipitación total corregida, calculándose acumulados y promedios para los intervalos floración–p1, p1–p2, p2–madurez fisiológica y madurez–cosecha. Finalmente, se integraron los datos varietales, espaciales, fenológicos y climáticos en una base ampliada, utilizada en análisis estadísticos para evaluar la influencia ambiental sobre el cultivo. Los resultados evidenciaron un buen ajuste y calibración del modelo, con alta concordancia entre valores observados y predichos, lo que respalda su confiabilidad. Esto permitió su aplicación en la base de datos de maltería para analizar la relación entre ambiente y calidad del grano en condiciones reales de producción. Se comprobó que el Falling Number es especialmente sensible durante el primer tercio del llenado, influido por precipitaciones y temperatura, mientras que el calibre se relaciona significativamente con la temperatura hacia el final del llenado y previo a la cosecha. Asimismo, se observó un efecto de la localización geográfica sobre ambos atributos. En síntesis, la integración de datos fenológicos, climáticos y varietales aporta evidencia útil para reducir riesgos de rechazo y orientar decisiones de manejo a nivel productivo.

Palabras clave: cebada cervecera, calidad del grano, Falling Number, calibre, condiciones ambientales

ABSTRACT

Barley (*Hordeum vulgare* L.) is a key crop in Uruguay, ranking fourth in sown area and standing out in winter production. It is mainly concentrated in the western and central regions of the country. Its main uses are animal feed, malt production, and human consumption; in Uruguay, more than 90% is exported as malt. Its production is commercialized through contracts with malting companies, where strict quality requirements are established, which are essential for a proper malting process. In this context, the present study focuses on analyzing the effect of the environment on commercial quality parameters in malting barley varieties, particularly the impact of precipitation and temperature during grain filling on Falling Number and grain size. First, a phenological model was fitted using the INIA-INASE database. Five malting barley varieties (INIA Arrayán, INIA Osiris, Fana, Danielle, and Nahara) were considered, using records of sowing date, flowering, and physiological maturity. From these data, the variables days to flowering and days to physiological maturity were generated and modeled using linear mixed models, considering variety, sowing date, and growing season as random effects. This procedure allowed the generation of diagnostic plots to compare observed and predicted values, as well as to analyze the distribution of residuals. To apply the fitted models, a database provided by the company MOSA was also used, corresponding to commercial malting barley fields, which enabled the prediction of days to flowering and physiological maturity. To ensure spatial representativeness, fields located within the range defined by the La Estanzuela and EEMAC locations, which were used for model fitting, were selected. Based on the phenological models, the dates of flowering, physiological maturity, and harvest (considered ten days after maturity) were reconstructed. The grain filling period was subdivided into three phases (p1, p2, and p3) to characterize critical stages in quality determination. Climatic data were obtained from the NASA POWER database, considering daily mean temperature and corrected total precipitation, and accumulated values and averages were calculated for the intervals flowering–p1, p1–p2, p2–physiological maturity, and maturity–harvest. Finally, varietal, spatial, phenological, and climatic data were integrated into an expanded database, which was used in statistical analyses to evaluate the influence of environmental conditions on crop performance. The results showed a good model fit and calibration, with high agreement between observed and predicted values, supporting its reliability. This enabled its application to the malting database to analyze the relationship between environment and grain quality under real production conditions. It was found that Falling Number is particularly sensitive during the first third of grain filling, influenced by precipitation and temperature, while grain size is significantly related to temperature toward the end of grain filling and prior to harvest. Additionally, an effect of geographic location on both attributes was observed. In summary, the integration of phenological, climatic, and varietal data provides useful evidence to reduce rejection risks and guide management decisions at the production level.

Keywords: malting barley, grain quality, Falling Number, grain size, environmental conditions

1 INTRODUCCIÓN

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) es el segundo cultivo de invierno en importancia a nivel nacional (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2025). En términos de área sembrada, se ubica en segunda posición por debajo del trigo; sin embargo, ambas presentan valores muy similares de rendimiento promedio a nivel nacional (DIEA, 2025). La producción de cebada se concentra en la región litoral oeste y centro del país (DIEA, 2025), donde las condiciones edáficas son las más adecuadas para el desarrollo de la actividad agrícola, además de contar con una ubicación estratégica por la cercanía a los principales puertos del país.

En el mundo, aproximadamente el 73 % de la producción de cebada se destina a la alimentación animal como grano forrajero, el 20 % se utiliza como cebada maltera, mientras que el resto se orienta al consumo humano y a otros usos industriales (Cattáneo, 2011). En Uruguay en cambio, más del 90% de la cebada cervecera que se siembra se destina a la exportación como cebada malteada (Galante, 2005). Esto genera un especial interés en materia de calidad industrial ya que Uruguay, al producir pequeños volúmenes con relación al mercado mundial, una buena garantía para el país, los productores y la industria es mejorar desde esa perspectiva (Arias, 1991).

La siembra de cebada cervecera a nivel nacional se lleva a cabo bajo la modalidad de contrato de producción y, salvo en años climáticamente adversos, una elevada proporción de la producción es recibida por las industrias con el fin de maltear la materia prima y exportar el producto final, la malta. Esto determina que exista un control estricto sobre el área de siembra y una marcada preocupación por asegurar la calidad, tanto en la producción primaria como en la fase industrial, lo que requiere máximos cuidados durante el proceso productivo (Díaz Lago, 2013). De ello depende qué porcentaje de la producción cumple con la calidad adecuada y es aceptado por las malterías, y qué fracción resulta rechazada por incumplimiento de los estándares de calidad, teniendo otro destino.

Entre los parámetros de calidad exigidos por la industria, los de mayor relevancia son la proteína, la humedad de grano, el Falling Number y el calibre del mismo. En el presente trabajo, la importancia va a recaer sobre los dos últimamente mencionados.

El objetivo general del trabajo es estudiar el efecto del ambiente sobre los parámetros de comercialización de variedades comerciales de cebada cervecera.

Los objetivos específicos son:

- 1) Analizar el efecto de las precipitaciones y la temperatura durante el llenado de grano sobre el Falling Number y el tamaño de grano (calibre).
- 2) Identificar el periodo de mayor susceptibilidad durante el llenado de grano.
- 3) Identificar diferencias entre los cultivares sembrados a nivel de producción.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cebada cervecera

2.1.1 Importancia del cultivo

La cebada cervecera (*Hordeum vulgare* L.) es una especie monocotiledónea anual de ciclo invernal, perteneciente a la familia Poaceae. Es originaria de la denominada Media Luna Fértil, ubicada en el Medio Oriente y el norte de África, región que actualmente corresponde a países como Siria, Turquía, Israel y Egipto, entre otros. Se trata de una de las plantas cultivadas más antiguas. La cebada cultivada y su forma silvestre (*Hordeum vulgare* ssp. *vulgare* y *Hordeum vulgare* ssp. *spontaneum*, respectivamente) son actualmente consideradas subespecies de una misma especie, domesticada junto con el trigo. Cervera Ral y Reixach Coll (2005) señalan que, desde sus inicios, la cebada ya era utilizada por los egipcios en la elaboración de cerveza.

Su importancia se basa en que ha sido un cultivo esencial para la alimentación humana, animal y la producción de cerveza. Esto se evidencia en la superficie cosechada a nivel mundial, que ocupa el quinto lugar entre los demás cereales y oleaginosos (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], s.f.) (Descargar datos → Regiones: Mundo → Elementos: Área cosechada → Productos: arroz, cebada, trigo, colza, maíz, sorgo y soja → Años: 2023 y 2024 → Salida de los datos: Tabla dinámica → Mostrar datos/Descargar datos). En Uruguay, tomando en cuenta únicamente a los cultivos de invierno, el cultivo de cebada se encuentra en segundo lugar de importancia por detrás del trigo con una superficie sembrada promedio, correspondientes a las últimas 8 zafas agrícolas, de 201.111 hectáreas, contra las 252.700 hectáreas ocupadas por el trigo (DIEA, 2025). El área sembrada de cebada depende directamente de la capacidad de malteo de las industrias y de la producción obtenida en la zafa anterior. En aquellas campañas en que la producción supera la capacidad de las malterías, el stock excedente permanece para ser malteado en la siguiente zafa y, en consecuencia, la siembra de ese año tiende a ser menor, con el fin de no exceder nuevamente la capacidad industrial. Es por ello que el área destinada al cultivo de cebada presenta una menor fluctuación en comparación con la del trigo. Con respecto al rendimiento en los últimos años agrícolas, la tendencia entre ambos cultivos ha sido similar, tendiendo a un aumento y siendo similares entre sí, con la excepción de la última zafa registrada (2024/2025) donde ambos cultivos sufrieron una leve caída en estos valores. Concretamente, en el caso de la cebada cervecera, el rendimiento promedio nacional alcanzó los 4.318 kilogramos por hectárea en la zafa 2024/2025, lo que representa una reducción del 10 % respecto al ejercicio anterior (DIEA, 2025).

2.1.2 Situación actual: producción y calidad

Díaz y Rava (2024) mencionan que el año 2024 estuvo caracterizado por un total abastecimiento de la industria con materia prima nacional, resultante de un récord en el área cosechada y de condiciones climáticas provechosas durante el desarrollo del cultivo, no obstante, se registró un 28 % de rechazo por parte de las malterías debido a incumplimientos en los parámetros de calidad, lo que refleja que existe un margen de mejora desde ese aspecto. La calidad no estuvo a la par del volumen producido, principalmente por problemas en el calibre del grano, llevando a que una gran fracción

de lo producido no estuviera al alcance de cumplir con los estándares requeridos para el malteo, obligando a las malterías a ser más flexibles en las condiciones de recibo (“Récor ds y desafíos”, 2025). Con una producción neta de 1.107.519 toneladas, el porcentaje de rechazo fue equivalente a 310.100 toneladas de grano. Considerando el precio por tonelada puesta en planta, se estimó una pérdida económica de U\$S 71,6 millones (Díaz & Rava, 2024). Teniendo en cuenta la magnitud de las pérdidas, los productores, en casos de rechazo, se ven obligados a recurrir a mercados de menor valor, como el forrajero.

2.1.3 Mercados e industrias malteras

La industria maltera uruguaya se concentra en dos grandes empresas, Ambev y MOSA, que en la zafra 23/24 comercializaron el 58 % y 42 % del volumen total de cebada, respectivamente. El principal producto de exportación resultante de esta actividad es la malta.

Con respecto a los mercados, el 89 % del volumen total exportado de malta tuvo como destino principal Brasil, manteniendo el predominio habitual. Paraguay se ubicó como segundo destino, recibiendo el 6 %, mientras que Bolivia, Perú y Chile acumularon en conjunto el 5 % restante de la malta exportada (Díaz & Rava, 2024).

La cebada es un cultivo principalmente de exportación requiriendo altos estándares de calidad, siendo objeto de altas exigencias por parte de los compradores (Castro, 2017). Debido a esto y a que el cultivo fue pasando de situaciones marginales a tener mayor participación en el sistema agrícola, accediendo a mejores situaciones de producción y significando cambios en su forma de producción, fue que impulsó el interés en el campo de la investigación y desarrollo del cultivo (Castro, 2017). Tal es así que, en 1992 se crea la Mesa Nacional de Entidades de Cebada Cervecera (MNECC), integrada por Facultad de Agronomía de la Universidad de la República, el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), el Instituto Nacional de Semillas (INASE) y las malterías nacionales antes mencionadas (Castro, 2017; Díaz Lago, 2013). La misma tiene como propósito coordinar e intensificar la investigación en lo que al cultivo refiere (Castro, 2017; Díaz Lago, 2013).

INIA ha desarrollado nuevos cultivares de cebada cervecera, y Facultad de Agronomía se ha centrado en la generación de información relacionada al manejo (Castro, 2017). En lo que refiere a la calidad maltera, el LATU es el principal encargado en generar dicha información, de suma importancia para seleccionar líneas con la calidad industrial requerida por los mercados importadores (Castro, 2017). Para Díaz Lago y Germán (2005) “la MNECC generó una fuerte interacción e integración entre la investigación aplicada, la producción y la industria, identificando las áreas de investigación a priorizar para levantar las principales restricciones tecnológicas al desarrollo del cultivo” (p. 12).

INASE, a través de la Evaluación Nacional de Cultivares (ENC), tiene como objetivo brindar información objetiva y de calidad sobre el comportamiento de los cultivares, permitiendo a técnicos y productores realizar una elección basada en datos confiables. Asimismo, constituye un requisito para la inscripción en el Registro Nacional de Cultivares (Verocai & Castro, 2024). Contar con esta información es fundamental, ya que la selección del cultivar puede influir significativamente sobre el resultado final. En

un estudio realizado por Ceretta et al. (2000), se observaron efectos de hasta un 21 %, explicados en un 7 % por el efecto directo del cultivar y en un 14 % por las interacciones que lo involucran. En el caso de la cebada, la ENC se encuentra fuertemente impulsada por la MNECC y, en este marco, todos los actores consideran relevante disponer de la mayor información posible sobre los materiales a comercializar (Verocai & Castro, 2024).

2.1.4 Caracterización varietal según origen

Las variedades de origen nacional son desarrolladas por el programa de mejoramiento genético de cebada cervecera de INIA La Estanzuela. Se caracterizan por tener una buena adaptación a las condiciones agroclimáticas presentes en el país, otorgándoles buenos comportamientos en lo que respecta al perfil sanitario, con buena tolerancia a enfermedades foliares, que contribuye a su desempeño agronómico y a reducir riesgos durante el ciclo del cultivo. Las variedades de origen europeo generalmente presentan rendimientos de grano intermedios a altos y se caracterizan por no manifestar respuesta al fotoperíodo. En cuanto a calidad, ofrecen buenos calibres y, en general, niveles de proteína levemente inferiores a los observados en las variedades nacionales (Instituto Nacional de Semillas [INASE] & Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], 2024).

Dado que en el presente trabajo final de grado se trabajará con una base de datos proporcionada por Maltería Oriental S.A., se describirán únicamente las variedades que dicha empresa comercializa. En este sentido, se caracterizarán brevemente las variedades de origen nacional INIA Arrayán e INIA Osiris. Por otra parte, las variedades de origen europeo consideradas en este trabajo son Fana, Nahara y Danielle.

2.1.4.1 Variedades de origen nacional

La variedad INIA Arrayán (CLE 233) es una de las pioneras en el desarrollo varietal nacional, inscrita en el Instituto Nacional de Semillas en el año 2006. Se caracteriza por su alta adaptabilidad y plasticidad a distintos ambientes, lo que permite su producción tanto en el norte como en el sur del país. Es de ciclo intermedio, con respuesta intermedia a alta al fotoperíodo y muy elevada capacidad de macollaje. Desde el punto de vista sanitario, presenta muy buen comportamiento frente a manchas foliares, aunque muestra alta susceptibilidad a roya de la hoja y oídio (Castro et al., s.f.). En cuanto a calidad, destaca por su elevada estabilidad en el porcentaje de calibre y una tendencia a contenido proteico intermedio.

INIA Osiris (CLE 307) es un cultivar más reciente, inscripto en el Instituto Nacional de Semillas en el año 2021. Se destaca por su alta sensibilidad al fotoperíodo y por presentar un ciclo intermedio a corto (INASE & INIA, 2024). Su producción se concentra principalmente en la zona norte del país. Al igual que otras variedades nacionales, Osiris muestra baja susceptibilidad a enfermedades foliares, en particular a mancha en red tipo red. Sin embargo, al igual que INIA Arrayán, presenta alta susceptibilidad a roya de la hoja (Castro et al., s.f.). En cuanto a calidad, se caracteriza por su estabilidad en el calibre y una tendencia a valores de proteína más elevados (INASE & INIA, 2024).

2.1.4.2 Variedades de origen europeo

La variedad Danielle presenta un rendimiento en grano de intermedio a alto, con elevada capacidad de macollaje y un ciclo de duración intermedia a larga. Desde el punto de vista sanitario, muestra buen comportamiento frente a roya de la hoja y oídio; sin embargo, es susceptible a manchas foliares y muy susceptible a ramularia, una condición común entre los cultivares de origen europeo (Castro et al., s.f.).

Otra de las variedades utilizadas en el país es Fana, también de origen europeo, con rendimiento en grano de intermedio a alto, menor capacidad de macollaje en comparación con Danielle y un ciclo intermedio, siendo una de las variedades de ciclo más corto dentro de su grupo. Se caracteriza por presentar altos porcentajes de granos con diámetro superior a 2,5 mm, lo que le confiere buena aptitud para el malteo y elevado extracto (Hoffman et al., 2019). Desde el punto de vista sanitario, muestra un comportamiento deficiente, con alta susceptibilidad a ramularia y escaldadura, y una susceptibilidad algo menor frente a ambos tipos de mancha en red y roya de la hoja (Castro et al., s.f.).

Por último, Nahara es la tercera variedad europea considerada. Se trata de una variedad de ciclo intermedio, de buen calibre, que destaca por su muy alto rendimiento en grano y excelente calidad industrial. Presenta elevada plasticidad, lo que le confiere la ventaja de poder ser sembrada en diversos ambientes y en un amplio rango de fechas de siembra (Hoffman et al., 2019). En el aspecto sanitario, muestra buen comportamiento frente a roya de la hoja y excelente resistencia al oídio, aunque presenta una susceptibilidad intermedia a alta frente a manchas foliares (Castro et al., s.f.).

2.1.5 Variedades comerciales de cebada cervecera: recambio varietal

El cultivo de cebada históricamente se ha caracterizado por tener una menor dinámica varietal al compararse con otras opciones agrícolas, esto debido a factores relacionados con su destino industrial. En primer lugar, la industria maltera exige un volumen mínimo, por lo tanto, para que una nueva variedad sea aceptada, la producción debe ser la suficiente para garantizar un abastecimiento continuo. En segundo lugar, es relevante para el proceso de malteo tener correctamente identificada a la variedad, que cumpla con los parámetros de calidad deseados, por ende, las malterías optan por variedades ya validadas por su comportamiento industrial. Cambiar de variedad implica riesgos técnicos y comerciales, que muchas veces las malterías no están dispuestas a correr (Castro et al., 2017).

Hasta comienzos de la última década, predominaban en Uruguay cultivares de origen nacional. Sin embargo, posteriormente ocurrió un marcado recambio varietal impulsado por un incremento en el área y la proporción sembrada con cultivares de origen europeo, los cuales superaron el 50 % del área sembrada en 2014 y 2015. Este proceso evidencia una tendencia sostenida hacia la incorporación de germoplasma de ese origen en la Evaluación Nacional de Cultivares (ENC) (Castro et al., 2017).

Dichos materiales han sido componentes cruciales en los programas de mejoramiento locales, al aportar calidad maltera y elevado potencial de rendimiento. No obstante, son materiales que han presentado ciertas limitantes en cuanto al largo de ciclo, clasificación del grano y aspectos vinculados a la sanidad (Castro et al., 2017). En

cuanto a la fenología, los cultivares de origen europeo presentan una duración de ciclo más largo en comparación con los cultivares locales.

En ensayos sin aplicación de fungicidas, las variedades europeas tienden a alcanzar rendimientos inferiores en comparación con el resto de los cultivares. Sin embargo, en experimentos con fungicidas dicha tendencia se revierte, evidenciando un elevado potencial de rendimiento. Esta diferencia se explica por la mayor susceptibilidad de dichos materiales al complejo de manchas foliares, lo que afecta negativamente el tamaño del grano en ausencia de control químico. Por el contrario, estos materiales suelen ser más resistentes a roya de la hoja y oídio (Castro et al., 2017).

A su vez, es relevante aclarar que los materiales de origen europeo han mostrado mayores potenciales de rendimiento en el sur del país (Castro et al., 2017). Es sabido que la temperatura ambiental en esta región suele ser inferior respecto al norte, lo que conlleva a una extensión del ciclo vegetativo del cultivo, mayor duración de la etapa de macollaje, que va a determinar un mayor número de macollos por planta y fertilidad de los mismos. Esto permite generar mayor área foliar, proporcionándole al cultivo la capacidad de interceptar más radiación solar durante dicho período, lo cual va a definir en gran parte el crecimiento y el rendimiento a ser obtenido por el mismo. Además, las temperaturas más bajas limitan la competencia de plagas y enfermedades (Miralles et al., 2011, 2014).

2.1.6 Calidad

Dado que el principal destino del grano de cebada es la industria maltera, resulta de especial interés su calidad industrial. La importancia de este aspecto se intensifica porque, a pesar de los buenos volúmenes producidos en los últimos años a nivel nacional, el porcentaje de rechazo por parte de las malterías continúa siendo elevado. En consecuencia, el desafío del sector es mejorar la calidad del grano con el fin de reducir los niveles de rechazo y sostener la competitividad en el mercado (“Récords y desafíos”, 2025).

El concepto de calidad en la cebada cervecera es amplio y presenta una notable variabilidad, ya que depende tanto del proceso de elaboración de la cerveza como del tipo de producto final, los cuales varían significativamente entre países. Esta diversidad de enfoques y exigencias industriales hace que la definición de calidad resulte compleja y sujeta a múltiples interpretaciones (Arias, 1991).

En lo referente a la calidad de la cebada, es posible distinguir tres dimensiones fundamentales: calidad comercial, calidad maltera y calidad cervecera (Arias, 1991). Dentro de la calidad comercial, Arias (1991) distingue dos tipos de características, las objetivas y subjetivas, relacionadas en mayor o menor grado con el comportamiento que tendrá la cebada en la producción de malta y son definidas en base a las normas de comercialización.

Los caracteres subjetivos son aquellos que su evaluación depende de la percepción, interpretación o criterio del observador. Dentro de estos figuran: color, brillo, forma del grano, finura de las cascarras, dureza, entre otros (Arias, 1991). Considerando el objetivo del presente trabajo, dichos aspectos no son de gran relevancia para su desarrollo.

Por otro lado, están los caracteres objetivos tales como: humedad, porcentaje de proteína, capacidad germinativa, pureza varietal, porcentaje de granos quebrados, pelados y dañados, semillas de otras especies (i.e. malezas), lo que refiere al calibre, etcétera (Arias, 1991).

En Uruguay no hay normas oficiales y estas son establecidas por las industrias malterías, que tienen como objetivo fijar los estándares de calidad que definen las bases y tolerancias de recibo establecidas para dichas características (Arias, 1991).

En la normativa uruguaya de comercialización de granos, se entiende por “base de comercialización” a la calidad que, para cada grano, se define como tal en las normas específicas de calidad, mientras que “tolerancia de recibo” refiere a la calidad mínima que el comprador está obligado a recibir, según lo establecido en los artículos 5 y 6 del Decreto n° 708/978, respectivamente (Decreto n° 708/978, 1978, arts. 5–6).

Los parámetros de recibo de la cebada cervecera establecen las condiciones mínimas de calidad para su comercialización. En este sentido, el grano debe cumplir con límites específicos de humedad, con una base del 13% y un máximo de 18% que implica un costo de secado; además, se exige un alto poder germinativo, con una base del 98% y una tolerancia mínima del 95%. El Falling Number debe ser igual o superior a 240 segundos, mientras que el contenido de deoxinivalenol (DON) no puede superar las 5.000 ppb. Asimismo, se requiere una pureza genética mínima del 95% y un contenido de proteína comprendido entre 9,7% y 12,5%, con posibles deducciones por fuera de este rango. En cuanto al calibre, se establece un mínimo del 85% para granos de primera y segunda clase, y un máximo del 10% para granos de cuarta clase. Finalmente, se limita el contenido de granos quebrados, dañados y material extraño a una base del 2%, con un máximo total del 8%, aplicándose descuentos en el precio del grano en caso de incumplimiento (Maltería Oriental, comunicación personal, 2026).

2.1.6.1 Humedad

El porcentaje de humedad que presenta el grano de cebada es de suma importancia para la comercialización, debido a que se relaciona directamente con la capacidad de almacenamiento y posterior conservación de los lotes (Arias, 1991). El aumento de humedad en los granos reduce el tiempo seguro de almacenamiento con una elevada capacidad germinativa (Savin & Aguinaga, 2011). Si se requiere almacenar el grano por un período corto, se recomienda una humedad del 13 %. En cambio, si el objetivo es conservar la viabilidad de la cebada durante un plazo más prolongado, la humedad debe reducirse a valores cercanos al 12 %. Esta condición permite mantener un poder germinativo superior al 95 % por más de un año, lo cual resulta óptimo para un correcto proceso de malteado. En los casos en que se exceden estos valores de humedad, los compradores se ven obligados a realizar un secado adicional para garantizar el porcentaje de germinación adecuado (Arias, 1991). Además, niveles elevados de humedad pueden favorecer el desarrollo de hongos capaces de producir micotoxinas. Si bien la mayoría de estas toxinas se destruyen durante el proceso de malteado y la posterior elaboración de cerveza, el riesgo asociado sigue siendo relevante y merece especial atención (Savin & Aguinaga, 2011). El secado del grano es una práctica que requiere un manejo adecuado y precauciones específicas para preservar la viabilidad del embrión (Savin & Aguinaga, 2011).

2.1.6.2 Porcentaje de proteína

La calidad de la malta está fuertemente influenciada por el contenido de sustancias nitrogenadas, siendo que desviaciones por exceso o defecto en el nivel de proteína pueden comprometer su desempeño industrial (Arias, 1991). Por este motivo, las malterías establecen un rango específico dentro del cual debe mantenerse el contenido proteico. Cuando se supera dicho intervalo, los porcentajes elevados de proteína reducen el contenido de almidón en el endosperma debido al balance almidón/proteína; genera que se restrinja la hidrólisis del almidón. En otras palabras, se pierde extracto durante la maceración en la elaboración de cerveza, ya que los gránulos de este carbohidrato quedan recubiertos por una matriz proteica que no logra descomponerse completamente durante el proceso de malteo (MacGregor, 1996). Además, pueden surgir dificultades relacionadas con ciertas características organolépticas.

Por otro lado, niveles bajos de proteína afectan la capacidad enzimática de la malta, dado que las enzimas responsables de la transformación del almidón son de naturaleza proteica. Esto también limita la provisión de aminoácidos esenciales para la nutrición de las levaduras durante la fermentación. Como consecuencia, las levaduras deben sintetizar internamente los compuestos faltantes, generando subproductos metabólicos que pueden alterar el sabor y el aroma de la cerveza (Hough, 1990).

2.1.6.3 Pureza varietal

Para lograr un malteo eficiente, es fundamental trabajar con lotes de alta pureza varietal, ya que distintos genotipos presentan comportamientos diferenciados durante el proceso, especialmente en lo que respecta a la absorción de agua durante el remojo. Esta variabilidad provoca que los granos no germinen de manera simultánea, lo cual atenta contra el objetivo de obtener un malteado homogéneo (Arias, 1991). El primer paso para homogeneizar la germinación es obtener lotes genotípicamente homogéneos, debido a que el proceso industrial es establecido en función del comportamiento de cada cultivar (Savin & Aguinaga, 2011).

2.1.6.4 Calibre

El calibre o clasificación por tamaño se determina mediante zarandas o tamices de distintos diámetros (2,8 mm, 2,5 mm y 2,2 mm). Esta clasificación se fundamenta en la necesidad de remojar y germinar por separado los granos que superan los 2,5 mm, ya que presentan un comportamiento distinto respecto a la fracción comprendida entre los tamices de 2,5 y 2,2 mm. Por presentar un mismo comportamiento, los granos de calibre superior a 2,8 mm se agrupan con la fracción de 2,5 a 2,8 mm para ser malteados en conjunto, conformando la denominada fracción “primera + segunda”. Los granos de calibre superior a 2,5 mm presentan un mayor contenido de almidón, permitiendo que puedan ser extraídas mayores cantidades de sustancias solubles. Esta es la causa por la cual dicha fracción es la exportable como cebada malteada. En contraparte, la fracción comprendida entre 2,2 y 2,5 mm suele presentar un mayor porcentaje proteico y un menor contenido de extracto. Por esta razón, en Uruguay los granos de este calibre se destinan principalmente a la elaboración de malta para el mercado interno. Los granos que no alcanzan un calibre superior a 2,2 mm presentan un contenido muy bajo de almidón, siendo excluidos del proceso de malteo y son destinados a su uso como

cebada forrajera para alimentación animal a un precio menor (Arias, 1991; Savin & Aguinaga, 2011).

2.1.6.5 Capacidad germinativa

El poder germinativo del grano es una característica esencial en la cebada cervecera, ya que resulta fundamental que todos los granos germinen durante el proceso de malteo. Este proceso biológico debe ser lo más homogéneo y rápido posible, dado que es necesario para activar la producción de enzimas en la capa de aleurona, responsables de transformar el almidón presente en el endosperma. En cambio, los granos que no logran germinar o lo hacen de forma más lenta se consideran granos adjuntos, con mayor probabilidad de ser afectados por microorganismos. Esto afecta negativamente la calidad de la malta producida y, en consecuencia, deprecia el producto final. Por ello, es imprescindible que los lotes recibidos por las malterías presenten un alto poder germinativo (Arias, 1991).

El almacenamiento poscosecha desempeña un papel fundamental en la preservación de la viabilidad y del poder germinativo del grano. Su objetivo principal es conservar, durante el período de almacenamiento, las cualidades físicas y fisiológicas de la materia prima, manteniendo su aptitud para el uso y procesamiento industrial. (Hugo & Godiño, 2000). Otro factor que puede comprometer el potencial germinativo de los granos es la presencia de hongos, principalmente los denominados hongos de poscosecha, los cuales afectan la calidad industrial, disminuyen el porcentaje de germinación y generan contaminación del grano con sustancias tóxicas (Stewart, 1996).

La germinación puede verse afectada por el proceso de dormición, mecanismo que restringe el rango de condiciones en las cuales el grano es capaz de germinar. Esta situación resulta indeseable para la industria maltera cuando la dormición es prolongada. Tal es el caso, que las malterías consideran ventajoso un bajo nivel de dormición a cosecha. Sin embargo, niveles muy bajos de dormición pueden favorecer, en años con excesivas precipitaciones durante el llenado del grano, la aparición de fenómenos de pregerminado o brotado precosecha (Arias, 1991; Savin & Aguinaga, 2011).

Con el objetivo de detectar el brotado precosecha o el pregerminado, las malterías aplican distintos métodos que permiten evaluar la actividad presente en el grano y, a partir de ello, inferir si dichos fenómenos ocurrieron. Entre los más utilizados se encuentran el método “Vitascope” y el método “Hagberg Falling Number”. En este trabajo nos centraremos únicamente en el segundo, dado que uno de los objetivos es relacionar las condiciones ambientales con los valores de Falling Number.

2.1.6.6 Hagberg Falling Number

El Falling Number (FN) es un parámetro de calidad que evalúa la actividad de las enzimas alfa-amilasas presentes en el grano, mediante un ensayo de viscosidad. El procedimiento consiste en preparar una suspensión con grano entero o harina y medir el tiempo que demora un émbolo en atravesar dicha mezcla. Los valores van desde 60 segundos para granos con un daño intenso por brotado, hasta 500 segundos o más para los granos que se encuentran en excelente calidad (Gualano et al., 2011).

Cuando el almidón se encuentra intacto, la masa es más viscosa y el émbolo tarda más tiempo en descender, lo que se traduce en valores elevados de FN. En

cambio, si la actividad de la alfa-amilasas es alta, el almidón estará más degradado, reduciendo la viscosidad de la mezcla y permitiendo que el émbolo la atravesase en menor tiempo (Perten, 1964).

Por lo tanto, cuanto mayor sea la actividad enzimática de las amilasas, más bajo será el valor de Falling Number. La alfa-amilasa se sintetiza en el grano durante el proceso de germinación. Por lo tanto, aquellos granos que, bajo condiciones ambientales favorables, han iniciado la germinación antes de la cosecha presentarán niveles más elevados de esta enzima, en comparación con aquellos cuya conservación post madurez fisiológica se vio favorecida por condiciones ambientales más estables (Perten, 1964).

2.1.7 Periodo de determinación de los parámetros de calidad

La fenología es un factor clave en cómo se adaptan los cultivos a las condiciones del ambiente y prácticas de manejo. Esta desempeña un papel fundamental en los cultivos, ya que funciona como una escala biológica de tiempo que regula, de forma directa o indirecta, procesos clave como la senescencia, el llenado de grano y la fotosíntesis (Mirschel et al., 2005).

La importancia del período comprendido entre la antesis y la madurez fisiológica, denominado período de llenado de grano, radica en su influencia sobre la determinación de la calidad de los granos, debido a los procesos fisiológicos que ocurren durante esta etapa. En dicho período se termina de definir cuántas flores fecundadas darán origen a granos, así como también el tamaño y peso final de estos (Brocklehurst, 1977).

Justamente, en los cultivos de cebada destinados a la producción de malta cervecera, este período resulta determinante, ya que en él se definen las características químicas, estructurales y fisiológicas del grano que inciden directamente en su calidad para el proceso de malteado (Savin & Aguinaga, 2011).

En Uruguay el cultivo de cebada se desarrolla entre los meses de junio a noviembre/diciembre, siendo un periodo más corto en comparación con trigo, lo que determina que la fecha de siembra tenga un efecto muy significativo sobre el rendimiento y la calidad, al establecer las condiciones climáticas en las cuales se va a desarrollar el cultivo. Si la fecha de siembra se retrasa, se ubica al periodo de llenado de grano en condiciones de temperatura desfavorablemente altas que determinan menores rendimientos y problemas de calidad de grano. Por otro lado, si se adelanta la fecha de siembra, el periodo crítico del desarrollo del cultivo se ubica en una fecha donde aún hay riesgo de daños por heladas, lo que también atenta sobre los parámetros antes mencionados (Arbelbide, 1999).

La calidad del grano de cebada responde de manera sensible a las condiciones ambientales, especialmente a la temperatura y las precipitaciones. En este contexto, la temperatura se posiciona como el principal factor determinante en la variabilidad interanual de la intensidad de dormición, lo cual influye indirectamente en la ocurrencia de brotado precosecha (BPC) y, en consecuencia, sobre el valor de Falling Number (Gualano et al., 2011).

Reconocer los momentos fenológicos en los que los factores ambientales inciden de manera específica sobre las características del grano que determinan su

calidad maltera permitiría comprender con mayor precisión cómo se determina dicha calidad en condiciones de campo (Otero et al., 2021).

Según Rodríguez et al. (2001), existe una relación significativa entre la temperatura media del aire registrada durante un intervalo específico del llenado de grano y el grado de dormición observado en los granos en una fase intermedia entre la madurez fisiológica y la madurez de cosecha. La mayor correlación se observó entre la temperatura media registrada en el rango térmico de 300 a 350 °Cd durante el llenado de grano y el índice de germinación evaluado entre los 10 y 14 días posteriores a la madurez fisiológica (Rodríguez et al., 2001). Esto indica que temperaturas elevadas durante dicha ventana de sensibilidad se asociaron con niveles reducidos de dormición (es decir, mayor índice germinativo) en la etapa posterior a la madurez fisiológica, lo que conlleva una mayor susceptibilidad al BPC (Rodríguez et al., 2001).

2.1.8 Factores que afectan la calidad del grano

2.1.8.1 Genético

A nivel nacional, diversos antecedentes han demostrado la influencia del componente genético sobre la calidad maltera en cebada cervecera. En este contexto, Castro et al. (2013) identificaron regiones genómicas asociadas a caracteres vinculados a la calidad en germoplasma local.

El componente genético cumple un rol determinante en la calidad y adaptación de la cebada cervecera. En Uruguay, el Programa de Mejoramiento Genético de INIA busca combinar alto rendimiento y adecuada calidad maltera con buena adaptación a las condiciones locales. En este sentido, genes asociados a la respuesta al fotoperíodo y a la vernalización influyen sobre la fenología del cultivo y, en consecuencia, sobre su comportamiento agronómico e industrial (Teigeira et al., 2022). Además de los aspectos adaptativos y fenológicos, el componente genético también determina características directamente asociadas a la calidad maltera, observándose diferencias entre genotipos para variables como contenido proteico, extracto de malta y poder diastásico (Cammarota Ricco, 2021).

En esta línea, Verocai Britos (2021) reportó diferencias significativas entre genotipos para variables asociadas al rendimiento y la calidad industrial, destacando la importancia de la interacción entre el componente genético y las condiciones ambientales en la expresión de dichos caracteres.

Por otra parte, la calidad del grano de cebada se ve comprometida por los eventos de pregerminado y brotado precosecha, cuya ocurrencia depende en gran medida del grado de latencia que presenta cada cultivar, determinado por su genotipo (Rodríguez et al., 2001). En este sentido, la dormición del grano constituye el principal mecanismo genético que regula la susceptibilidad a estos eventos. Esta base genética, al modular la duración de la latencia, impacta directamente en parámetros de calidad maltera como el Falling Number, el calibre y el extracto, condicionando la aptitud industrial del grano.

Asimismo, diversos autores han señalado que temperaturas superiores a las óptimas durante el llenado de grano pueden generar reducciones en el peso del grano. Esta respuesta está modulada por el factor genético, ya que existen genotipos con

mayor grado de tolerancia que otros frente a los efectos de las temperaturas elevadas sobre el peso de los granos (Passarella et al., 2002).

2.1.8.1.1 Dormición de los granos

La dormición de los granos es un mecanismo fisiológico adaptativo presente en la mayoría de las especies vegetales y constituye un rasgo clave para su supervivencia. Su función principal es impedir la germinación inmediata luego de la madurez fisiológica, evitando que esta ocurra bajo condiciones ambientales desfavorables. En especies cultivadas, la reducción o pérdida de dormición representó uno de los procesos fundamentales durante la domesticación (Bewley, 1997; Finch-Savage & Leubner-Metzger, 2006).

Se entiende por dormición a una condición inherente de la semilla que impide o restringe la germinación, incluso cuando el ambiente ofrece condiciones favorables para ello. Un lote de semillas dormidas presentará un bajo o nulo nivel de germinación bajo condiciones de humedad y temperatura que por lo general son propicias para que se dé la germinación en semillas que no están dormidas (Gualano et al., 2011).

Según la especie, la dormición puede clasificarse como morfológica, física o fisiológica, e incluso manifestarse como una combinación de estas. La dormición morfológica se da cuando el embrión aún se encuentra en un estado inmaduro, por lo cual no es capaz de crecer y desarrollarse; la física se debe al impedimento del ingreso de agua al interior de la semilla debido a la presencia de las cubiertas impermeables. Por último, la dormición fisiológica es la clase más común y refiere a mecanismos internos que inhiben el proceso germinativo. Esta última involucra la acción de fitohormonas que interfieren en el potencial de crecimiento del embrión y/o en la resistencia ejercida por los tejidos que se oponen a su expansión, generando un bloqueo en el crecimiento del embrión incluso cuando la semilla se encuentra hidratada (Gualano et al., 2011).

La dormición puede verse afectada por múltiples estímulos ambientales. Factores como la alternancia térmica, la disponibilidad de luz, la exposición al frío y la humedad contribuyen a reducir el nivel de dormición, favoreciendo la activación del proceso germinativo en diversas especies (Gualano et al., 2011).

La variabilidad en los niveles de dormición presentes en una población de semillas favorece una distribución escalonada del proceso germinativo, tanto temporal como espacialmente (Benech-Arnold et al., 2000; Bewley & Black, 1994). Tal es el grado de variabilidad que, algunas semillas pueden presentar una dormición prolongada, mientras que otras manifiestan una pérdida precoz de esta condición, pudiendo generar diferentes inconvenientes asociados con la industrialización de los granos cosechados (Gualano et al., 2011).

En lo que respecta a la persistencia de la dormición en los granos cosechados, esta puede representar un problema cuando se requiere que germinen inmediatamente después de la cosecha (Gualano et al., 2011). Dado que el proceso de malteado depende de la germinación del grano, resulta ventajoso para las malterías disponer de lotes con bajo nivel de dormición, permitiendo evitar los costos implicados en la remoción química de la dormición, o los costos y el deterioro que derivan del almacenamiento necesario hasta que las semillas obtengan la capacidad potencial de germinar (Benech-Arnold, 2004).

La demanda de semillas capaces de germinar de forma inmediata o poco tiempo después de la cosecha ha favorecido una presión de selección hacia el desarrollo de genotipos que presentan niveles de dormición muy reducidos al momento de la recolección. Sin embargo, bajos niveles de dormición pueden resultar problemáticos cuando ocurren precipitaciones durante las etapas previas a la cosecha, ya que estas condiciones pueden desencadenar la germinación del grano en el campo (Benech-Arnold, 2001, como se cita en Gualano & Benech-Arnold, 2009). En caso de que las condiciones de humedad se mantengan durante un período prolongado, no solo se produce la germinación del grano, sino que también se inicia el crecimiento de la radícula fuera de las cubiertas seminales. En esta etapa, el embrión pierde su tolerancia a la desecación, dando lugar a un proceso posgerminativo conocido como brotado precosecha (BPC) (Gualano et al., 2011). Ambos fenómenos, tanto el brotado como el pregerminado, afectan negativamente la calidad de los granos destinados al malteado. Sin embargo, el BPC ocasiona los mayores daños, ya que el grano pierde su aptitud para ser malteado.

La industria maltera tiene una baja tolerancia sobre la presencia de granos brotados, por lo cual este problema reduce el grado comercial del lote (Gualano et al., 2011). Por estos motivos, se plantea un compromiso entre la necesidad de contar con granos con alto nivel de dormición hasta la cosecha y la exigencia de que, una vez cosechados, pierdan rápidamente la dormición. Esta dualidad ha llevado a que los cultivares de cebada más utilizados actualmente presenten niveles intermedios de dormición (Gualano et al., 2011). El nivel de dormición presente en los granos depende del genotipo y se encuentra fuertemente influenciado por el ambiente (Castro et al., 2010).

2.1.8.2 Ambiental

Como se mencionó anteriormente, los factores ambientales que influyen significativamente sobre la calidad del grano, y más específicamente sobre los atributos de interés para este trabajo (calibre y Falling Number), son la temperatura y las precipitaciones, particularmente durante el período de llenado de grano. Según Rodríguez et al. (2001), su efecto ocurre principalmente en un breve subperíodo hacia el final de dicha etapa.

Es aceptado universalmente que la temperatura se encarga de acelerar todos los procesos químicos, y de esta manera es que promueve el crecimiento vegetal (Arbelbide, 1999). Actúa directamente sobre la tasa de desarrollo del cultivo, siendo esta inversa a la duración de las distintas etapas ontogénicas. Por lo tanto, si la temperatura se incrementa, también lo hace la tasa de desarrollo e inversamente disminuye la duración de la etapa sometida a ese cambio en la temperatura. Este efecto funciona de la misma forma durante todo el ciclo del cultivo, desde la etapa de imbibición de la semilla hasta el momento de la cosecha (Miralles et al., 2011).

Las especies vegetales, en todos sus estados de desarrollo tienen las denominadas temperaturas cardinales, una temperatura mínima por debajo de la cual la planta no se desarrolla, un rango de temperaturas óptimas a las cuales la planta se desarrolla a tasas máximas y la duración de la etapa es mínima, y una temperatura máxima por encima de la cual cesa el desarrollo del cultivo.

Para poder contemplar el efecto de la temperatura sobre el desarrollo y duración de las distintas etapas ontogénicas del cultivo, se debe llevar a unidades de tiempo térmico, que no es más que la sumatoria de la diferencia entre la temperatura media diaria y una temperatura base establecida para el cultivo (Miralles et al., 2011). De este modo, cada etapa del cultivo tiene fijada genéticamente una cantidad acumulada de grados días, es decir, grados de temperatura por encima de la temperatura base. Por lo tanto, si las temperaturas son mayores y por ende también lo es la diferencia entre la temperatura media diaria y la temperatura base, por día se van a acumular más grados, culminando la etapa en menor tiempo.

Como se ha establecido anteriormente, la etapa ontogénica en la que se determinan los atributos de calidad del grano de cebada es el llenado del grano. En la fase inicial de esta etapa ocurre la multiplicación de las células endospermáticas, que conforman el órgano de reserva del grano: el endosperma, fundamental para el malteo. Una vez fijado el número de células, el grano ingresa en la fase efectiva de llenado, caracterizada por la expansión celular y la acumulación de reservas (almidón, proteínas y β -glucanos) (Miralles et al., 2011, 2014). El tamaño del endosperma, y por ende del grano, depende tanto de la cantidad de células formadas como de la magnitud de las reservas acumuladas en ellas.

La proteína más abundante en el endosperma del grano es la hordeína, responsable de la correlación negativa entre el nivel de proteína total y el extracto. A medida que aumenta el contenido de nitrógeno en el grano, y por ende la proporción de hordeínas, disminuye el extracto, principalmente debido a una menor acumulación de almidón (Otero, 2022). Este fenómeno se relaciona estrechamente con la temperatura: Savin y Nicolas (1996) y Passarella et al. (2002) demostraron que las altas temperaturas durante el período de llenado de grano incrementan el porcentaje de nitrógeno y reducen la acumulación de almidón, lo que ocasiona una caída en el peso y calibre del grano.

Además, como toda etapa de desarrollo, el llenado está regulado por la temperatura. Cuando coincide con condiciones ambientales más cálidas, la tasa de llenado se incrementa, lo que acorta la duración de la etapa (Otero, 2022). En consecuencia, se reduce tanto la fase de división celular, resultando en un menor número de células endospermáticas, como la fase de acumulación de reservas. Este doble efecto determina un menor peso y calibre del grano (Miralles et al., 2014). Para la calidad maltera, ello implica granos de menor tamaño, con endospermas reducidos, menor contenido de almidón y, por lo tanto, una menor proporción de extracto soluble.

Otro factor ambiental que influye en la calidad maltera son las precipitaciones o el régimen hídrico, debido a su estrecha relación con el nivel de dormición presente en el grano. Este vínculo puede desencadenar los fenómenos de brotado precosecha o pregerminado y, en consecuencia, afectar los valores de Falling Number. Los granos, además de la dormición, pueden presentar sensibilidad al agua. Este fenómeno determina la capacidad que tienen los granos de germinar en condiciones de exceso hídrico (Benech-Arnold et al., 1999). Estos eventos incrementan la actividad enzimática dentro del grano, lo que conduce a la degradación del almidón y, en consecuencia, a una menor viscosidad de la suspensión utilizada en el ensayo de Falling Number. El resultado son valores subóptimos de este parámetro, que determinan una menor cantidad de extracto soluble, indeseable para el proceso de malteo (Bewley & Black, 1994; Otero, 2022; Rodríguez et al., 2001).

Además, los ambientes con exceso hídrico favorecen la incidencia de enfermedades fúngicas que, de manera directa o indirecta, pueden afectar la calidad del grano. Por el contrario, escenarios de déficit hídrico durante el llenado del grano alteran este proceso, resultando en calibres menores y en una reducción del peso de mil granos (PMG).

2.1.8.3 Manejo agronómico

El manejo agronómico refiere al conjunto de acciones implementadas para maximizar la captación de recursos por parte del cultivo y, al mismo tiempo, minimizar los riesgos de estrés, tanto bióticos como abióticos. De esta manera, se asegura un crecimiento y desarrollo óptimo de la planta, favoreciendo la expresión de su potencial productivo y de calidad.

Más allá de las condiciones genéticas intrínsecas a la variedad y de los factores ambientales, las decisiones tomadas en el campo determinan en gran medida la expresión de los atributos requeridos por la industria maltera. Entre las prácticas de manejo más relevantes se incluyen la elección de variedades, la fecha de siembra, el manejo de la fertilización, entre otras.

Con la elección del cultivar se logra definir la duración del ciclo del cultivo, su sensibilidad al fotoperiodo y su comportamiento frente a las principales enfermedades presentes a nivel nacional. Asimismo, se determina el potencial de rendimiento y las características de calidad del grano, incluyendo calibre, contenido de proteína y estabilidad del Falling Number. La selección adecuada del cultivar permite asegurar una mejor adaptación a las condiciones agroecológicas locales, optimizar el uso de recursos y responder a las exigencias de la industria maltera.

La elección de la fecha de siembra constituye un pilar fundamental debido a que esta práctica de manejo es llevada a cabo al inicio del ciclo del cultivo, sin posibilidad de ser modificada posteriormente (Abeledo et al., 2011). Dicha práctica de manejo determina principalmente a qué condiciones ambientales va a estar expuesto el cultivo y con qué eficiencia es capaz de utilizar los recursos (luz, agua y nutrientes) (Abeledo et al., 2011).

Las temperaturas medias y el fotoperiodo que experimenta el cultivo durante la estación de crecimiento determinan la duración de su ciclo. En este sentido, el productor puede utilizar la fecha de siembra como herramienta de manejo, ajustando el rango de temperaturas y fotoperiodos a los que se expone el cultivo a lo largo de su desarrollo, lo que condiciona su fenología y el rendimiento final (Abeledo et al., 2011).

La fecha de siembra va a determinar frente a qué condiciones térmicas se va a llevar a cabo el periodo de llenado de grano, determinante para definir ciertos parámetros de calidad. Es así que el retraso en la fecha de siembra hace que dicho periodo coincida con temperaturas medias más elevadas, las cuales podrían afectar negativamente a la calidad del grano (Abeledo et al., 2011).

Las siembras tardías generan ciclos hasta antesis relativamente más prolongados, retrasando el periodo de llenado de grano y exponiéndolo a temperaturas más elevadas, lo que resulta desfavorable para la determinación de la calidad del grano de cebada (Castro et al., 1997). Los principales efectos de estas condiciones son la

disminución del peso de los granos y el aumento de la concentración de proteínas en el grano (Passarella et al., 2002).

Otra variable a considerar al momento de decidir la fecha de siembra son las temperaturas máximas que superan el rango óptimo durante el periodo comprendido entre la antesis y la madurez fisiológica. Chowdhury y Wardlaw (1978) mencionaron que, para el caso de los cereales de invierno, temperaturas medias comprendidas entre los 15 y 18 °C maximizan el peso de los granos.

Los efectos sobre los atributos de calidad del grano no dependen únicamente de la magnitud de la temperatura, sino también de la duración de la exposición del cultivo a altas temperaturas y del momento en que estas ocurren dentro del periodo de llenado de grano (Abeledo et al., 2011). Savin y Nicolas (1999), determinaron que cuando el evento de altas temperaturas tiene lugar al inicio de dicho periodo, la reducción en el peso de los granos suele ser más marcada. Esto se traduce en una disminución del porcentaje de granos retenidos en la zaranda de primera más segunda, es decir, aquellos que permanecen por encima de la zaranda de 2,5 mm.

Como aspecto adicional, la respuesta de la calidad maltera frente a factores abióticos presenta una alta variabilidad entre genotipos (Passarella et al., 2002). En consecuencia, el efecto de la fecha de siembra sobre la calidad del cultivo depende en gran medida del cultivar utilizado y de la influencia que este ejerce sobre el peso y tamaño de los granos (Abeledo et al., 2011).

Otro manejo agronómico de suma importancia es la fertilización del cultivo. El rendimiento del cultivo puede verse afectado por diversas deficiencias nutricionales, por lo tanto, es necesaria la incorporación de nutrientes al suelo. Las deficiencias más comunes a nivel de chacra son de nitrógeno y fosforo, en menor medida de azufre e incluso ha habido casos de deficiencias de cloro. El agregado de nutrientes puede mejorar el rendimiento del cultivo, sin embargo, trae consigo implicancias tanto negativas como positivas sobre la calidad comercial del grano. En el caso de la cebada con destino de malta, obtener altos rendimientos es tan importante como producir granos con óptimos niveles de calidad. Por lo tanto, es de suma importancia realizar una fertilización que permita lograr buenos rendimientos y adecuada calidad en simultaneo (Prystupa & Ferraris, 2011).

Las deficiencias de N generan caídas en el rendimiento, explicadas por una disminución en el número de granos por unidad de superficie. Esto se debe a una menor cantidad de espigas por superficie y/o a un menor número de granos por espiga (Arisnabarreta & Miralles, 2006; Baethgen et al., 1995). En cambio, dichas deficiencias no suelen afectar el peso de los granos e incluso pueden generar un aumento, como parte de un mecanismo de compensación (Baethgen et al., 1995).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ajuste del modelo fenológico usando la base de datos de INIA INASE

Se trabajó con cinco variedades de cebada: INIA Osiris (CLE307), INIA Arrayán (CLE233), Fana, Danielle y Nahara. Para cada variedad se tomaron los datos de fecha de siembra, la fecha de floración, la fecha de madurez fisiológica (MF) y el año agrícola/zafra. A partir de estas fechas se calcularon dos variables de interés: días hasta floración y días hasta madurez fisiológica. Asimismo, se calculó el día juliano de siembra a partir de la fecha de siembra.

Para cada variable fenológica analizada, se eliminaron observaciones con valores faltantes. Posteriormente, se realizó una detección de valores atípicos (outliers) utilizando el criterio del rango intercuartílico (IQR). Se calcularon el primer cuartil (Q1), el tercer cuartil (Q3) y el rango intercuartílico ($IQR = Q3 - Q1$), y se excluyeron aquellas observaciones que se encontraban por debajo de $Q1 - 1.5 \cdot IQR$ o por encima de $Q3 + 1.5 \cdot IQR$.

3.2 Partición de los datos y validación del modelo

Se implementó una estrategia de validación mediante partición train/test dentro del mismo set de datos. Los datos depurados se dividieron en un conjunto de entrenamiento (75%) y un conjunto de validación (25%), realizando la partición de forma estratificada por variedad y mediante asignación aleatoria, con el fin de asegurar la representación de todas las variedades en ambos subconjuntos.

3.3 Modelo estadístico

Para el modelado de las variables fenológicas se ajustaron modelos lineales mixtos mediante el paquete *lme4* del software estadístico R. Para cada variable de respuesta (días hasta floración y días hasta madurez fisiológica) se ajustó el siguiente modelo general:

$$y_{ijk} = \mu + (1 \mid \text{Variedad}_i) + (1 \mid \text{DOY_siembra}_j) + (1 \mid \text{Año}_k) + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

- y_{ijk} representa la variable fenológica de interés,
- μ es la media general,
- Variedad, DOY de siembra y año se incluyeron como efectos aleatorios,
- ε_{ijk} corresponde al término de error residual.

La inclusión de estos efectos aleatorios tuvo como objetivo capturar la variabilidad asociada a diferencias genéticas, fechas de siembra y condiciones interanuales, sin imponer supuestos de efectos fijos sobre estas fuentes de variación.

Los modelos se ajustaron utilizando exclusivamente el conjunto de entrenamiento.

3.4 Evaluación del desempeño predictivo del modelo

El desempeño de los modelos se evaluó sobre el conjunto de validación. Se obtuvieron predicciones para cada observación del conjunto de prueba y se calcularon los residuos como la diferencia entre los valores observados y los predichos.

Se utilizaron las siguientes métricas para evaluar el desempeño predictivo:

- Error cuadrático medio (MSE)
- Raíz del error cuadrático medio (RMSE)
- Coeficiente de determinación (R^2), calculado como el cuadrado de la correlación entre valores observados y predichos.

Adicionalmente, se generaron gráficos de diagnóstico que incluyeron:

1. Valores observados vs. predichos,
2. Histogramas de residuos,
3. Residuos en función de los valores predichos,

con el fin de evaluar supuestos de homogeneidad de varianza y ausencia de patrones sistemáticos.

3.5 Base de datos independiente y preprocesamiento

Con el objetivo de aplicar los modelos fenológicos ajustados previamente a una base de datos independiente, se utilizó una base de datos adicional provista por la empresa MOSA, correspondiente a chacras comerciales de cebada cervecera de la zafra 2024. Esta base incluyó información sobre variedad, fecha de siembra y coordenadas geográficas de cada chacra (latitud y longitud), entre otras variables.

Se filtró la base para conservar únicamente las cinco variedades de interés: Osiris, Arrayan, Fana, Danielle y Nahara. A partir de la fecha de siembra se calculó el día juliano de siembra (DOY_siembra).

Además, la base de datos cuenta con el registro de los parámetros de calidad del grano recibido. Entre ellos se incluyen el calibre, el porcentaje de humedad, el contenido de proteína en el grano y el valor de la prueba de Falling Number. Estos parámetros permiten a la industria determinar si la cebada cosechada reúne las condiciones exigidas para su aceptación en el proceso de malteo, y en caso contrario es rechazada.

Las principales variables de respuesta consideradas en este trabajo fueron los días hasta floración, los días hasta madurez fisiológica, el Falling Number y el calibre comercial del grano. Las variables fenológicas fueron expresadas como el número de días transcurridos desde la fecha de siembra hasta la ocurrencia de cada estado fenológico correspondiente, utilizando inicialmente los registros incluidos en la base de datos INIA-INASE para el ajuste y validación del modelo fenológico. Una vez ajustado, dicho modelo fue utilizado para predecir los días hasta floración y hasta madurez fisiológica para las chacras incluidas en el análisis posterior.

Por otra parte, las variables de calidad industrial fueron obtenidas a partir de los registros proporcionados por la empresa MOSA para cada chacra evaluada. El calibre

comercial fue expresado como el porcentaje de granos retenidos sobre zaranda de 2,5 mm, mientras que el Falling Number, expresado en segundos, fue utilizado como indicador indirecto de la actividad de α -amilasa presente en el grano.

3.6 Selección espacial de chacras mediante distancia geográfica

Dado que los modelos fenológicos fueron ajustados utilizando información proveniente de La Estanzuela y EEMAC, se restringió la aplicación del modelo a chacras ubicadas dentro del rango geográfico determinado por dichas localidades. Este procedimiento permitió limitar el uso del modelo a un dominio espacial consistente con el rango de condiciones ambientales representadas en los datos de entrenamiento.

3.7 Predicción de eventos fenológicos

Sobre la base filtrada espacialmente, se aplicaron los modelos previamente ajustados para predecir: días hasta floración y días hasta madurez fisiológica.

3.8 Análisis exploratorio y detección de valores atípicos en las predicciones

Se evaluó la presencia de valores atípicos dentro de cada variedad, aplicando nuevamente el criterio del rango intercuartílico (IQR), pero esta vez por grupo varietal y sobre las variables predichas.

Se identificaron observaciones consideradas atípicas para floración o madurez fisiológica dentro de cada variedad, y se generó una versión depurada de la base de datos excluyendo dichas observaciones. Esta base sin valores atípicos fue utilizada para los análisis posteriores.

3.9 Reconstrucción de fechas fenológicas y subdivisión del período de llenado

A partir de las predicciones depuradas, se reconstruyeron las fechas calendario de los eventos fenológicos sumando los días predichos a la fecha de siembra. Se obtuvieron así:

- Fecha estimada de floración
- Fecha estimada de madurez fisiológica
- Fecha estimada de cosecha, definida como 10 días posteriores a la madurez fisiológica

Adicionalmente, el período comprendido entre floración y madurez fisiológica se subdividió en dos subperíodos intermedios (p_1 y p_2), correspondientes aproximadamente al 33% y 66% del intervalo total, con el objetivo de caracterizar distintas fases del llenado de grano.

3.10 Caracterización climática de la zafra 2024

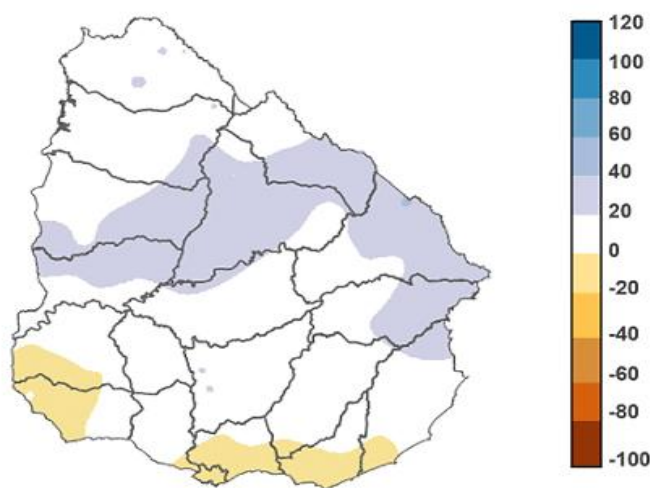
En lo que respecta a las precipitaciones, en términos anuales y a escala país, el año 2024 presentó un acumulado anual de 1431 mm, levemente por encima de la climatología (1364 mm).

La Figura N°1 muestra los desvíos acumulados de precipitaciones respecto a la media (anomalías). En la mayor parte del territorio, los acumulados se mantuvieron cercanos al promedio anual. Al norte del río Negro y en el noreste del país se observa una zona con precipitaciones levemente superiores al promedio, mientras que en el sur y suroeste se registraron déficits, con valores ligeramente por debajo de la media.

El comportamiento de las precipitaciones durante el año 2024 se aprecia en la Figura N°2, donde se muestran los acumulados promedios desagregados mensualmente. Los acumulados superiores a la climatología se observaron en marzo, abril, mayo y agosto. Por el contrario, enero, febrero, junio y julio presentaron precipitaciones significativamente inferiores, coincidiendo los dos últimos con parte del período de siembra de los cultivos. Finalmente, los meses correspondientes al llenado de grano mostraron un comportamiento más próximo a lo normal, aunque con desvíos negativos respecto a la climatología.

Figura 1

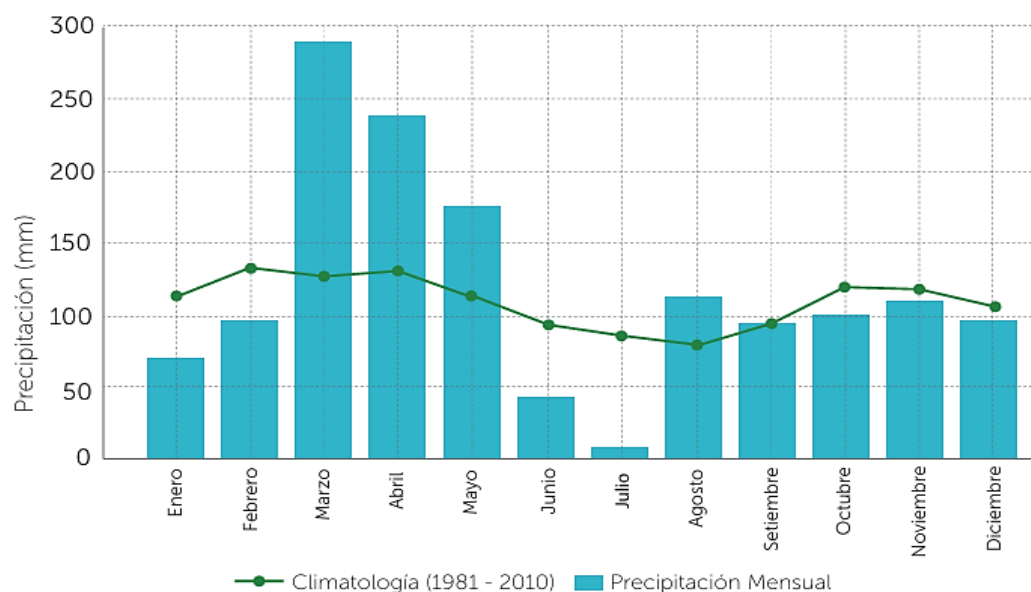
Anomalías de precipitación en porcentaje para el año 2024



Nota. Tomado de Instituto Uruguayo de Meteorología (Inumet, 2024).

Figura 2

Precipitación acumulada promedio, a escala país, para los meses del año 2024.

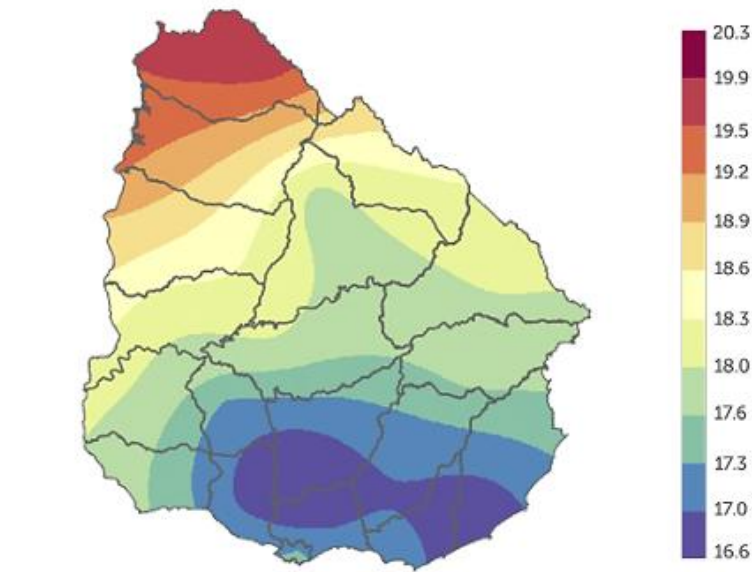


Nota. Tomado de Inumet (2024).

En lo que respecta a la temperatura, en el año 2024 se registró una temperatura promedio a nivel país de 17,8°C. Como es de esperar, las temperaturas medias más elevadas se dieron al norte y noroeste, y las más bajas al centro – sur y sureste del país (Figura N°3). Dichos valores se ubicaron dentro de lo normal según los promedios históricos, determinando que no fue un año muy cálido ni muy frío.

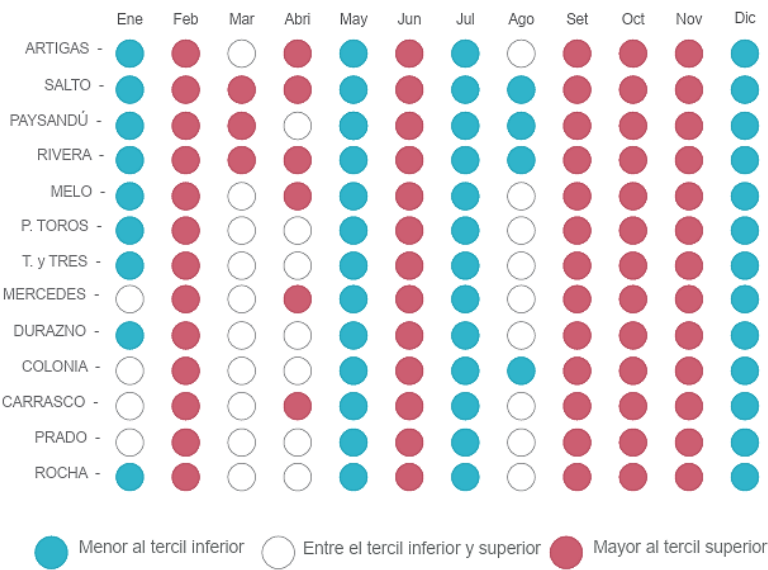
Sin embargo, en la figura N°4 se observa un comportamiento variable de la temperatura media mes a mes, donde se destacan los meses de febrero, junio, setiembre, octubre y noviembre por presentar temperaturas por encima del tercil superior de la distribución climatológica en todo el territorio. En contraste, se registraron temperaturas medias por debajo del tercil inferior en todas las estaciones meteorológicas en los meses de mayo, julio y diciembre.

Figura 3
Mapa de temperatura media.



Nota. Tomado de Inumet (2024).

Figura 4
Temperatura media mensual según los terciles de la distribución climatológica.



Nota. Tomado de Inumet (2024).

3.11 Obtención y procesamiento de variables climáticas

Con el objetivo de caracterizar las condiciones ambientales asociadas a los distintos períodos fenológicos estimados, se obtuvieron variables climáticas diarias a partir de la base de datos NASA POWER, utilizando el paquete nasapower en R. Esta herramienta de acceso libre proporciona datos meteorológicos y climáticos derivados de observaciones satelitales de la NASA, con el objetivo de facilitar el acceso a

información confiable para todo tipo de usuarios. Entre sus principales ventajas se destacan la cobertura global y la resolución espacial de 0,5°, lo que permite obtener datos diarios, mensuales o anuales para cualquier punto del planeta, desde 1981 hasta la actualidad (National Aeronautics and Space Administration [NASA], s.f.) (Data Access Viewer → Single Point → Standard Resolution → Agroclimatology → Daily → ingreso de latitud y longitud → selección del período de consulta → Parameters: T2M y Precipitation [PRECTOTCORR] → selección del formato de descarga → Submit).

La base de datos utilizada como insumo correspondió a la versión depurada sin valores atípicos, que incluía para cada chacra las coordenadas geográficas (latitud y longitud) y las fechas estimadas de los principales eventos fenológicos: floración, subperíodos intermedios de llenado (p1 y p2), madurez fisiológica y cosecha.

Para cada chacra y cada intervalo fenológico definido, se consultaron datos climáticos diarios correspondientes a:

Temperatura media del aire a 2 m (T2M)

Precipitación total corregida (PRECTOTCORR)

3.12 Definición de períodos fenológicos

Las variables climáticas fueron calculadas para cuatro períodos fenológicos consecutivos, definidos a partir de las fechas estimadas previamente:

Floración → primera partición de llenado (p1)

Primera partición de llenado → segunda partición de llenado (p1 → p2)

Segunda partición de llenado → madurez fisiológica (p2 → MF)

Madurez fisiológica → cosecha (MF → cosecha)

Para cada uno de estos períodos se obtuvieron variables climáticas específicas, generando un conjunto de ocho variables ambientales por chacra (cuatro valores de temperatura media, y cuatro valores de precipitación acumulada), cada una identificada por el período fenológico correspondiente.

3.13 Integración de variables climáticas a la base de datos

Las métricas climáticas calculadas para cada período se integraron a la base de datos original manteniendo el orden de las observaciones. El resultado fue una base de datos ampliada que combinó información varietal, espacial, fenológica y climática, y que fue utilizada posteriormente para los análisis estadísticos orientados a evaluar la influencia de las condiciones ambientales sobre el comportamiento del cultivo.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La base de datos utilizada estuvo conformada por 1449 chacras correspondientes a la zafra 2024, distribuidas geográficamente en distintas regiones del área de estudio. En total, se registraron siete variedades de cebada cervecera; sin embargo, para los análisis varietales se trabajó únicamente con las cinco de mayor representación dentro de la base de datos (Arrayán, Danielle, Nahara, Osiris y Fana), las cuales representaron más del 99 % del total de las chacras. Asimismo, la base incluyó información vinculada a ubicación geográfica, fechas de siembra, manejo agronómico y parámetros de calidad industrial. Con el objetivo de caracterizar la base de datos y describir el desarrollo de la zafra 2024, se analizaron la distribución temporal de las fechas de siembra, la distribución geográfica de las chacras registradas y el comportamiento de los principales parámetros de calidad evaluados, diferenciando en todos los casos según variedad.

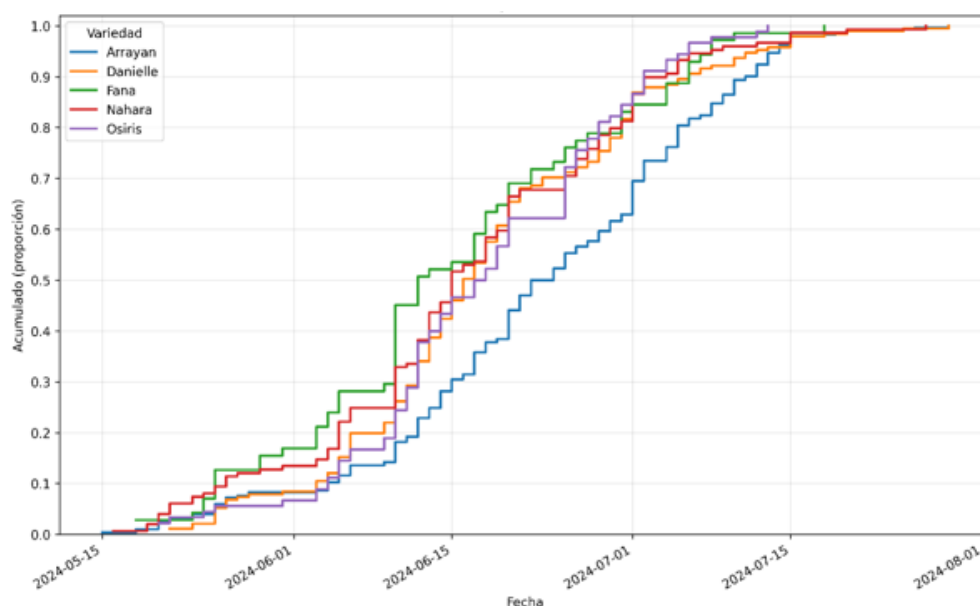
4.1 Distribución temporal de las fechas de siembra según variedad

A partir de los datos disponibles en la base de datos suministrada por la maltería (Maltería Oriental, comunicación personal, 2025), se realizó una representación gráfica de la distribución acumulada de las fechas de siembra, desglosada por variedad. Para ello, se contabilizó la frecuencia relativa de chacras que efectuaron la siembra en cada semana, tomando como referencia el 15 de mayo como inicio del período analizado (Figura 5).

Esta aproximación permitió caracterizar la dinámica del cultivo, identificar las ventanas de siembra predominantes y evaluar el nivel de concentración o dispersión temporal en el inicio del ciclo de la cebada cervecera para cada variedad, aportando un marco interpretativo sólido para el análisis posterior de los parámetros de calidad del grano.

Figura 5

Distribución acumulada de las fechas de siembra registradas para cada variedad de cebada cervecera evaluada



Nota. Función de distribución acumulada empírica (ECDF) de las fechas de siembra de distintas variedades de cebada en la zafra 2024. Las curvas representan la proporción acumulada de chacras sembradas en función de la fecha de siembra.

En la Figura 5 se observa la distribución acumulada de las siembras realizadas para cada variedad. La pendiente de cada curva refleja la concentración temporal de la actividad: una pendiente más pronunciada indica que las siembras se concentraron en un período reducido, mientras que pendientes más suaves y curvas más extendidas evidencian una distribución de la siembra más dispersa en el tiempo.

Puede apreciarse que la variedad Arrayán presentó una distribución de fechas de siembra más amplia y dispersa en comparación con las demás variedades. En particular, acumuló el 50 % de la siembra en una fecha más tardía respecto a las otras variedades. Esta menor concentración temporal determinó un período de siembra más flexible, otorgándole a la variedad una mayor heterogeneidad en las condiciones ambientales a lo largo del ciclo del cultivo.

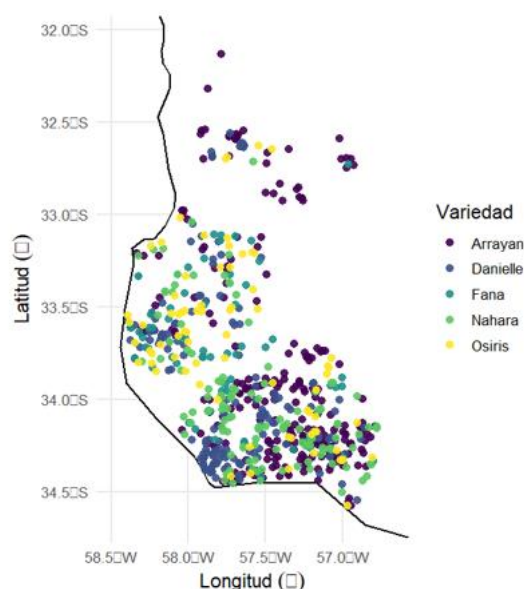
Lo contrario se observa en el caso de la variedad Fana, cuya curva presenta una pendiente más pronunciada, reflejando que las siembras se concentraron en un período reducido y que el 50 % de ellas se acumuló en fechas más tempranas. No obstante, hacia las fechas más tardías esta tendencia se modifica. En cuanto al resto de las variedades, muestran un comportamiento intermedio.

4.2 Cobertura espacial de las chacras registradas

Para ilustrar la escala espacial considerada, se presenta a continuación la Figura 6, en la que se muestra la regionalización de las chacras registradas en la base de datos, diferenciadas por variedad.

Figura 6

Regionalización de variedades de cebada según ubicación geográfica de las chacras



Nota. Cada punto representa una chacra correspondiente a la variedad indicada.

La figura 6 se incorpora con el propósito de enfatizar la complejidad que implica realizar un estudio a la escala que abarca la maltería. Mientras que los ensayos a pequeña escala, con pocas parcelas y condiciones controladas, resultan esenciales para comprender procesos específicos y reducir la variabilidad experimental, este análisis se desarrolla en un conjunto amplio y heterogéneo de chacras. Esta amplitud espacial introduce una mayor variabilidad en los parámetros de manejo y en las condiciones ambientales, lo que incrementa la magnitud potencial de los errores y constituye un desafío adicional para la validación y precisión del modelo.

Además, a partir de dicha figura se puede visualizar la distribución espacial de las chacras evaluadas, georreferenciadas según latitud y longitud y diferenciadas por variedad. Esto permite identificar la existencia de diferencias en los patrones de distribución espacial entre variedades, es decir, si estas presentan comportamientos diferenciados en su localización dentro del área de estudio.

A grandes rasgos, todas las variedades se encuentran distribuidas a lo largo del territorio, con una marcada superposición espacial y sin una segregación estricta, aunque se observan algunas tendencias de concentración regional para ciertas variedades analizadas.

La variedad Arrayán presentó la mayor dispersión geográfica, extendiéndose tanto hacia el norte como hacia el sur del área de estudio, lo que sugiere una amplia adaptación regional.

En el caso de Danielle, la siembra fue mayormente concentrada hacia latitudes más al sur, con menor registro de chacras en el sector norte, indicando una siembra más focalizada geográficamente.

Por su parte, Fana, Nahara y Osiris exhiben una distribución intermedia, con presencia en distintos sectores del área de estudio, aunque con una mayor densidad de chacras en el centro-sur de la región.

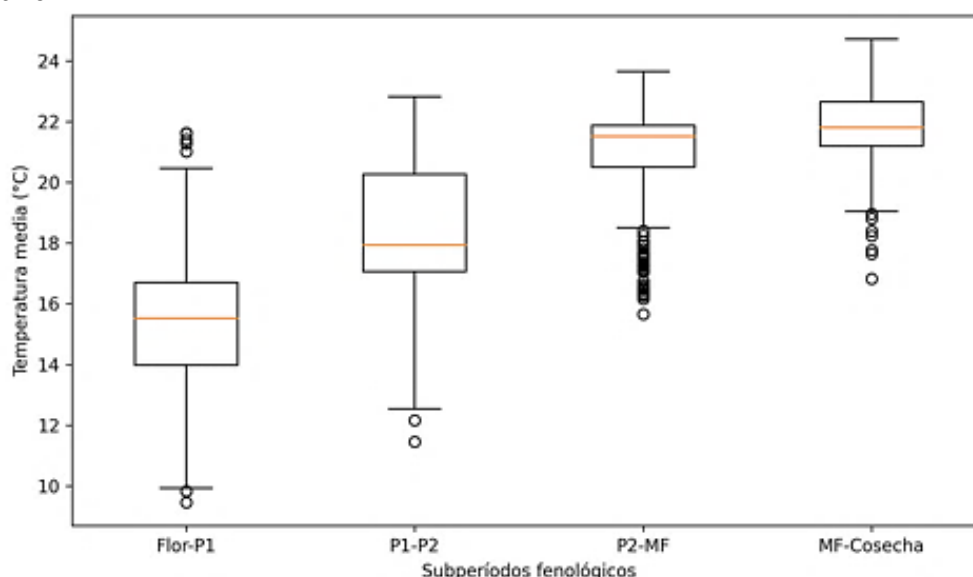
4.3 Caracterización ambiental de los subperíodos de llenado de grano

Con el objetivo de caracterizar las condiciones ambientales presentes durante los distintos subperíodos del llenado de grano, se analizaron las distribuciones de temperatura media y precipitaciones corregidas obtenidas a partir de la base de datos NASA POWER.

La Figura 7 muestra la variación de la temperatura media para los distintos períodos analizados, observándose un incremento progresivo de las temperaturas hacia etapas finales del llenado de grano. Asimismo, se evidenció variabilidad entre ambientes productivos para todos los subperíodos considerados.

Figura 7

Distribución de la temperatura media para los distintos subperíodos del llenado de grano

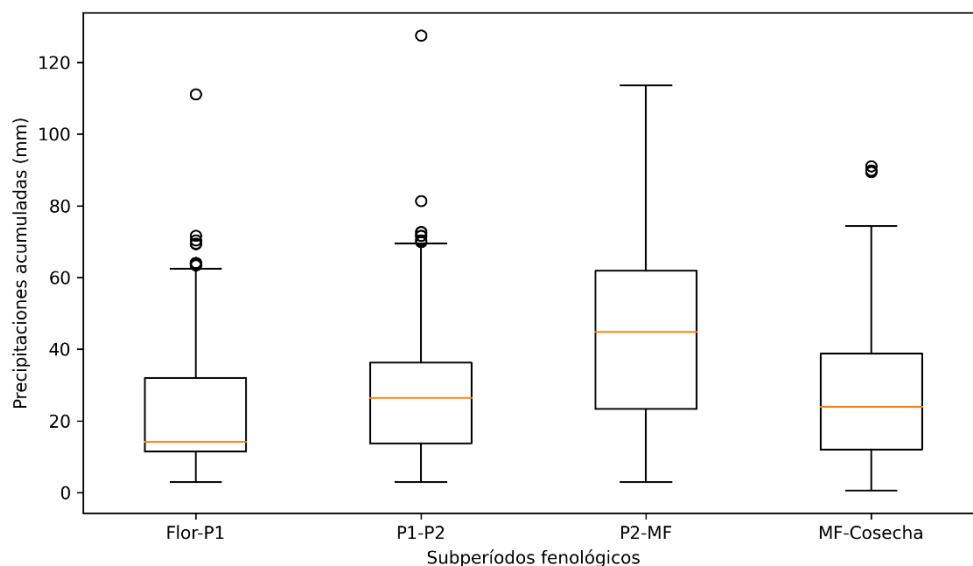


Nota. La línea central representa la mediana; los bordes de la caja corresponden al primer y tercer cuartil, mientras que los bigotes indican la dispersión de los datos. Los puntos representan valores atípicos.

Por otra parte, la Figura 8 presenta la distribución de las precipitaciones corregidas, observándose una elevada dispersión entre períodos y localidades. Esta variabilidad fue particularmente marcada en las precipitaciones, debido a su alta heterogeneidad espacial y temporal.

Figura 8

Distribución de las precipitaciones acumuladas para los distintos subperíodos del llenado de grano



Nota. La línea central representa la mediana; los bordes de la caja corresponden al primer y tercer cuartil, mientras que los bigotes indican la dispersión de los datos. Los puntos representan valores atípicos.

La caracterización ambiental observada aporta un marco descriptivo de las condiciones climáticas atravesadas por los distintos ambientes productivos durante el llenado de grano, constituyendo una base para los análisis posteriores de relación entre ambiente y calidad industrial.

4.4 Caracterización de la calidad comercial

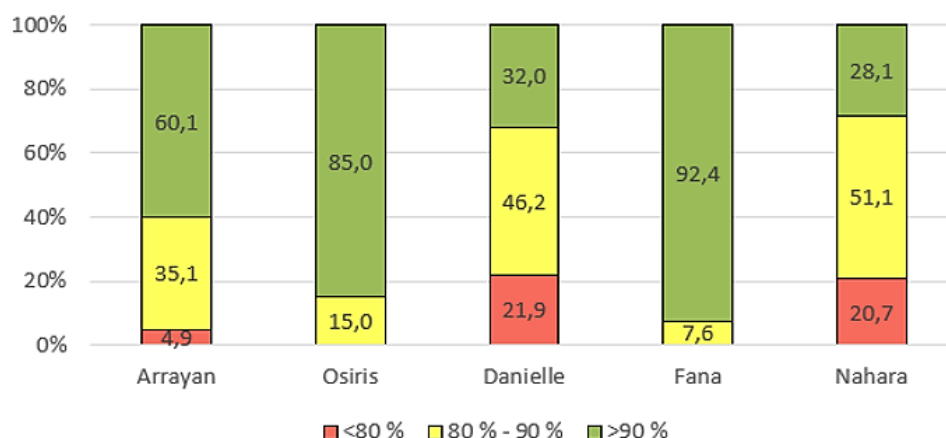
La calidad comercial de la cebada cervecera constituye un aspecto determinante para su aceptación por parte de la industria maltera, ya que condiciona tanto la eficiencia del proceso de malteo como la calidad del producto final. En este sentido, parámetros como el Falling Number, el contenido de proteína en grano y el calibre comercial son utilizados habitualmente como criterios para determinar la aceptación o rechazo industrial de la cebada cervecera.

La evaluación conjunta de estos parámetros permite no solo caracterizar el desempeño de las distintas variedades, sino también estimar el riesgo potencial de rechazo industrial, considerando la proporción de muestras que se encuentran fuera de los rangos considerados óptimos o aceptables para uso cervecero.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la distribución porcentual del Falling Number, el contenido de proteína en grano y el calibre comercial en las variedades evaluadas, con énfasis en las diferencias varietales.

Figura 9

Distribución porcentual de la Clasificación (% de granos de 1° + 2°) para las variedades de cebada cervecera evaluadas



Nota. Las barras muestran la proporción de chacras comprendidas en cada categoría de calibre.

En este caso (figura 9), se consideran como potencial rechazo a los valores de calibre inferiores al 80 %, referenciados con el color rojo. En amarillo se señalan los lotes o chacras que presentaron valores aceptables de calibre, mientras que en verde se representan los valores superiores al 90 %, considerados óptimos para asegurar un buen comportamiento de los granos a nivel industrial.

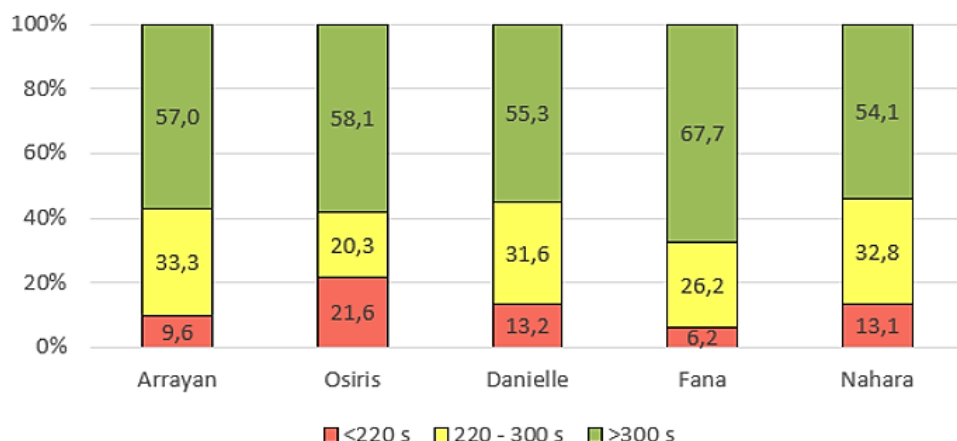
La figura 9 evidencia un comportamiento diferencial entre variedades. Fana y Osiris fueron las que presentaron el mayor porcentaje de lotes con más del 90 % de los granos clasificados como primera más segunda (92,4 % y 85 %, respectivamente). Además, cabe destacar que ninguna de estas variedades registró cultivos con valores inferiores al 80 % de granos con calibre superior a 2,5 mm, lo que refleja un elevado nivel de homogeneidad en cuanto a este atributo.

Por su parte, Arrayán mostró un comportamiento intermedio, con un 60,1 % de las chacras que presentaron más del 90 % de los granos por encima de la zaranda de 2,5 mm. Asimismo, resultó considerable el porcentaje de chacras que registraron valores comprendidos entre 80 y 90 % de granos en dicha clasificación (35,1 %).

En contraste, Danielle y Nahara presentaron los valores más bajos en el rango superior al 90 % (32 % y 28,1 %, respectivamente). Además, fueron las variedades que registraron el mayor porcentaje de muestras con calibre inferior al 80 % (21,9 % y 20,7 %, respectivamente), lo que evidencia una mayor heterogeneidad en el tamaño de grano para ambas variedades.

Figura 10

Distribución porcentual de los valores de Falling Number para las variedades de cebada cervecera evaluadas



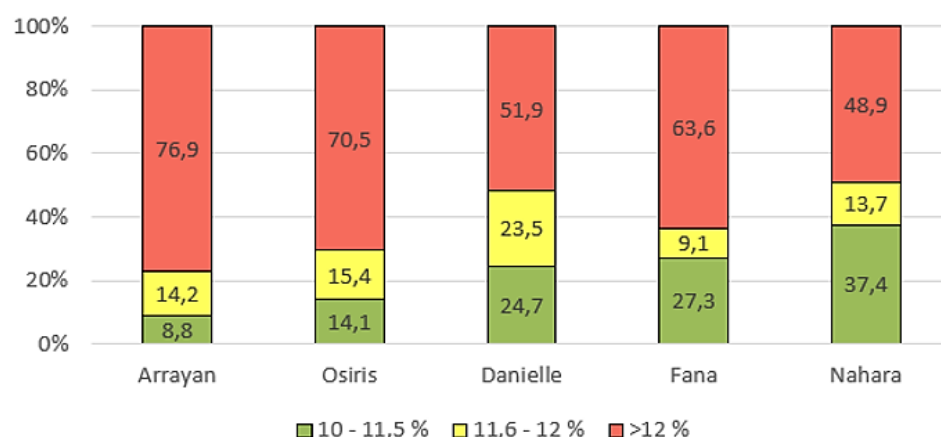
Nota. Las barras representan la proporción de chacras comprendidas en cada categoría de Falling Number.

A partir de la figura 10 se aprecian diferencias claras entre las distintas variedades. La variedad Fana fue la que presentó el mayor porcentaje de chacras con valores de Falling Number superiores a 300 segundos (67,7 %), mientras que Nahara exhibió el menor porcentaje dentro de esta categoría (54,1 %). No obstante, la categoría correspondiente a valores de Falling Number mayores a 300 segundos fue la predominante en todas las variedades evaluadas.

Los valores inferiores a 220 segundos, asociados a un potencial rechazo por parte de las malterías debido a un mayor riesgo de pregerminado o brotado precosecha, fueron más frecuentes en la variedad Osiris (21,6 %), mientras que Fana presentó el menor porcentaje en este rango (6,2 %). Las restantes variedades mostraron valores intermedios para dicha categoría.

Figura 11

Distribución porcentual del nivel de proteína en grano por variedad de cebada cervecera evaluadas



Nota. Las barras representan la proporción de chacras comprendidas en cada categoría de contenido de proteína.

Con respecto al contenido de proteína en grano (figura 11), el rango comprendido entre 9 % y 11,5 % es considerado óptimo por la industria maltera. Sin embargo, en la base de datos analizada no se registraron valores inferiores al 10 %, por lo que dicho rango fue acotado. Dentro de esta categoría, Nahara fue la variedad que presentó el mayor porcentaje de datos.

La categoría correspondiente a valores superiores al 12 % de proteína, representada en rojo, se asocia a una menor aptitud industrial para malteo, de acuerdo con lo señalado en la bibliografía (MacGregor, 1996; Savin & Aguinaga, 2011). Todas las variedades mostraron una alta proporción de valores dentro de esta categoría, destacándose principalmente Arrayán y Osiris (76,9 % y 70,5 %, respectivamente). Este comportamiento probablemente determinó que una gran proporción de las chacras correspondientes a estas variedades presentaran un mayor riesgo de rechazo por parte de la industria.

La ausencia de valores menores al 10 % en contenido de proteína, indica que, bajo las condiciones evaluadas, el riesgo de rechazo por proteína insuficiente fue prácticamente nulo.

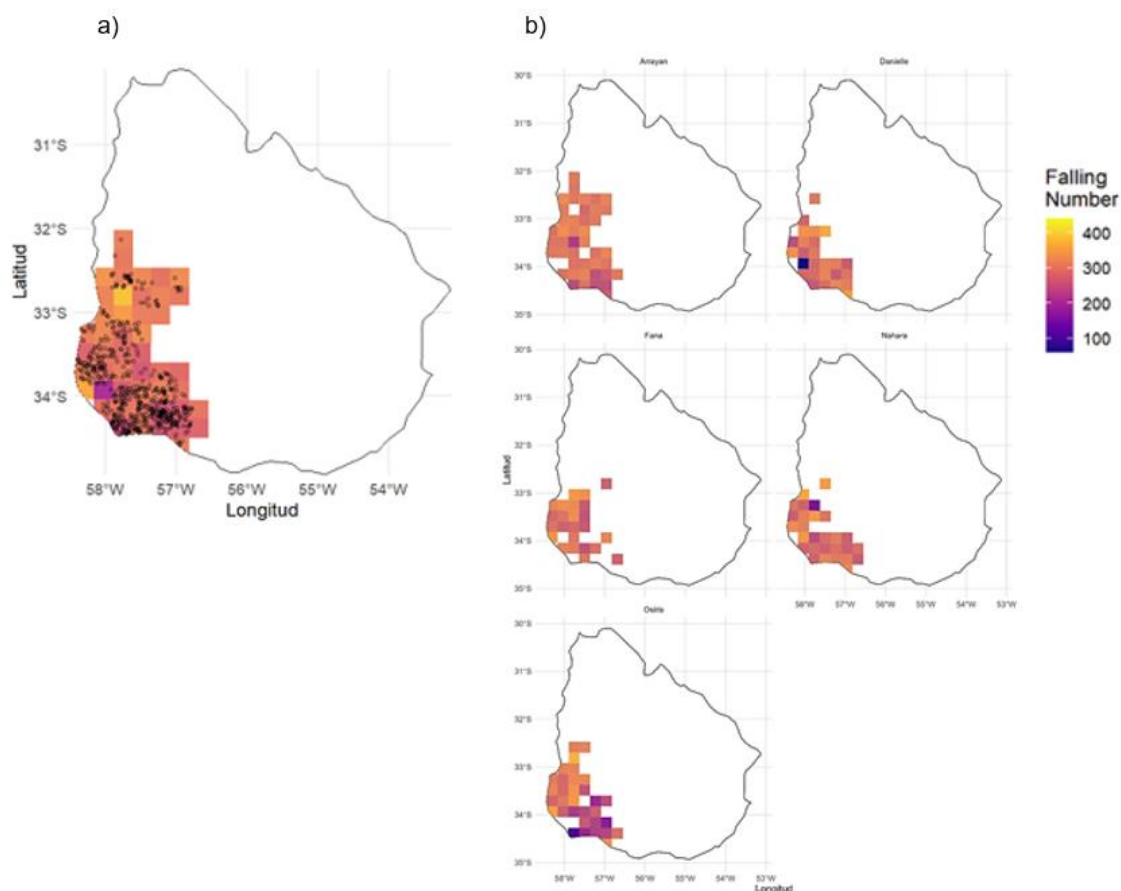
El análisis conjunto del calibre y el Falling Number permitió identificar diferencias varietales en el comportamiento de ambos parámetros de calidad industrial. Mientras que en Danielle y Nahara el calibre constituyó el principal factor de riesgo de rechazo, en Osiris fue el Falling Number el que se presentó como limitante. Este comportamiento sugiere que el calibre y el Falling Number no presentarían una relación directa, sino que responderían a factores fisiológicos y ambientales diferentes, cuya incidencia variaría según la variedad evaluada.

Asimismo, pone de manifiesto que el rechazo industrial de la cebada cervecera no responde a un único factor, sino a la combinación de varios de ellos. A partir de las figuras analizadas, se observó que algunos lotes pertenecientes a determinadas variedades pueden presentar valores aceptables e incluso óptimos de calibre y, sin embargo, resultar potencialmente rechazables debido a bajos valores de Falling Number. De este modo, aun cuando un parámetro individual se encuentre dentro de los rangos considerados adecuados, la no conformidad en otro criterio puede comprometer la aptitud cervecera del lote en su conjunto. Esta situación adquiere particular relevancia a nivel industrial, ya que incrementa el riesgo de rechazo o penalización comercial y contribuye a explicar las pérdidas económicas asociadas a la producción de cebada cervecera que no cumple simultáneamente con todas las especificaciones requeridas.

Las Figuras 12 y 13 presentan mapas de calor utilizados para representar la distribución espacial del Falling Number y la clasificación, respectivamente, tanto de forma general como para cada variedad evaluada. En estos mapas, la escala de colores indica la magnitud de los valores observados para cada parámetro, permitiendo visualizar su variación espacial entre las distintas zonas de estudio.

Figura 12

Distribución espacial del Falling Number en Uruguay (a) y por variedad (b)



Nota. Coloraciones más oscuras (azul) corresponden a valores inferiores de Falling Number y las tonalidades más claras (amarillo) indican valores superiores del parámetro.

La Figura 12a se construye a partir de los valores reales extraídos de la base de datos, por lo que se aprecian los puntos de muestreo correspondientes a cada chacra registrada. El mapa muestra un rango de valores de Falling Number entre 100 y 400 segundos, representados mediante tonalidades más oscuras y más claras, respectivamente. En términos generales, se observa una tendencia espacial con predominancia de valores más bajos en el sector suroeste y valores más elevados hacia latitudes más al norte. Esto evidencia una marcada heterogeneidad espacial del Falling Number, lo que confirma que este atributo de calidad no se distribuye de manera uniforme en el territorio.

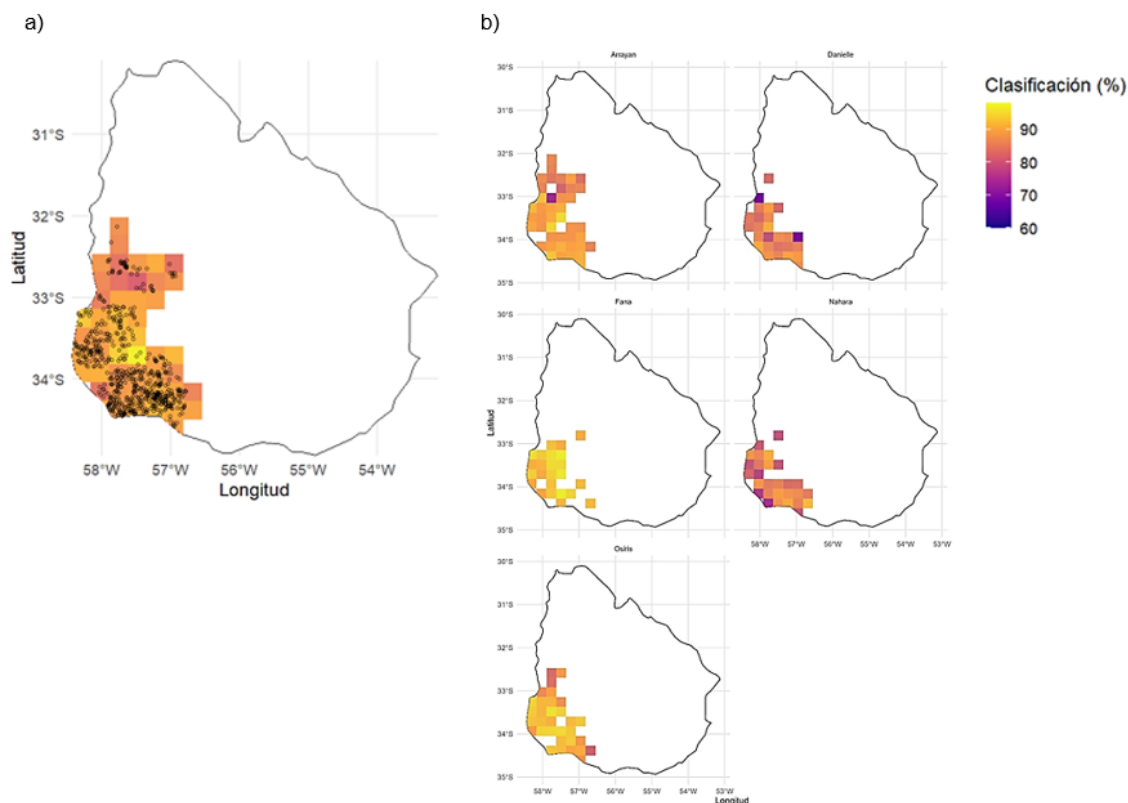
En la Figura 12b se observa lo mismo que en la figura anterior, aunque en este caso los resultados se diferencian según la variedad. La tendencia general se mantiene, con valores más elevados hacia el norte y más bajos en el sur. La salvedad está en que la variedad Osiris presenta coloraciones más oscuras en la región sur en comparación con el resto de las variedades. Otro aspecto que se aprecia en la figura es la mayor área abarcada por la variedad Arrayán respecto de las demás.

Asimismo, la coexistencia de valores altos y bajos en zonas geográficas próximas sugiere que el Falling Number no dependería exclusivamente de la

localización espacial, sino que podría estar influenciado por la interacción de múltiples factores, entre ellos la variedad sembrada y posiblemente otras variables asociadas al ambiente y manejo del cultivo.

Figura 13

Distribución espacial de la Clasificación en Uruguay (a) y por variedad (b).



Nota. Coloraciones más oscuras (azul) corresponden a valores inferiores de Clasificación y las tonalidades más claras (amarillo) indican valores superiores del parámetro.

Referido a la clasificación, se observa una heterogeneidad en la distribución espacial; sin embargo, en este caso no se aprecia una tendencia tan marcada. Aun así, es posible diferenciar zonas donde el porcentaje de clasificación es más elevado respecto de otras con tonalidades más oscuras, lo que refleja un desempeño menos favorable en este atributo. Esto confirma que la calidad medida a través de la clasificación no sigue un patrón uniforme en el territorio. Un aspecto positivo que surge de la figura es que no se observan tonalidades extremadamente oscuras que correspondan a valores muy bajos; en términos generales, las coloraciones presentes representan porcentajes de clasificación superiores al 80 % (Figura 13a).

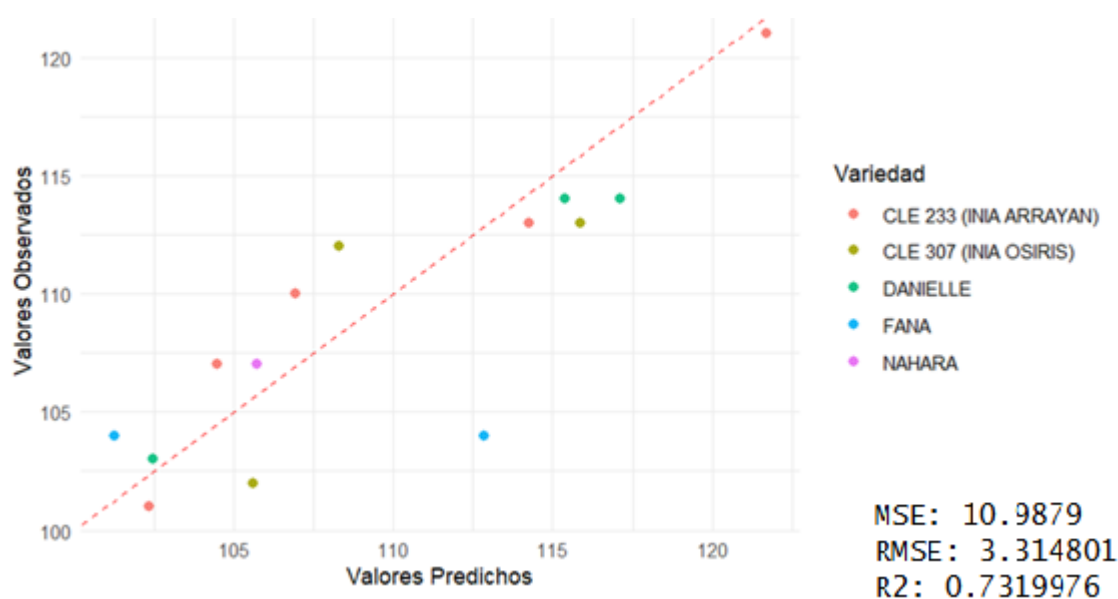
Al diferenciar por variedad, se observa que Fana y Osiris registraron los valores más elevados de clasificación, representados por las tonalidades amarillentas. En el caso de Danielle y Nahara predominan coloraciones rosadas-violáceas, que indican valores algo más bajos. Por último, la variedad Arrayán mostró un gradiente más marcado, con tonalidades más oscuras en la zona norte del territorio que se tornan gradualmente más claras hacia el sur (Figura 13b).

4.5 Desempeño predictivo del modelo fenológico

Con el objetivo de evidenciar la calidad de ajuste y precisión del modelo desarrollado en este trabajo, se elaboraron dos gráficos de dispersión: uno representando los días hasta floración y otro los días hasta madurez fisiológica. En estas figuras se visualiza la relación entre los valores observados a nivel de chacra y los valores predichos por el modelo, diferenciados por variedad. Esta representación resulta fundamental para evaluar el desempeño del modelo estadístico aplicado, validando la capacidad de estimación que este ofrece.

Figura 14

Relación entre valores observados y predichos para días hasta floración (validación del modelo)



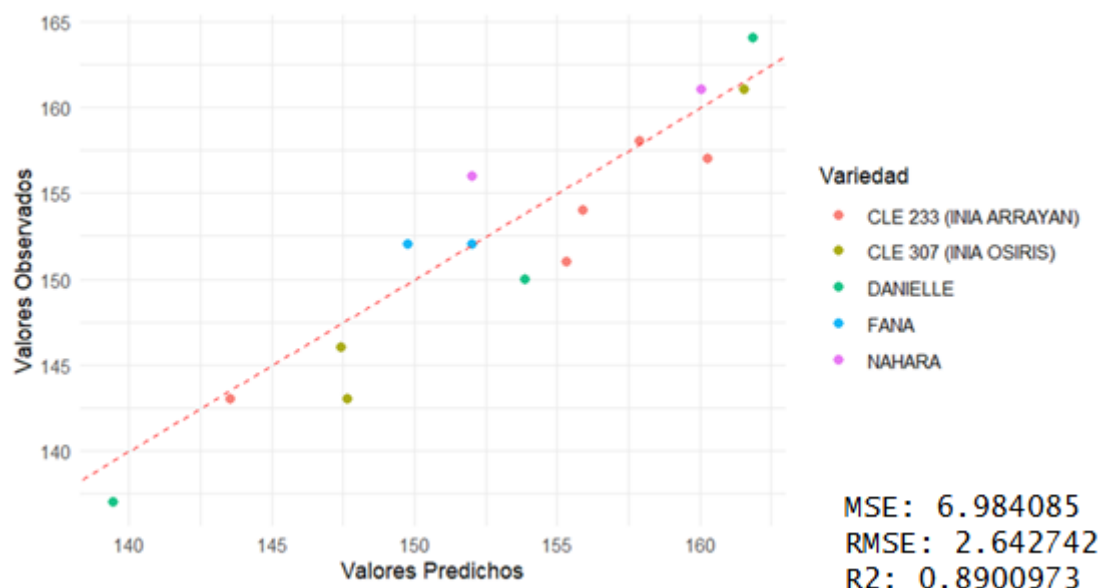
Nota. MSE = Mean Squared Error (Error cuadrático medio). RMSE = Root Mean Squared Error (Raíz del error cuadrático medio). R2 = coeficiente de determinación.

En términos generales, en la Figura 14, los puntos se distribuyen de manera dispersa pero cercana a la línea de predicción perfecta, siguiendo su tendencia. Esto evidencia que el modelo predice de forma aceptable los valores observados de días hasta la floración, aunque con ciertos matices según la variedad. Las métricas de ajuste respaldan esta interpretación: el modelo explica el 73,2 % (R^2) de la variabilidad en los datos observados y presenta una raíz del error cuadrático medio de 3,31 días, lo que, considerando el rango de días hasta la floración, puede calificarse como un error moderado a bajo. Esto refleja una precisión de ajuste adecuada. Además, el error cuadrático medio señala cierta dispersión, aunque sin presencia de errores extremos.

Se elaboró la misma figura de observado vs predicho con el objetivo de demostrar el comportamiento del modelo como forma de validación, pero en este caso ajustada para los días hasta la madurez fisiológica (MF) (Figura 15).

Figura 15

Relación entre valores observados y predichos para días hasta madurez fisiológica (validación del modelo)



Nota. MSE = Mean Squared Error (Error cuadrático medio). RMSE = Root Mean Squared Error (Raíz del error cuadrático medio). R2 = coeficiente de determinación.

Visualmente se aprecia que la gran mayoría de los puntos se alinean muy próximos de la línea punteada roja de predicción perfecta, lo que indica que, en términos generales, el modelo presenta un óptimo ajuste. La validez de esta observación se confirma al analizar las métricas: un R^2 elevado determina que el 89 % de la variabilidad de los datos observados es explicada por el modelo. Además, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) es de 2,64 días, un valor bajo que evidencia que, en promedio, las predicciones no difieren en más de esa cantidad de días respecto a los datos observados, lo que refleja la precisión del modelo. Gráficamente, la RMSE representa el promedio de la distancia vertical entre los puntos y la línea de ajuste.

Como diagnostico complementario para evaluar la calidad del ajuste del modelo que predice la cantidad de días hasta floración, se llevó a cabo dos histograma de residuos, herramienta grafica que muestra cómo se distribuyen los errores de predicción, a través de la diferencia entre los valores observados y los valores predichos para cada muestra (ver anexo).

Las Figuras A1 y A2 presentan las distribuciones de residuos de los modelos de predicción de floración y madurez fisiológica, respectivamente. En ambos casos se observó una concentración de residuos cercana al valor cero y distribuciones relativamente simétricas, indicando un adecuado ajuste general de los modelos.

4.6 Evaluación de la calidad industrial a través de regresión por cuantiles

A continuación, las figuras 16 y 17 corresponden a regresiones por cuantiles para Falling Number y clasificación, respectivamente. Esta opción resulta adecuada para el presente estudio debido a las características propias de la base de datos analizada, donde los datos provienen de situaciones productivas reales, sin diseño

experimental balanceado y controlado, que implica un numero desigual de observaciones entre variedades, ambientes y manejos.

El sistema productivo evaluado tiene una marcada heterogeneidad ambiental, asociada a diferencias edafoclimáticas, fechas de siembra, manejo agronómico y condiciones climáticas durante el ciclo del cultivo. Dicha variabilidad genera diferentes respuestas de las variedades a lo largo de toda la distribución de los parámetros de calidad evaluados.

Debido a eso, se llevó a cabo la regresión por cuantiles, ya que, permite modelar el efecto de las variedades en distintos puntos de la distribución de la variable en cuestión, evaluando por separado los escenarios de menor, mediana y mayor calidad.

Adicionalmente, dicho enfoque es menos sensible a valores extremos y a distribuciones asimétricas, que suelen estar presentes en base de datos productivas, siendo pertinente a la hora de trabajar con información desbalanceada y de alta variabilidad.

Figura 16

Efecto estimado de cada variedad sobre el Falling Number según cuantil

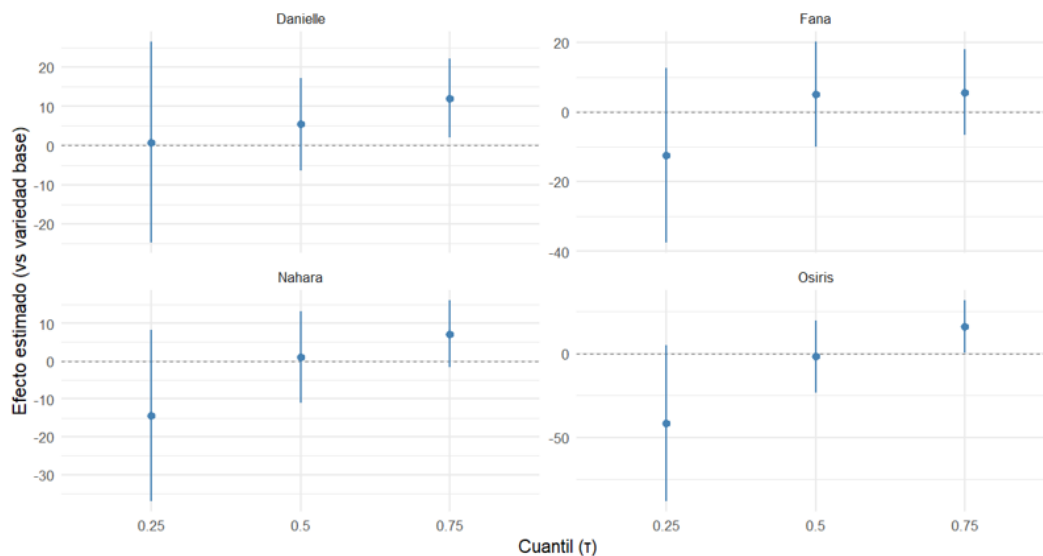
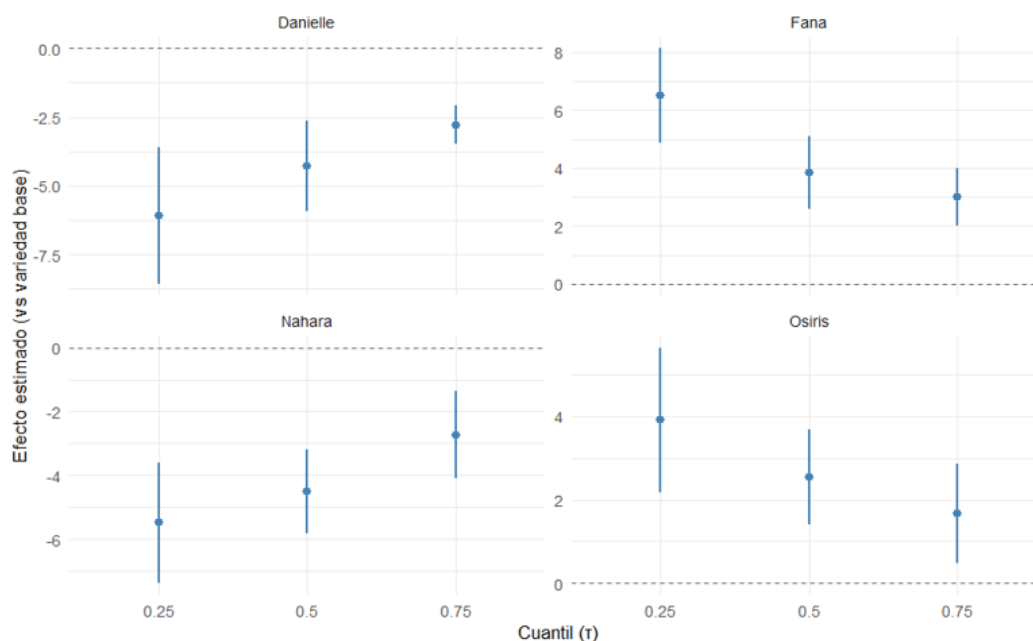


Figura 17

Efecto estimado de cada variedad sobre la Clasificación según cuantil



En el eje x se representa la distribución de los valores de Falling Number (Figura 16) y de clasificación (Figura 17) en tres cuantiles: el 0,25, que corresponde a los valores más bajos de cada parámetro; el 0,5, equivalente a la mediana, donde se ubican los valores promedio; y el 0,75, asociado a los valores más elevados tanto de Falling Number como de clasificación. En el eje y se indica el desvío de cada variedad respecto a una variedad base en cada uno de los cuantiles analizados. Este enfoque permite evaluar si el comportamiento relativo de cada variedad se mantiene o varía a lo largo de los distintos niveles de calidad, desde los valores más bajos ($\tau = 0,25$), que representan ambientes menos favorables, hasta los más altos ($\tau = 0,75$), correspondientes a situaciones más favorables.

En estos casos, se utilizó Arrayán como variedad base para estandarizar la comparación entre cultivares, debido a que se trata de uno de los materiales de mayor referencia dentro del conjunto evaluado. La línea horizontal ubicada en $y = 0$ representa el efecto de la misma, mientras que cada punto indica el efecto estimado de cada variedad en cada cuantil. Las barras verticales corresponden a los intervalos de confianza, los cuales reflejan la incertidumbre asociada a la estimación de dichos efectos.

En la Figura 16, para la variedad Danielle, el efecto estimado se aproxima a cero en el cuantil inferior ($\tau = 0,25$), lo que indica un comportamiento similar al de Arrayán en los valores bajos de Falling Number. Sin embargo, el intervalo de confianza en este cuantil es amplio, lo que refleja una elevada incertidumbre en la estimación. A medida que se avanza hacia los cuantiles medios y superiores, se observa un efecto positivo creciente, especialmente en $\tau = 0,75$, lo que sugiere que Danielle tiende a presentar valores de Falling Number superiores a Arrayán en escenarios de mejor desempeño.

En el caso de Fana, en el cuantil inferior ($\tau = 0,25$) se observa un efecto estimado negativo, lo que indica que los valores bajos de Falling Number de esta variedad tienden

a ser inferiores a los de Arrayán en ese tramo de la distribución. No obstante, el intervalo de confianza amplio sugiere que el efecto podría situarse por encima de la variedad base. En los cuantiles medio y superior, el efecto se torna levemente positivo, aunque los intervalos de confianza muestran que, en algunos casos, el valor estimado podría ser inferior a Arrayán. Esta situación refleja cierta inconsistencia en las estimaciones, atribuible a la variabilidad propia de la producción. Similar es lo que ocurre para la variedad Nahara.

Por último, se observa que Osiris presenta el efecto negativo más pronunciado en el cuantil inferior, destacándose como la variedad con mayor riesgo relativo de registrar bajos valores de Falling Number en comparación con Arrayán. Este resultado coincide con lo observado en la figura 10, donde la variedad Osiris fue la que presentó el mayor porcentaje de datos con valores de Falling Number inferiores a 220 segundos. En el cuantil medio, el efecto estimado es cercano a cero, mientras que en el cuantil superior se observa un efecto positivo, lo que indica que Osiris puede alcanzar valores de Falling Number comparables o incluso superiores a los de la variedad base bajo condiciones favorables.

De la misma manera, pero en la figura 17, se observa el efecto estimado de cada variedad sobre la clasificación del grano en distintos cuantiles de la distribución, en comparación con la variedad base (Arrayán).

La situación de las variedades Danielle y Nahara son similares, pudiendo observarse un efecto negativo en los tres cuantiles, esto indica que independientemente del nivel de clasificación considerado, estas variedades presentan una performance inferior a la de Arrayán. Al comparar cada cuantil entre sí, se aprecia que el efecto negativo es más acentuado en el cuantil inferior y va disminuyendo progresivamente hacia el cuantil superior, lo que sugiere que, si bien dichas variedades presentan un mayor riesgo relativo de mala clasificación en los escenarios más desfavorables, su comportamiento mejora en los niveles de mayor calidad.

En contraposición, Fana y Osiris mostraron valores positivos para los tres cuantiles, evidenciando tener mayor calibre respecto a la variedad base en toda la distribución, tanto en los peores casos como en los mejores. Sin embargo, se observa una diferencia en la magnitud del efecto, siendo mayor en los cuantiles inferiores para ambas variedades, indicando que incluso en los escenarios más limitantes tienden a superar a Arrayán. Si bien el efecto positivo disminuye levemente hacia los cuantiles superiores, se mantiene consistentemente por encima de cero, reflejando una elevada estabilidad en la clasificación del grano.

Como complemento de los resultados presentados anteriormente, y con el objetivo de profundizar en la interpretación de los parámetros de calidad evaluados, se presentan a continuación las Tablas 1, 2 y 3 correspondientes al Falling Number, y las Tablas 4, 5 y 6 vinculadas a la Clasificación. La interpretación de dichas tablas se desarrolla a continuación.

4.7 Factores ambientales y varietales asociados a la calidad del grano (Falling Number y Clasificación).

4.7.1 Falling Number.

Tabla 1

Comparación de Falling Number entre variedades comerciales mediante modelo GAM

	Estimación	Significancia
Intercepto	291,5	***
Danielle	3,5	ns
Fana	8,6	ns
Nahara	-4,2	ns
Osiris	-18.9	*

Nota. ns = no significativo; “.” p < 0,1; “*” p < 0,05; “**” p < 0,01; “***” p < 0,001. Variedad base = Arrayán.

En la Tabla 1 se observa que, para las variedades Danielle, Fana y Nahara, los valores promedio de Falling Number no difirieron significativamente respecto a la variedad de referencia. En cambio, Osiris fue la única variedad que mostró una diferencia estadísticamente confiable en relación con Arrayán, con un valor de Falling Number en promedio 19 segundos inferior. Esta performance coincide con lo observado en las Figuras 10 y 16.

Tabla 2

Relación de variables ambientales y geográficas con el Falling Number mediante modelo GAM

	edf	Significancia
s (longitud, latitud)	2	**
s (Tmedia floración a P1)	2,2	ns
s (Tmedia P1 a P2)	1	ns
s (Tmedia P2 a MF)	1	ns
s (Tmedia MF a cosecha)	1	ns
s (precipitación floración a P1)	3,5	*
s (precipitación P1 a P2)	1	ns
s (precipitación P2 a MF)	2,8	ns
s (precipitación MF a cosecha)	1	ns

Nota. ns = no significativo; “.” $p < 0,1$; “*” $p < 0,05$; “***” $p < 0,01$; “****” $p < 0,001$. Variedad base = Arrayán.

La Tabla 2 evidencia, en primer lugar, que la localización espacial presenta un efecto significativo sobre el Falling Number, confirmando lo observado en el mapa de la figura 10: la existencia de una tendencia regional, con valores inferiores hacia el sur y un incremento progresivo a medida que disminuye la latitud.

Con respecto al efecto de la temperatura en las distintas etapas fenológicas evaluadas, en ninguno de los tramos la temperatura media resultó significativa sobre el índice de caída. En otras palabras, en este conjunto de datos la variabilidad de dicho parámetro no se explica principalmente por la temperatura.

Distinto fue lo ocurrido con las precipitaciones, donde en el período inmediato a la floración se registró un efecto significativo sobre el Falling Number. Este resultado coincide con lo dicho por Gualano y Benech-Arnold (2009), que la ocurrencia de precipitaciones durante el llenado de granos, cuando el nivel de dormición es reducido, puede favorecer eventos de pregerminado o brotado precosecha, lo que se traduce en caídas de este parámetro.

Tabla 3
Resultados de la regresión por cuantiles para Falling Number

	Cuantil 0,25		Cuantil 0,50		Cuantil 0,75	
	Estimación	Significancia	Estimación	Significancia	Estimación	Significancia
Intercepto	281,6	***	306,2	***	324,6	***
Danielle	-8,9	ns	2,5	ns	8,1	ns
Fana	-6,2	ns	11,7	ns	8,1	ns
Nahara	-30,1	*	-0,03	ns	8,1	ns
Osiris	-57,2	*	-18,5	*	9,2	ns
Longitud	2,9	ns	-0,2	ns	-2,5	ns
Latitud	15,8	*	11,03	**	5,5	ns
I (longitud²)	2,1	ns	-0,3	ns	-0,2	ns
I (latitud²)	-2,8	ns	-0,9	ns	-1,5	ns
I (lon x lat)	-2,4	ns	-3,2	ns	-3,6	ns
Tmedia flor a P1	-18,9	ns	-8,6	ns	-10,1	*
Tmedia P1 a P2	10,1	ns	1,4	ns	0,2	ns
Tmedia P2 a MF	-2,9	ns	0,3	ns	1,1	ns
Tmedia MF a cosecha	2,6	ns	-1,5	ns	-0,9	ns
Precipitación flor a P1	-1,8	ns	2,1	ns	3,002	ns
Precipitación P1 a P2	-11,9	ns	-2,1	ns	0,5	ns
Precipitación P2 a MF	5,1	ns	-0,6	ns	0,1	ns
Precipitación MF a cosecha	1,7	ns	-4,9	ns	-2,5	ns

Nota. ns = no significativo; “.” p < 0,1; “*” p < 0,05; “***” p < 0,01; “****” p < 0,001. Variedad base = Arrayán

En la Tabla 3 se representa la distribución de los valores de Falling Number divididos en tres fracciones: los valores más bajos (cuantil 0,25), los valores medios (cuantil 0,50) y los valores más elevados (cuantil 0,75), con el objetivo de analizar las relaciones en cada caso. En el cuantil inferior se observa que las variedades Nahara y Osiris presentan un Falling Number significativamente inferior a la variedad base, lo que evidencia su menor desempeño en ese contexto.

La latitud volvió a mostrarse como un factor relevante, observándose una asociación entre parte de la variabilidad del Falling Number y la localización geográfica donde se desarrolló el cultivo.

En lo que respecta al cuantil 0,5, Danielle, Fana y Nahara se comportan de manera similar a la variedad Arrayán. En cambio, Osiris vuelve a mostrar una diferencia significativa, confirmando su mayor vulnerabilidad respecto al Falling Number, incluso en valores centrales. En este caso, el efecto significativo de la latitud se refuerza, lo que coincide con lo señalado anteriormente sobre la influencia de la localización geográfica.

En el caso de los valores más altos de Falling Number (cuantil 0,75), ninguna de las variedades presentó diferencias significativas respecto a la variedad de referencia, incluida Osiris. Esto sugiere que dicha variedad manifiesta problemas principalmente cuando los valores del parámetro son bajos o medios, es decir, en condiciones de manejo y ambiente menos favorables que conducen a situaciones de mayor riesgo productivo.

4.7.2 Clasificación.

En lo que respecta a la característica de clasificación del grano, los resultados muestran diferencias varietales altamente significativas respecto a la variedad de referencia (Arrayán). En este sentido, Fana y Osiris se destacan positivamente, presentando valores superiores en la clasificación, mientras que Danielle y Nahara exhiben un desempeño inferior. Estos hallazgos evidencian que la elección varietal constituye un factor determinante en la calidad de clasificación del grano, aportando ventajas claras en algunas variedades y riesgos de menor calidad en otras (Tabla 4).

Tabla 4

Comparación de Clasificación entre variedades comerciales mediante modelo GAM

	Estimación	Significancia
Intercepto	89,6	***
Danielle	-5	***
Fana	5,2	***
Nahara	-4,8	***
Osiris	3,6	***

Nota. ns = no significativo; “.” p < 0,1; “*” p < 0,05; “**” p < 0,01; “***” p < 0,001. Variedad base = Arrayán.

Tabla 5

Relación de variables ambientales y geográficas con la Clasificación mediante modelo GAM

	edf	Significancia
s (longitud, latitud)	13,4	***
s (Tmedia floración a P1)	1	ns
s (Tmedia P1 a P2)	2,4	ns
s (Tmedia P2 a MF)	3,2	***
s (Tmedia MF a cosecha)	1,9	ns
s (Precipitaciones floración a P1)	1	ns
s (Precipitaciones P1 a P2)	1	ns
s (Precipitaciones P2 a MF)	1,3	ns
s (Precipitaciones MF a cosecha)	1,1	ns

Nota. ns = no significativo; “.” $p < 0,1$; “*” $p < 0,05$; “**” $p < 0,01$; “***” $p < 0,001$. Variedad base = Arrayán.

En la Tabla 5 se observa que la localización geográfica resultó altamente significativa, lo que indica que el calibre del grano mantiene una relación estrecha con el sitio del cultivo, probablemente asociada a las condiciones edafoclimáticas presentes en cada región. Asimismo, la temperatura media durante el último tercio del llenado de grano se presenta como el otro factor con influencia significativa sobre la clasificación del grano. En contraste, las precipitaciones y las temperaturas correspondientes a otros períodos fenológicos no muestran efectos estadísticamente relevantes.

Tabla 6
Resultados de la regresión por cuantiles para Clasificación

	Cuantil 0,25		Cuantil 0,50		Cuantil 0,75	
	Estimación	Significancia	Estimación	Significancia	Estimación	Significancia
Intercepto	87,8	***	91,3	***	93,6	***
Danielle	-6,1	***	-4,3	***	-2,8	***
Fana	-5,1	***	3,9	***	3	***
Nahara	-5,5	***	-4,5	***	-2,7	***
Osiris	-6,9	***	2,5	***	1,7	*
Longitud	-0,2	ns	-0,3	ns	-0,2	ns
Latitud	-3,1	***	-1,6	***	-0,9	**
I (Longitud²)	-0,7	.	0,3	.	-0,4	*
I (Latitud²)	-0,1	ns	-0,2	ns	-0,3	**
I (Lon x Lat)	-0,1	ns	-0,8	.	-0,5	*
Tmedia flor a P1	0,3	ns	0,3	ns	-0,1	ns
Tmedia P1 a P2	0,6	ns	-0,01	ns	0,1	ns
Tmedia P2 a MF	2,2	**	1,5	**	-0,4	**
Tmedia MF a cosecha	0,2	*	0,8	*	0,5	*
Precipitación flor a P1	-0,5	ns	-0,2	ns	-0,3	ns
Precipitación P1 a P2	0,1	ns	0,2	ns	0,3	ns
Precipitación P2 a MF	0,4	ns	0,3	ns	0,4	ns
Precipitación MF a cosecha	0,2	ns	0,1	ns	0,1	ns

Nota. ns = no significativo; "." p < 0,1; "*" p < 0,05; "***" p < 0,01; "****" p < 0,001. Variedad base = Arrayán.

Con respecto a los resultados obtenidos mediante la regresión por cuantiles para el caso de la clasificación, se aprecia que en el cuantil 0,25, todas las variedades analizadas muestran un valor negativo y significativo respecto a la variedad Arrayán. Esto indica que, en el extremo inferior de la distribución, dichas variedades tienden a presentar un calibre más reducido en comparación con la referencia. En lo que respecta a los factores espaciales, la latitud exhibe un coeficiente altamente significativo, lo que sugiere que el calibre del grano está fuertemente influenciado por la ubicación del cultivo. Finalmente, al analizar los parámetros ambientales, la precipitación no evidencia un efecto sobre la clasificación; sin embargo, la temperatura media hacia el final del ciclo del cultivo registra una estimación positiva y significativa sobre el tamaño de los granos, confirmando que temperaturas más elevadas en ese momento favorecen un calibre superior (Tabla 6).

La tendencia del efecto variedad cambia al analizar el cuantil 0,50, mostrando un patrón más heterogéneo: Danielle y Nahara continúan con valores negativos y significativos, mientras que Fana y Osiris registran valores positivos de clasificación, lo que indica una mejora en el calibre respecto a la variedad base. En este caso, la latitud sigue siendo significativa, aunque con menor magnitud que en el cuantil inferior. La temperatura mantiene estimaciones positivas y significativas, con la diferencia de que la magnitud en la etapa comprendida entre P2 y MF se reduce, mientras que la correspondiente a la fase siguiente aumenta levemente (Tabla 6).

Danielle y Nahara mostraron una respuesta negativa en toda la distribución de clasificación, sin ser la excepción en el extremo superior, donde se registran los mayores valores de dicho parámetro (cuantil 0,75); aun así, estas variedades tienden a presentar un calibre más reducido respecto a Arrayán. En contraste, Fana y Osiris mantienen una tendencia positiva que indica una mejora en el calibre de los granos de estas variedades por encima de la referencia. La latitud continúa siendo significativa y negativa, aunque con menor magnitud que en los cuantiles inferiores, lo que indica que la ubicación geográfica sigue influyendo en el calibre, pero de manera más atenuada. Además, resultan significativos los términos cuadráticos de longitud y latitud, así como la interacción $lon \times lat$, lo que sugiere que la relación espacial con el calibre es más compleja en los valores altos. Con respecto a la temperatura, la tendencia en este caso se revierte, mostrando un coeficiente significativo pero negativo, lo que indica que, en los granos de mayor calibre, temperaturas más elevadas en la fase P2 a MF pueden reducir el tamaño del grano (Tabla 6).

Los resultados obtenidos demuestran, en primer lugar, que la siembra correspondiente a la zafra 2024 se desarrolló con normalidad, dado que el régimen hídrico de ese período no generó inconvenientes para llevar a cabo la actividad. Asimismo, el modelo predictivo demostró ser adecuado, logrando estimar con precisión los días desde la siembra hasta la floración y la madurez fisiológica en todas las variedades evaluadas. Esta herramienta resulta valiosa para la toma de decisiones relacionadas con el manejo del cultivo, permitiendo coordinar de mejor manera los eventos fenológicos con los climáticos, con el objetivo de alcanzar un buen desempeño en la calidad de los granos cosechados. En cuanto al comportamiento varietal, Fana fue la variedad que presentó mejores resultados tanto en clasificación como en Falling Number. Por el contrario, las variedades europeas Danielle y Nahara mostraron un desempeño más pobre en clasificación, registrando una mayor proporción de chacras

con valores inferiores al 80 %, mientras que Osiris fue la variedad con peor comportamiento en Falling Number.

Respecto a la influencia del ambiente sobre los dos parámetros de calidad analizados, en las condiciones estudiadas el Falling Number se asoció con las precipitaciones y la temperatura media durante el primer tercio de la etapa de llenado de grano, identificándose este período como potencialmente crítico para la definición de dicho parámetro. Estos resultados coinciden parcialmente con antecedentes previos, los cuales reportan que las condiciones ambientales durante el llenado y maduración del grano pueden afectar significativamente la actividad enzimática y, en consecuencia, el Falling Number. Justamente, los resultados obtenidos muestran coincidencias parciales con los antecedentes reportados por Rodríguez et al. (2001), quienes señalaron la existencia de una ventana crítica durante el llenado de grano para la definición de atributos de calidad. No obstante, en este estudio las asociaciones observadas para Falling Number se registraron principalmente durante el primer tercio de dicha etapa. Por su parte, el calibre mostró asociación con la temperatura media registrada durante el último tercio del llenado de grano e incluso entre la madurez fisiológica y la cosecha, lo que sugiere una fuerte influencia de las condiciones térmicas tardías sobre el desarrollo final del grano. Finalmente, la ubicación geográfica de cada cultivo también presentó asociación significativa con la calidad del grano. En particular, la latitud, y en algunos casos la longitud o su interacción, se relacionaron tanto con el Falling Number como con el calibre.

5 CONCLUSIÓN

En el presente trabajo, se logró mediante el uso de un modelo predecir de manera precisa la fenología del cultivo de cebada, pudiendo determinar aproximadamente en qué momento se lleva a cabo el llenado de grano. Esta reconstrucción fenológica permitió integrar la información climática y varietal, y aplicar el modelo a nivel productivo a través de la base de datos comercial de Maltería Oriental S.A. Con ello fue posible observar las correlaciones entre las variedades comerciales más utilizadas en Uruguay, las condiciones ambientales (temperatura, precipitaciones y ubicación geográfica) y las características de calidad evaluadas, identificando los momentos específicos del llenado de grano en los que dichas relaciones resultaron más significativas.

Se comprobó que el período de mayor susceptibilidad para el Falling Number correspondió al primer tercio del llenado de grano, influido tanto por las precipitaciones como por las temperaturas presentes en esa etapa, traducido en una disminución de este parámetro. En cuanto al calibre, se observó una relación significativa con la temperatura media registrada hacia el final del llenado de grano, particularmente en el último tercio e incluso en la etapa posterior previo a la cosecha. Esto difiere de los antecedentes que indican que el periodo de determinación de la calidad, particularmente en lo que respecta al Falling Number, se ubica en el último tercio del llenado de grano, etapa en la cual este parámetro se muestra más sensible a las condiciones ambientales. Esta discrepancia sugiere que la sensibilidad del Falling Number al ambiente podría manifestarse en etapas más tempranas de lo previamente establecido, al menos bajo las condiciones de producción analizadas. En este sentido, es posible que factores como la variabilidad ambiental, las características de los cultivares evaluados o la escala del estudio (condiciones reales de producción) estén influyendo en la dinámica de determinación de este parámetro. Esto resalta la importancia de continuar profundizando en el análisis de la determinación de los parámetros de calidad y su interacción con el ambiente, con el fin de mejorar la comprensión de los factores que determinan la calidad comercial de la cebada cervecera.

Finalmente, se evidenció una asociación significativa entre la localización geográfica de la producción (latitud, longitud y su interacción) y los atributos de calidad analizados. Este comportamiento podría estar relacionado con diferencias regionales en las condiciones ambientales durante el llenado de grano, particularmente en temperatura y precipitaciones. En este sentido, la caracterización climática realizada mostró un aumento progresivo de las temperaturas hacia etapas finales del llenado y una elevada variabilidad en las precipitaciones acumuladas entre subperíodos y ambientes productivos, lo que podría contribuir a explicar parte de la variabilidad observada en el Falling Number y el calibre.

No obstante, debe considerarse que los datos climáticos utilizados provinieron de la base NASA POWER, la cual proporciona estimaciones satelitales y no mediciones puntuales a campo, por lo que existe cierto grado de incertidumbre asociado a dichas variables. Esta limitación podría ser particularmente relevante en el caso de las precipitaciones, debido a su elevada variabilidad espacial y temporal, mientras que las estimaciones de temperatura suelen presentar mayor estabilidad y precisión.

El Falling Number se encuentra directamente asociado a la actividad de la enzima alfa-amilasa, la cual se incrementa en situaciones de pregerminado y/o brotado

precosecha. Estos procesos están estrechamente vinculados al nivel de dormición del grano al momento de la madurez. Durante el período de llenado de grano, las condiciones ambientales cumplen un rol clave en la regulación de dicha dormición. En particular, temperaturas elevadas durante esta etapa, en la que tienen lugar procesos fisiológicos determinantes en el desarrollo del grano, pueden inducir una pérdida prematura de la dormición. Esta condición aumenta la susceptibilidad del grano a germinar ante la ocurrencia de precipitaciones. En presencia de humedad suficiente, se desencadenan procesos de imbibición que activan la germinación, promoviendo la síntesis y actividad de enzimas hidrolíticas, principalmente alfa-amilasa. Como consecuencia, se produce la degradación del almidón del endosperma, lo que reduce la viscosidad de la suspensión utilizada en el ensayo y, por ende, se traduce en valores más bajos de Falling Number. En este sentido, la interacción entre altas temperaturas y precipitaciones durante el llenado de grano constituye un factor determinante en la disminución de este parámetro de calidad.

En lo que respecta al calibre del grano, este depende tanto del número de células del endosperma como de la cantidad de reservas acumuladas en el mismo durante el período de llenado. Las altas temperaturas inciden directamente sobre este proceso, ya que incrementan la tasa de llenado, pero reducen su duración. Como resultado, el grano dispone de menos tiempo para acumular almidón, lo que conduce a la formación de granos de menor tamaño y, por ende, de menor calibre. Por su parte, las precipitaciones también influyen sobre este atributo, dependiendo de si se presentan situaciones de déficit o exceso hídrico. En condiciones de déficit, se produce una disminución de la fotosíntesis, lo que reduce la generación de fotoasimilados disponibles para el llenado del grano. En consecuencia, se ve limitado el crecimiento del endosperma, dando lugar a granos de menor calibre. En situaciones de exceso hídrico, si bien no siempre afecta directamente el proceso de llenado, puede generar condiciones predisponentes para el desarrollo de enfermedades, lo que repercute negativamente en la sanidad del cultivo y, en consecuencia, en la eficiencia del llenado del grano.

En lo que respecta al efecto de la localización geográfica sobre la calidad maltera, esta no actúa como un factor aislado, sino como el resultado de la interacción de múltiples variables ambientales y de manejo. Por un lado, la localización determina un gradiente climático que se traduce en diferencias en la temperatura media, la amplitud térmica y el régimen hídrico. En términos generales, hacia el norte del país se registran temperaturas más elevadas, lo que, desde el punto de vista teórico, podría asociarse a una menor dormición del grano y, por ende, a menores valores de Falling Number, así como a una reducción del calibre debido a un acortamiento del período de llenado. Por otro lado, existen diferencias en las características de los suelos según la región, tales como la capacidad de retención de agua, la fertilidad y la profundidad efectiva. Estas propiedades inciden directamente sobre el nivel de estrés hídrico que experimenta el cultivo y sobre la disponibilidad de nutrientes, afectando en consecuencia los procesos de llenado de grano y la determinación de los parámetros de calidad. Adicionalmente, debe considerarse la interacción genotipo $\times$ ambiente, ya que las distintas variedades presentan respuestas diferenciales según las condiciones en las que se desarrollan.

Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo evidencian una tendencia opuesta, con mayores valores de Falling Number en el norte y menores en el sur. Una posible explicación a este comportamiento radica en la interacción entre temperatura y

precipitaciones durante el período crítico. Si bien las temperaturas más elevadas del norte podrían favorecer una menor dormición, la ocurrencia de precipitaciones durante el llenado o previo a la cosecha sería el factor determinante para activar el proceso de germinación. En este sentido, la caracterización climática realizada evidenció una importante variabilidad en las precipitaciones acumuladas entre ambientes productivos y subperíodos del llenado de grano. Esta variabilidad podría contribuir a explicar parte de las diferencias observadas en los valores de Falling Number entre regiones, particularmente si determinados ambientes estuvieron expuestos a condiciones de mayor humedad durante etapas críticas cercanas a la madurez del grano. Asimismo, las temperaturas más elevadas presentes en determinadas regiones podrían haber acelerado el desarrollo fenológico del cultivo, reduciendo levemente la duración del período de llenado de grano. En este sentido, los resultados del modelo fenológico mostraron una tendencia a menores duraciones estimadas del llenado en las chacras ubicadas más al norte, lo que podría haber reducido el tiempo de exposición del grano a condiciones ambientales favorables para el pregerminado y contribuir parcialmente a explicar los mayores valores de Falling Number observados en dichas zonas. Sin embargo, dicha tendencia no se presentó de forma suficientemente marcada ni concluyente como para afirmar con certeza una relación directa entre la localización geográfica y la duración del llenado de grano.

En síntesis, la integración de información fenológica, climática y varietal permitió identificar períodos críticos de susceptibilidad y establecer asociaciones entre el ambiente y la calidad comercial de la cebada cervecera. Los resultados obtenidos evidencian que variables como la temperatura y las precipitaciones durante determinadas etapas del llenado de grano se encuentran asociadas al comportamiento de parámetros industriales como el Falling Number y el calibre comercial.

Asimismo, este trabajo permite visualizar una posible aplicación práctica de este tipo de herramientas dentro de la industria maltera. La disponibilidad de información vinculada a la variedad sembrada, la ubicación geográfica de la chacra y las condiciones ambientales ocurridas durante el ciclo del cultivo podría contribuir a anticipar el riesgo potencial de problemas de calidad industrial y facilitar procesos de clasificación diferencial, segregación y manejo específico de lotes. En este sentido, la posibilidad de estimar las etapas fenológicas críticas del cultivo permitiría relacionar con mayor precisión las condiciones ambientales atravesadas por cada lote con su comportamiento posterior en términos de calidad, aportando herramientas útiles para la toma de decisiones tanto a nivel productivo como industrial.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Abeledo, L. G., Alzueta, I., & Miralles, D. J. (2011). Manejo de la fecha de siembra y la densidad. En D. J. Miralles, R. L. Benech-Arnold & L. G. Abeledo (Eds.), *Cebada cervecera* (pp. 63-90). Universidad de Buenos Aires.
- Arbelbide, M. (1999). *Caracterización fenológica de cultivares y líneas de cebada cervecera* [Trabajo final de grado, Universidad de la Republica]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/45859>
- Arias, G. (1991). *Calidad industrial de la cebada cervecera*. INIA.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2919/1/111219220807120028.pdf>
- Arisnabarreta, S., & Miralles, D. J. (2006). Yield responsiveness in two- and six-rowed barley grown in contrasting nitrogen environments. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 192(3), 178-185. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2006.00203.x>
- Baethgen, W. E., Christianson, C. B., & García Lamothe, A. (1995). Nitrogen fertilizer effects on growth, grain yield, and yield components of malting barley. *Field Crops Research*, 43(2-3), 87-99. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(95\)00034-N](https://doi.org/10.1016/0378-4290(95)00034-N)
- Benech-Arnold, R. L. (2004). Inception, maintenance, and termination of dormancy in grain crops: Physiology, genetics, and environmental control. En R. L. Benech-Arnold & R. A. Sánchez (Eds.), *Handbook of seed physiology: Applications to Agriculture* (pp. 169-198). The Haworth Press.
https://books.google.com.uy/books?hl=en&lr=&id=80dZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA169&dq=info:FSp57SWuEG8J:scholar.google.com&ots=M2SsLLD3ck&sig=4uYc-P04SsKqYU8jH7LWqj0HQAA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Benech-Arnold, R. L., Giallorenzi, C., Frank, J., & Rodriguez, V. (1999). Termination of hull-imposed dormancy in developing barley grains is correlated with changes in embryonic ABA levels and sensitivity. *Seed Science Research*, 9(1), 39-47.
<https://doi.org/10.1017/S0960258599000045>
- Benech-Arnold, R. L., Sánchez, R. A., Forcella, F., Kruk, B. C., & Ghera, C. M. (2000). Environmental control of dormancy in weed seed banks in soil. *Field Crops Research*, 67(2), 105-122. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00087-3)
- Bewley, J. D. (1997). Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*, 9(7), 1055-1066. <https://doi.org/10.1105/tpc.9.7.1055>
- Bewley, J. D., & Black, M. (1994). *Seeds: Physiology of development and germination* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1002-8>
- Brocklehurst, P. A. (1977). Factors controlling grain weight in wheat. *Nature*, 266, 348-349. <https://doi.org/10.1038/266348a0>
- Cammarota Ricco, L. (2021). *Determinación de componentes genéticos que afectan la calidad maltera en germoplasma elite de cebada (Hordeum vulgare L.)* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/33415>

- Castro, A. (2017). Mesa Nacional de Entidades de Cebada Cervecera: 25 años de investigación para la agricultura nacional. *Cangüé*, (38), 4-5.
https://cangue.eemac.edu.uy/index.php?download_pdf=1&pdf_id=218
- Castro, A., Benítez, A., Hayes, P., Viega, L., & Wright, L. (2010). Coincident quantitative trait loci effects for dormancy, water sensitivity and malting quality traits in the BCD47 × Baronesse barley mapping population. *Crop & Pasture Science*, 61(9), 691-699. <https://doi.org/10.1071/CP10085>
- Castro, A., Cammarota, L., Gomez, B., Gutierrez, L., Hayes, P. M., Locatelli, A., Motta, L., & Pieroni, S. (2013). Genome-wide association mapping of malting quality traits in relevant barley germplasm in Uruguay. En G. Zhang, C. Li & X. Liu (Eds.), *Advances in barley sciences* (pp. 37-46). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-4682-4_3
- Castro, A., Castro, M., & Germán, S. (2017). Cambios en la oferta varietal de cebada: Desafíos para la producción. *Cangüé*, (38), 6-12.
https://cangue.eemac.edu.uy/index.php?download_pdf=1&pdf_id=219
- Castro, A., Ernst, O., Hoffman, E., & Bentancur, O. (1997). Barley germoplasm characterization using agronomic and quality traits. *Agrociencia (Uruguay)*, 1(1), 80-87. <https://doi.org/10.31285/AGRO.01.1085>
- Castro, M., Germán, S., Silva, P., & Pereyra, S. (s.f.). *Caracterización sanitaria de cultivares de cebada y trigo*. INIA.
https://inia.uy/sites/default/files/pdf/Caracterizaci%C3%B3n%20sanitaria%202024%20pub%202025_2.pdf
- Cattáneo, M. (2011). Los mercados de cebada cervecera en la Argentina y en el mundo. En J. Miralles, L. Benech-Arnold & G. Abeledo (Eds.), *Cebada cervecera* (pp. 275-284). Universidad de Buenos Aires.
- Ceretta, S., van Eeuwijk, F. A., Castro, M., Vilaró, D., & Abadie, T. (2000). *Variabilidad en el rendimiento de cultivares de cebada cervecera en Uruguay*. INIA.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2860/1/111219240807140636.pdf>
- Cervera Ral, P., & Reixach Coll, M. (2005). Alimentación de los pueblos prerromanos en la península ibérica. En J. Salas-Salvadó, P. García-Lorda & J. M. Sánchez Ripollés (Eds.), *La alimentación y la nutrición a través de la historia* (pp. 113-131). Editorial Glosa. https://books.google.com.uy/books?id=7StHfcrJBTcC&pg=PA35&hl=es&source=gbp_toc_r&cad=2#v=onepage&q=cebada&f=false
- Chowdhury, S. I., & Wardlaw, I. F. (1978). The effect of temperature on kernel development in cereals. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(2), 205-223. <https://doi.org/10.1071/AR9780205>
- Decreto n° 708/978. (1978). IMPO. <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-originales/708-1978>
- Díaz Lago, J. E. (2013, 30 de octubre). *Situación del cultivo y la industria en Uruguay* [Contribución]. 4° Congreso Latinoamericano de Cebada, Bahía Blanca, Argentina. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/3092/1/Diaz-Lago.pdf>

- Díaz Lago, J. E., & Germán, S. (2005). Cebadas INIA: Primeras variedades de un joven programa de mejoramiento genético. *Revista INIA*, (3), 12-14.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/216/1/111219220807150419.pdf>
- Díaz, A., & Rava, C. (2024). Cebada y malta: Situación y perspectivas. En *Anuario OPYPA 2024* (pp. 1-25). MGAP.
<https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2024/CP/8/CP8web/CP8-Cebadacerveceraymalta.pdf>
- Finch-Savage, W. E., & Leubner-Metzger, G. (2006). Seed dormancy and the control of germination. *New Phytologist*, 171(3), 501-523.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01787.x>
- Galante, L. E. (2005). *Relación entre características de cebada y de calidad de malta para cultivares y líneas experimentales en evaluación* [Trabajo final de grado, Universidad de la Republica]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/34214>
- Gualano, N. A., & Benech-Arnold, R. L. (2009). Predicting pre-harvest sprouting susceptibility in barley: Looking for “sensitivity windows” to temperature throughout grain filling in various commercial cultivars. *Field Crops Research*, 114(1), 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.016>
- Gualano, N. A., Del Fueyo, P., Mendiondo, G., Benech-Arnold, R. L., & Rodríguez, M. (2011). Implicancias de la dormición en la producción y utilización del cultivo. En D. J. Miralles, R. L. Benech-Arnold & L. G. Abeledo (Eds.), *Cebada cervecera* (pp. 171-204). Universidad de Buenos Aires.
- Hoffman, E., Fassana, N., Akerman, A., Van del Dorpell, M. & Soria, S. (2019). *Caracterización de cultivares de cebada cervecera 2019: Evaluación año 2018*. Universidad de la República. <https://portal.fagro.edu.uy/wp-content/uploads/2024/10/Informe-Characterizacin-Cebada-2018-FAgro-EEMAC-2019.pdf>
- Hough, J. (1990). *Biología de la cerveza y de la malta*. Acribia. <http://www.bionica.info/biblioteca/HoughxxxBiologiaCerveza.pdf>
- Hugo, W., & Godiño, M. (2000). *Tecnología de almacenamiento de granos de trigo*. INIA. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2025-10/st-107-2000.pdf>
- Instituto Nacional de Semillas & Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2024). *Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de cebada: Período 2023*. https://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/Evaluacion_CI/Ano2023/PubCebadaPeriodo2023.pdf
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (2024). *2024: Boletín climático*. <https://www.inumet.gub.uy/sites/default/files/2025-02/Boletin%20Climatico%20Anual%202024.pdf>
- MacGregor, A. W. (1996). Malting and brewing science: Challenges and opportunities. *Journal of the Institute of Brewing*, 102(2), 97-102.
<https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.1996.tb00900.x>
- Miralles, D. J., Arisnabarreta, S., & Alzueta, I. (2011). Desarrollo ontogénico y Generación del rendimiento. En D. J. Miralles, R. L. Benech-Arnold & L. G. Abeledo (Eds.), *Cebada cervecera* (pp. 1-34). Universidad de Buenos Aires.

- Miralles, D. J., González, F. G., Abeledo, L. G., Serrago, R. A., Alzueta, I., García, G. A., de San Caledonio, R. P., & Lo Valvo, P. (Eds.). (2014). *Manual de trigo y cebada para el Cono Sur: Procesos fisiológicos y bases de manejo*. CYTED.
- Mirschel, W., Wenkel, K. O., Schultz, A., Pommerening, J., & Verch, G. (2005). Dynamic phenological model for winter rye and winter barley. *European Journal of Agronomy*, 23, 123-135.
https://publications.zalf.de/publications/1917_Mirschel_2005_Dynamic%20phenological.pdf
- National Aeronautics and Space Administration. (s.f.). *NASA POWER*.
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2025). *Anuario estadístico agropecuario 2025*. MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2025/ANUARIO2025.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.). *FAOSTAT: Cultivos y productos de ganadería*.
<https://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Otero, E. A. (2022). *Determinación de ventanas de sensibilidad a la temperatura durante el llenado de los granos, para la definición de la calidad maltera en cebada cervecera* [Disertación doctoral, Universidad de Buenos Aires]. FAUBA Digital. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2023oteroenriquearil.pdf>
- Otero, E. A., Miralles, D. J., & Benech-Arnold, R. L. (2021). Development of a precise thermal time model for grain filling in barley: A critical assessment of base temperature estimation methods from field-collected data. *Field Crops Research*, 260, Artículo e108003. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108003>
- Passarella, V. S., Savin, R., & Slafer, G. A. (2002). Grain weight and malting quality in barley as affected by brief periods of increased spike temperature under field conditions. *Australian Journal of Agricultural Research*, 53(11), 1219-1227.
<https://doi.org/10.1071/AR02096>
- Perten, H. (1964). Application of the falling number method for evaluating α -amylase activity. *Cereal Chemistry*, 41, 127-140.
https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1964/Documents/chem41_127.pdf
- Prystupa, P., & Ferraris, G. (2011). Nutrición mineral y fertilización. En D. J. Miralles, R. L. Benech-Arnold & L. G. Abeledo (Eds.), *Cebada cervecera* (pp. 35-62). Universidad de Buenos Aires.
- Récords y desafíos en la cadena de la cebada y la malta en Uruguay (2025, 3 de febrero). *El País*. <https://rurales.elpais.com.uy/agricultura/records-y-desafios-en-la-cadena-de-la-cebada-y-la-malta-en-uruguay>
- Rodríguez, M. V., Margineda, M., González-Martín, J. F., Insausti, P., & Benech-Arnold, R. L. (2001). Predicting preharvest sprouting susceptibility in barley: A model based on temperature during grain filling. *Agronomy Journal*, 93(5), 1071-1079. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.9351071x>

- Savin, R., & Aguinaga, A. (2011). Los requerimientos de la industria: Calidad comercial e industrial y sus determinantes. En J. Miralles, L. Benech-Arnold & G. Abeledo (Eds.), *Cebada cervecera* (pp. 205-241). Universidad de Buenos Aires.
- Savin, R., & Nicolas, M. E. (1996). Effects of short periods of drought and high temperature on grain growth and starch accumulation in two malting barley cultivars. *Australian Journal of Plant Physiology*, 23(2), 201-210.
<https://doi.org/10.1071/PP9960201>
- Savin, R., & Nicolas, M. E. (1999). Effects of timing of heat stress and drought on growth and quality of barley grains. *Australian Journal of Agricultural Research*, 50(3), 357-364. <https://doi.org/10.1071/A98080>
- Stewart, S. (1996). Sanidad de semilla de trigo y cebada. En M. Díaz (Ed.), *Manejo de enfermedades en cereales de invierno y pasturas* (pp. 11-24). INIA.
<https://inia.uy/sites/default/files/publications/2025-11/st-74-1996.pdf>
- Teigeira, M., Goday, S., Baraibar, S., & Kavanová, M. (2022). Implementación de selección asistida por marcadores moleculares para fenología en el Programa de Mejoramiento Genético de Cebada de INIA. *Revista Tellus*, 1(1), 26-39.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/18712/1/Teigeira-et.al-RevistaTellus-N-001-2022-02.pdf>
- Verocai Britos, M. L. (2021). *Identificación de los componentes genéticos que determinan la adaptación de cebada (Hordeum vulgare L.) en condiciones de alto rendimiento* [Tesis de maestría. Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/32664>
- Verocai, M., & Castro, A. (2024). Evaluación nacional de cultivares de trigo, cebada y colza: Reflexiones sobre sus últimas modificaciones. *Cangüé*, (47), 4-9.
https://cangue.eemac.edu.uy/index.php?download_pdf=1&pdf_id=67

7 ANEXO

Figura A1

Histograma de residuos del modelo de predicción para días hasta floración.

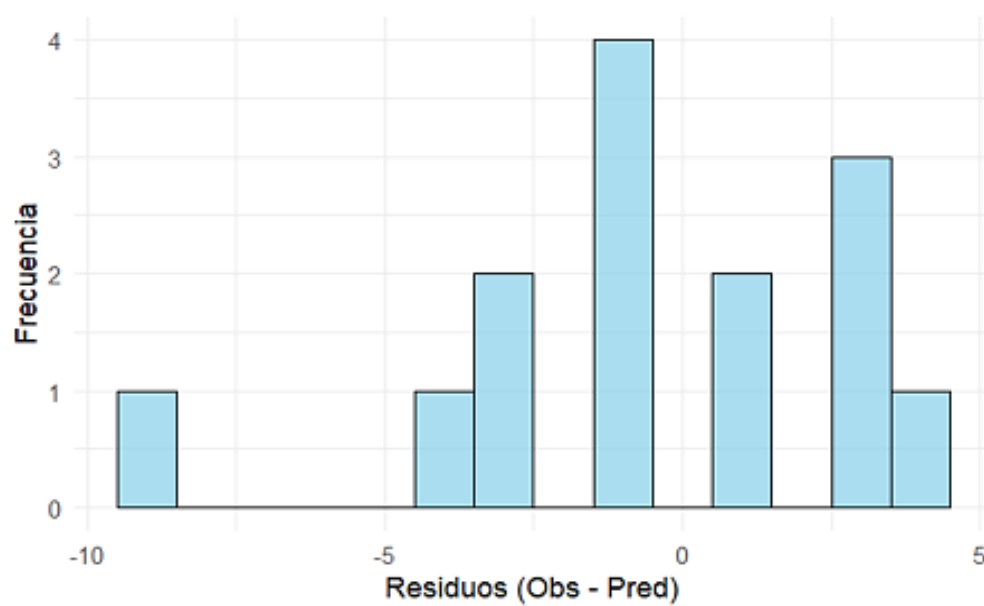


Figura A2

Histograma de residuos del modelo de predicción para días hasta madurez fisiológica.

