

---

**CUANTIFICACIÓN DE LA MICOTOXINA  
DEOXINIVALENOL EN VARIEDADES DE CEBADA  
CERVECERA EXPUESTAS A DIFERENTES  
AMBIENTES**



Alumno: Joaquín Conti

Tutor: Diego Zappacosta

Consejeros: Juan Facundo Daddario  
Guadalupe Traversa

Consejeros externos: Verónica Conti (INTA Bahía Blanca)

**Departamento de Agronomía**

**Universidad Nacional del Sur**

**Marzo 2024**

# ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ÍNDICE</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....  | <b>2</b>  |
| <b>RESUMEN</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....  | <b>4</b>  |
| 1.1. EL CULTIVO DE LA CEBADA EN LA ARGENTINA .....  | 4         |
| 1.2. FUSARIOSIS DE LA ESPIGA (FE) .....   | 7         |
| 1.3. CICLO DE INFECCIÓN DE <i>FUSARIUM GRAMINEARUM</i> .....  | 8         |
| 1.4. SÍNTOMAS Y SIGNOS .....  | 9         |
| 1.5. MICOTOXINAS .....  | 10        |
| 1.6. RED NACIONAL DE CEBADA CERVECERA .....   | 11        |
| <b>2. HIPÓTESIS</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>3. OBJETIVOS</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....  | <b>12</b> |
| 4.1. MATERIALES EVALUADOS .....   | 12        |
| 4.2. AMBIENTES .....  | 12        |
| 4.3. CUANTIFICACIÓN DE DON .....  | 13        |
| 4.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....   | 15        |
| <b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....  | <b>16</b> |
| <b>6. SITUACIÓN MUNDIAL DE LA BÚSQUEDA DE RESISTENCIA A FUSARIOSIS DE LA ESPIGA EN TRIGO Y CEBADA</b> |           |
| 6.1. MEJORAMIENTO Y TIPOS DE RESISTENCIA .....  | 19        |
| 6.2. FUENTES DE RESISTENCIA EN TODO EL MUNDO.....   | 20        |
| 6.3. DETERMINANTES GÉNICOS DE RESISTENCIA A FE .....  | 21        |
| 6.4. DETOXIFICACIÓN DE MICOTOXINAS .....  | 23        |
| 6.5. USO DE INDUCTORES DE DEFENSA .....   | 23        |
| 6.6. MEDIDAS PARA MINIMIZAR EL RIESGO DE LA ENFERMEDAD .....  | 24        |
| <b>7. CONCLUSIONES</b> .....  | <b>24</b> |
| <b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....  | <b>25</b> |

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer de corazón a todas aquellas personas que formaron parte en mi proceso de formación profesional y personal. Fueron años de mucho aprendizaje, de cambios grandes y muchos desafíos. Sin la contención de ustedes el “camino” no hubiera sido tan lindo como lo fue. Hoy estoy culminando una etapa importantísima y la satisfacción más grande es poder compartirlo con todos ustedes.

A Flor y Román. Gracias por aparecer en mi vida y enseñarme tanto cada día. Me hacen muy feliz, los amo con el alma.

A mis viejos y hermanos, gracias por estar siempre para mí, darme confianza y hacerme sentir capaz de lograr cualquier cosa.

A mis amigos, los años universitarios necesitaron de ustedes para distraerme y darme muchos momentos de alegría que guardo en lo más profundo.

A mis compañeros y amigos Universitarios, por hacerme disfrutar 10 veces más la carrera.

A todos los docentes y a la Universidad nacional del Sur por sus enseñanzas.

A todos los que hicieron posible este proyecto, especialmente a Diego, por su insistencia y predisposición absoluta para conmigo. Esta tesis es tuya también.

A Facu y Guada por sus correcciones finales que me permitieron darle un cierre a esta investigación.

## RESUMEN

La cebada es el cuarto cereal más cultivado a nivel mundial, siendo Argentina el principal productor sudamericano. La fusariosis de la espiga (FE) es una enfermedad que afecta a este cultivo y otros cereales. En los últimos años, su frecuencia y severidad ha ido aumentando en nuestro país y en varias otras zonas productoras del mundo dado por, entre otros factores, el cambio climático y el incremento en la adopción de prácticas agrícolas conservacionistas. Las pérdidas de rendimiento pueden ser significativas, alcanzando hasta el 50% en condiciones severas. Esta enfermedad es causada por varias especies de *Fusarium*, siendo *F. graminearum* la más relevante en la región pampeana. El patógeno produce micotoxinas, como el deoxinivalenol (DON), que se almacenan en granos infectados incluso después de ser procesados y pueden afectar la salud humana y animal. La industria cervecera ha intensificado los controles en el contenido de DON en los lotes recibidos, rechazando aquellos con niveles superiores a 0,5 ppm, aunque en años con alta incidencia de la enfermedad se ha permitido hasta 2 ppm. El INTA Bordenave y la Cámara de la Industria Cervecera Argentina llevan a cabo anualmente una red de ensayos (REC) para estudiar el comportamiento de variedades de cebada cervecera en diferentes condiciones climáticas. En este trabajo, se analizaron muestras de granos de cebada de la REC para determinar la presencia y concentración de DON, en distintas variedades y líneas comerciales de cebada, con y sin aplicación de fungicida foliar. En el año 2020, en cada uno de los 22 ambientes seleccionados distribuidos en la zona de la producción de cebada, se sembraron un total de 18 materiales, incluyendo 12 cultivares comerciales y 6 líneas experimentales. Se aplicó el fungicida foliar Orquesta® Ultra Basf (Fluxapyroxad 5% + Pyraclostrobin 8,1% + Epoxiconazole 5%) a una dosis de 1200 cm<sup>3</sup>/ha en estado de hoja bandera para evaluar el efecto del tratamiento en la aparición de enfermedades. La cuantificación del contenido de DON en los granos se realizó mediante un equipo Quickscan (Enviroligix), utilizando tiras reactivas DON Flex AQ-304-BG. Aunque solo cinco de los ambientes evaluados mostraron presencia de DON, se encontraron diferencias significativas entre los genotipos en cuanto a su concentración. La mayoría de las variedades superaron el límite de tolerancia de 0,5 ppm en los ambientes con presencia de DON, lo que sugiere una falta de resistencia genética y la influencia predominante de las condiciones climáticas en la incidencia de la enfermedad. La búsqueda de variedades de cebada resistentes a FE está en curso y se han realizado numerosas investigaciones para comprender las complejas reacciones que ocurren en diferentes biotipos de cebada frente al ataque de *F. graminearum*. Sin embargo, esto no es una tarea fácil, ya que es un rasgo controlado por múltiples genes y afectado por factores ambientales y existen pocas fuentes de resistencia en el acervo genético de la especie.

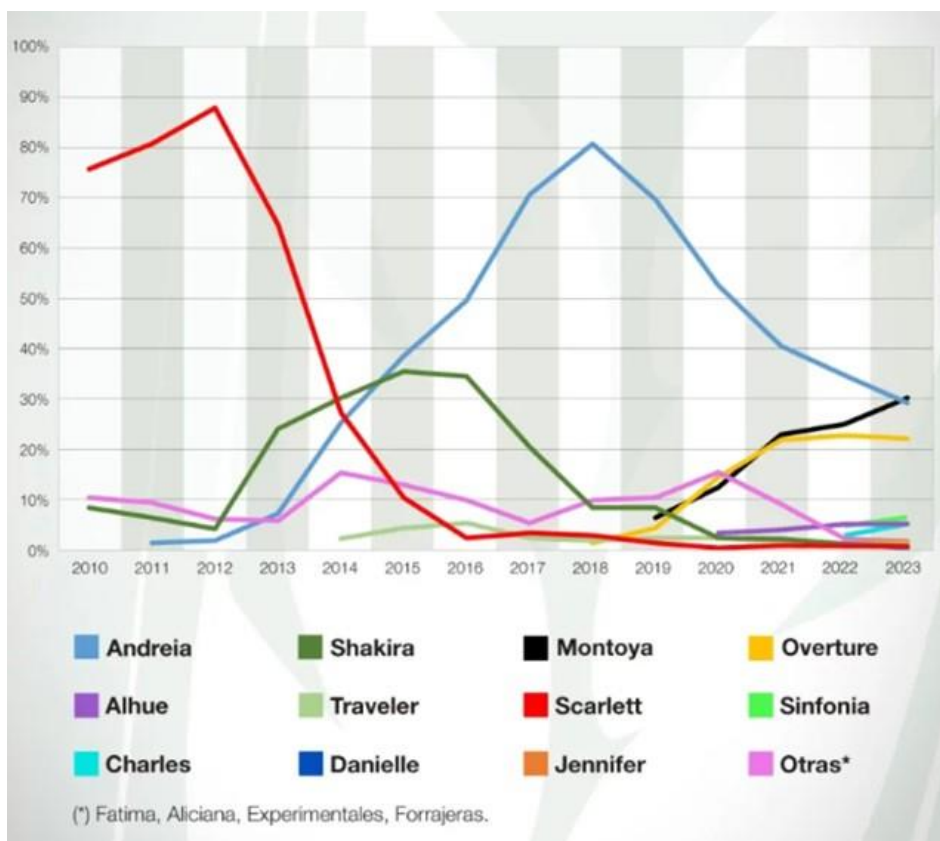
## 1- INTRODUCCIÓN

### 1.1 El cultivo de la cebada en la Argentina

La cebada (*Hordeum vulgare*) es el cuarto cereal más cultivado a nivel mundial, estando detrás del maíz, el trigo y el arroz. Según datos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), los principales productores son la Unión Europea, Rusia, Canadá, Ucrania, Australia, EE.UU. y Argentina. Este cereal histórico siempre tuvo mucha importancia para nuestro país, que se posiciona como el 1° productor sudamericano. La región pampeana tiene las condiciones ideales para este cereal de invierno que junto al trigo se extienden por las grandes extensiones. Con el crecimiento de la industria cervecera, la producción mundial de cerveza aumentó un 40% en los últimos 10 años (Miralles et al., 2011), propiciándole a la Argentina una situación ideal para avanzar sobre este mercado que se abría a pasos agigantados. Este fuerte aumento en la demanda impulsó a la industria cervecera y maltera a buscar y desarrollar nuevos materiales genéticos en nuestro país, incrementando su participación en el mercado de cebada. En la Tabla 1 y en la Figura 1 podemos ver el porcentaje estimado de superficie sembrada que ocupan las variedades comerciales de cebada más importantes para el año 2023 y como se vienen distribuyendo esos porcentajes desde el año 2010 al presente. En cuanto a la participación de las provincias en la superficie afectada al cultivo, domina ampliamente Buenos Aires con un 93% de la superficie sembrada (Tabla 2, Figura 2).

**Tabla 1.** Superficie relativa de las principales variedades de cebada sembradas en Argentina en el año 2023. Fuente: cebada cervecera (<https://cebadacervecera.com.ar/cebada-distribucion-varietal-estimada-en-argentina-2023/>)

| Variedad                                     | Porcentaje |
|--|------------|
| Montoya                                      | 29,7 %     |
| Andreia                                      | 28,7 %     |
| Overture                                     | 21,7 %     |
| Sinfonia                                     | 6,1 %      |
| Charles                                      | 4,8 %      |
| Alhue  | 4,8 %      |
| Jennifer                                     | 1,3 %      |
| Traveler                                     | 0,9 %      |
| Shakira                                      | 0,4 %      |
| Scarlett                                     | 0,4 %      |
| Otras  | 1,2 %      |
| <b>Total superficie: 1.150.000 hectáreas</b> |            |



**Figura 1.** Superficie relativa de las principales variedades de cebada sembradas en Argentina en el periodo 2010-2023. Fuente: <https://cebadacervecera.com.ar/cebada-distribucion-varietal-estimada-en-argentina-2023/>

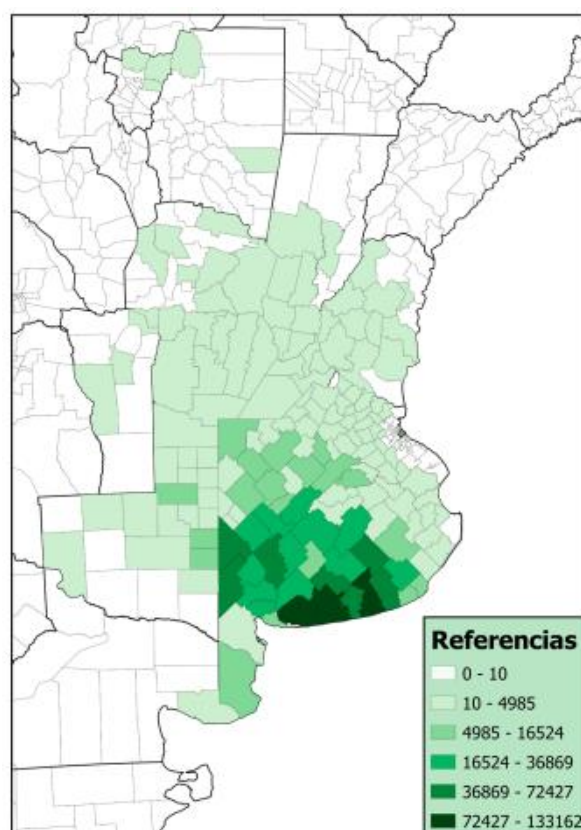
Como podemos observar, el mercado de cebada cervecera está dominado por unas pocas variedades, como si fuera una especie de “oligopolio” de variedades. Cuando el destino del grano es la industrialización, la modalidad de las operaciones de producción se realiza por contratos. Para ello, se destacan las malterías Pampa, Quilmes y Boortmalt (Cargill), firmas que generalmente suelen proveer la semilla y, en muchos casos, la logística y el asesoramiento técnico. Haciendo un paralelismo con su “primo” el Trigo, en la campaña 2022-2023 los productores declararon en el SISA el uso de 375 cultivares diferentes de trigo, siendo en el caso de la cebada solo 79 cultivares (incluidos los forrajeros).

El mercado de hoy exige que se respeten ciertos parámetros de calidad e inocuidad de los granos que se entregan para industria. En la Figura 3 podemos ver cuáles son los parámetros que se evalúan a la hora de “premiar” o “castigar” el valor de la mercadería recibida. Si la cebada que se entrega no cumple con alguno de estos requisitos, puede ser rechazada o recategorizada como cebada forrajera, que tiene un valor de mercado obviamente más bajo.

**Tabla 2.** Superficie sembrada con cebada en Argentina discriminado por provincia en el año 2023. Fuente: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sisa\\_cebada\\_22\\_23\\_v1.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sisa_cebada_22_23_v1.pdf).

| PROVINCIA           | CANTIDAD PRODUCTORES | SUPERFICIE SEMBRADA | % SUPERFICIE | % ACUMULADO |
|---------------------|----------------------|---------------------|--------------|-------------|
| BUENOS AIRES        | 7.488                | 1.279.564           | 93,12%       | 93,12%      |
| LA PAMPA            | 616                  | 65.864              | 4,79%        | 97,91%      |
| SANTA FE            | 128                  | 12.095              | 0,88%        | 99,49%      |
| CORDOBA             | 105                  | 9.587               | 0,70%        | 98,61%      |
| ENTRE RIOS          | 23                   | 4.444               | 0,32%        | 99,82%      |
| SAN LUIS            | 7                    | 1.547               | 0,11%        | 99,93%      |
| RIO NEGRO           | 5                    | 413                 | 0,03%        | 99,96%      |
| SANTIAGO DEL ESTERO | 2                    | 342                 | 0,02%        | 99,98%      |
| TUCUMAN             | 3                    | 238                 | 0,02%        | 100,00%     |
| <b>Total Gral</b>   | <b>8.377</b>         | <b>1.374.094</b>    | <b>100%</b>  |             |

Fuente: Sistema de Información Simplificado Agrícola (SISA).



**Figura 2.** Distribución de la siembra de cebada en Argentina para la campaña 2022-2023. Fuente: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sisa\\_cebada\\_22\\_23\\_v1.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sisa_cebada_22_23_v1.pdf).



**Norma de calidad para la comercialización de cebada cervecera**  
NORMA V - ANEXO A - Resolución SENASA 27/2013



BOLSA DE COMERCIO DE ROSARIO  
CÁMARA ARBITRAL DE CEREALES

| RUBROS                                | BASES % | TOLERANCIA DE RECIBO % | BONIFICACIONES   | REBAJAS   |
|---------------------------------------|---------|------------------------|--|---|
| Capacidad Germinativa (mínimo)        | 98      | 95                     | ----   | Para valores inferiores al 98% y hasta el 95% a razón del 0,5% por cada por ciento.   |
| Materias Extrañas (máximo)            | 0,5     | 1,0                    | ----   | Para valores superiores al 0,5% y hasta el 1% a razón del 1,0% por cada por ciento o fracción proporcional.   |
| Granos Dañados (máximo)               | 0,5     | 1,5                    | Para valores inferiores al 0,5% a razón del 1% por cada por ciento o fracción proporcional.    | Para valores superiores al 0,5% y hasta el 1,5% a razón del 0,5% por cada por ciento o fracción proporcional.   |
| Granos quebrados y/o pelados (máximo) | 1,5     | 4,0                    | Para valores inferiores al 1,5% a razón del 1% por cada por ciento o fracción proporcional.    | Para valores superiores al 1,5% y hasta el 4% a razón del 0,5% por cada por ciento o fracción proporcional.   |
| Carbón (máximo)                       | ----    | 0,2                    | ----   | Para valores superiores al 0,2% a razón del 1% por cada por ciento o fracción proporcional.   |
| Granos Picados (máximo)               | ----    | 0,5                    | ----   | Para valores superiores al 0,5% a razón del 1% por cada por ciento o fracción proporcional.   |
| Bajo Zaranda de 2,2 mm (máximo)       | ----    | 4,0                    | Para valores inferiores al 4% a razón del 1% por cada por ciento o fracción proporcional.      | Para valores superiores al 4% a razón del 1% por cada por ciento o fracción proporcional.   |
| Calibre sobre zaranda 2,5 mm (mínimo) | 85      | 80                     | ----   | Para valores inferiores al 85% y hasta el 80% a razón del 0,5% por cada por ciento.   |
| Proteína Mínima S.S.S.                | ----    | 9,5                    | ----   | ----  |
| Proteína Máxima S.S.S.                | ----    | 13,0                   | ----   | ----  |
| Humedad (máximo)                      | 12,0    | 12,5                   | Para valores inferiores al 12,0% a razón del 1,2% por cada por ciento o fracción proporcional. | Para mercadería que exceda el 12,5% se aplicará una merma conforme a fórmula:<br>$\text{Merma (\%)} = \frac{(Hi - Hf) \times 100}{100 - Hf}$ Hi: Humedad inicial<br>Hf: Humedad Final (12,0%)<br>Merma por manipuleo, 0,20% |

**Figura 3.** Parámetros de calidad en la comercialización de cebada cervecera. Fuente: Bolsa de Comercio de Rosario (<https://www.cac.bcr.com.ar/es/arbitraje-y-calidad/normas-de-comercializacion/norma-v-anexo-de-calidad-para-la-comercializacion-de>).

### 1.2 Fusariosis de la espiga

Son varios los factores adversos (bióticos y abióticos) que pueden afectar la producción y calidad de la cebada a lo largo de todo su ciclo. En este trabajo nos centraremos en una de las enfermedades que mayor importancia está teniendo en los últimos años por la frecuencia y severidad con la que se la observa en las zonas productoras de cebada del país. Hablamos de la fusariosis de la espiga (FE), enfermedad típicamente monocíclica que ataca principalmente a cereales como trigo, cebada, avena, triticale, trigo sarraceno, centeno, maíz, sorgo y, en menor medida a arroz. En los últimos años y especialmente a fines del siglo XX, se incrementó la frecuencia de epidemias de FE en algunas áreas de Argentina, así como en los Estados Unidos, Canadá, países del centro-este de Europa, China y Japón. Esto ha sido asociado a posibles cambios climáticos, pero más frecuentemente a la adopción de sistemas de labranza conservacionistas, como la siembra directa, y a la difusión del cultivo de maíz (Villar de Galich, 2002). Las últimas grandes epidemias fueron en 2001-2002 y 2012 (Alberione, 2023).

Las pérdidas de rendimiento producidas por esta enfermedad pueden llegar al 50% en condiciones de epidemias severas y variedades muy susceptibles. Con epidemias



moderadas, pueden esperarse pérdidas entre 10% y 20%. A esto debe sumarse la contaminación por micotoxinas que limita la utilización del producto por su toxicidad en animales y el hombre (Villar de Galich, 2002).

Esta enfermedad es causada por varias especies del género *Fusarium*, teniendo como principales en nuestro país a *F. culmorum* y *F. graminearum* (teleomorfo: *Gibberella zeae*). Se ha encontrado que *F. culmorum* domina en regiones con condiciones cálidas y húmedas, mientras que *F. graminearum* se ha asociado con condiciones frías y húmedas (Bottalico y Perrone, 2002). Nos centraremos en *F. graminearum* ya que las condiciones climáticas predisponentes de nuestra región pampeana favorecen la ocurrencia de esta especie.

### 1.3 Ciclo de infección de *Fusarium graminearum*

El género *Fusarium* pertenece a los hongos filamentosos que están ampliamente distribuidos a nivel mundial. El principal inóculo de la FE proviene de los rastrojos de plantas infectadas o plantas huésped donde el hongo sobrevive (Figura 4). Bajo condiciones adecuadas de humedad y temperatura se desarrollan y maduran los peritecios que producirán las ascosporas en el momento de la floración del cereal (Markell y Francel, 2003). Las ascosporas se expulsan al exterior del cuerpo fructífero y se dispersan con la ayuda del viento, lluvia, riego o insectos hacia la planta huésped (Parry et al., 1995). En Argentina se identificaron 54 malezas, pertenecientes a 19 familias botánicas diferentes, incluyendo gramíneas y no gramíneas, como hospedantes secundarios de *F. graminearum* (Mourellos et al., 2014).

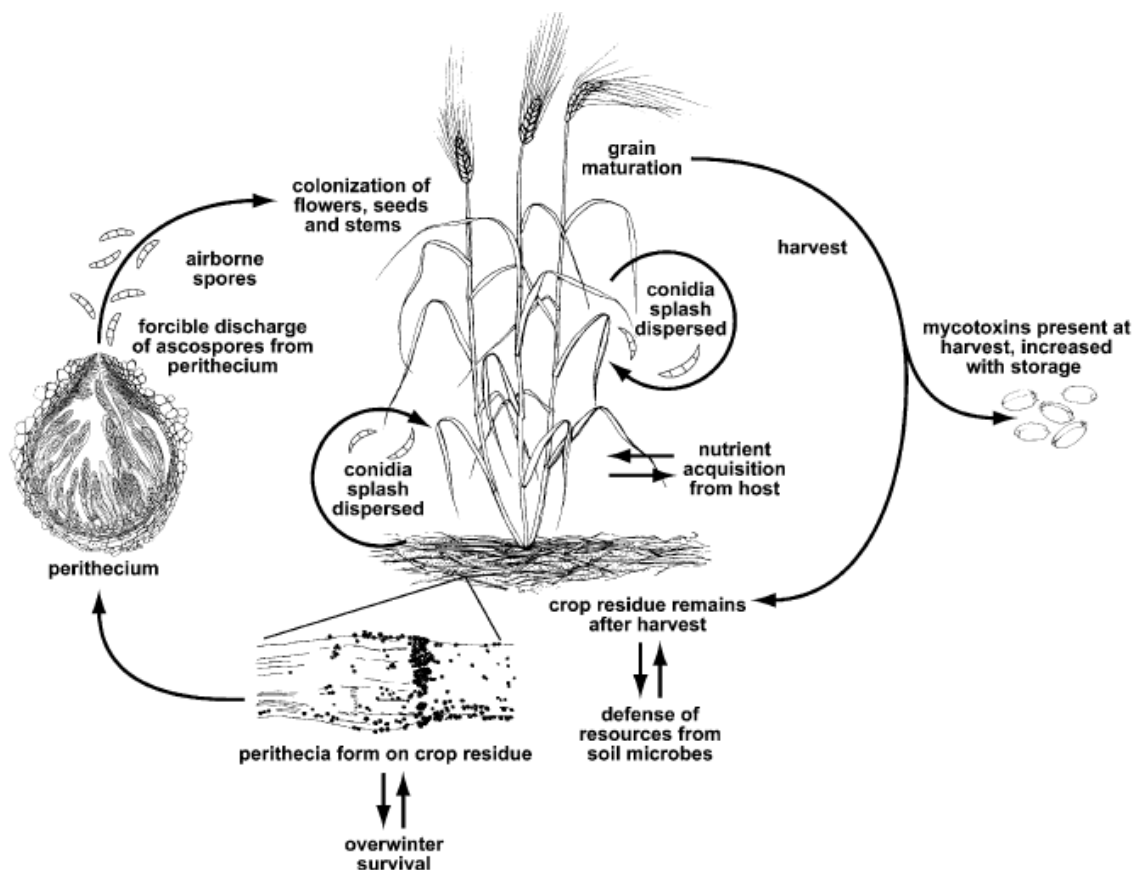


Figura 4. Ciclo biológico de *Fusarium graminearum*. Tomado de Trail (2009).

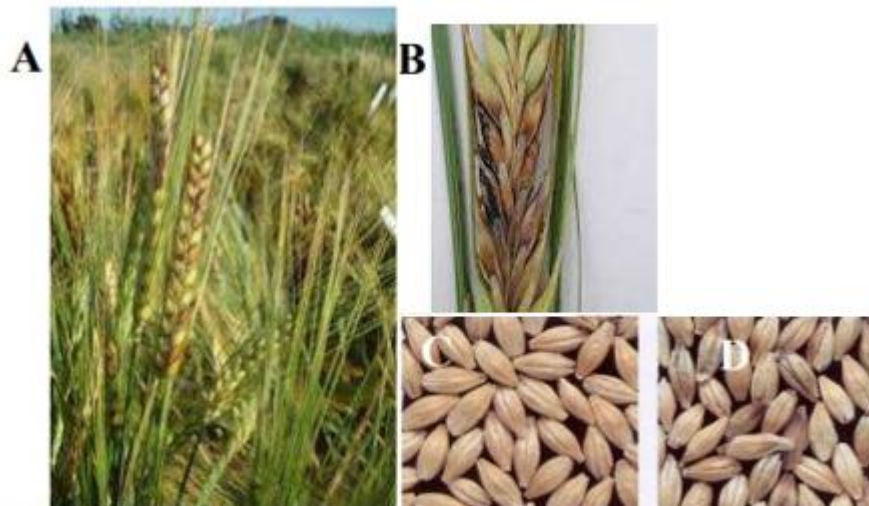
Una vez que arriban las ascosporas al tejido del hospedante, se crea una capa fina micelar después de la germinación de las mismas (Bushnell et al. 2003). Estas hifas explorarán toda la superficie de la flor buscando lugares de entrada, como estomas o zonas dañadas. Pritsch et al. (2000) mostraron bajo microscopía de fluorescencia que la infección del parénquima de las glumas proviene de la penetración de las hifas de *F. graminearum* a través de las estomas. Sin embargo, la principal vía de entrada es a través de las anteras, ya que existe una correlación positiva entre la permanencia de las anteras y el nivel de infección. Se ha considerado que las anteras pueden contener sustancias que estimulan el crecimiento fúngico, como la betaína y la colina, o que aumenten su germinación como los dializados de polen (Kang y Buchenauer, 2000). Una vez colonizado el interior, el patógeno tiene la capacidad de producir enzimas degradadoras de pared: celulasas, pectinasas y xilanasas (Schwarz et al., 2002).

*Fusarium graminearum* demuestra un comportamiento biotrófico en los primeros estadios de colonización de tejidos o incluso se presenta una infección asintomática en algunas partes de la planta. Una vez que ha colonizado las células del mesófilo y epidermis se producen síntomas de clorosis lo que indica el comienzo de la interacción necrotrofica (Bushnell et al., 2004). La infección de los cereales por FE reduce significativamente el rendimiento y la calidad del grano y puede provocar la contaminación del grano con micotoxinas que actúan como factores de virulencia en huéspedes sensibles (Jansen et al., 2005; Proctor et al., 1995).

#### **1.4 Síntomas y signos**

Los primeros síntomas aparecen de dos a cuatro días después de la infección en las primeras flores en abrirse (generalmente las del medio de la espiga), aunque puede comenzar en otros puntos de la espiga. Se suelen observar pequeñas manchas marrones que parecen mojadas por gotas de agua en el raquis o en la gluma. Posteriormente se extienden y aparecen decoloraciones y zonas cloróticas (Figura 5). Más tarde crece una masa fúngica de color salmón a naranja en el borde de las glumas o en la base de las espiguillas, los granos se arrugan y se tornan blancos o marrones con un interior claro. A medida que la infección progresa, la decoloración de las flores se extiende apical y basalmente desde la flor infectada. Respecto a los efectos en el rendimiento en grano se destaca la aparición de los granos chuzos (más pequeños de lo normal, arrugados o marchitados) o calcinados (Mariño N, 2016)

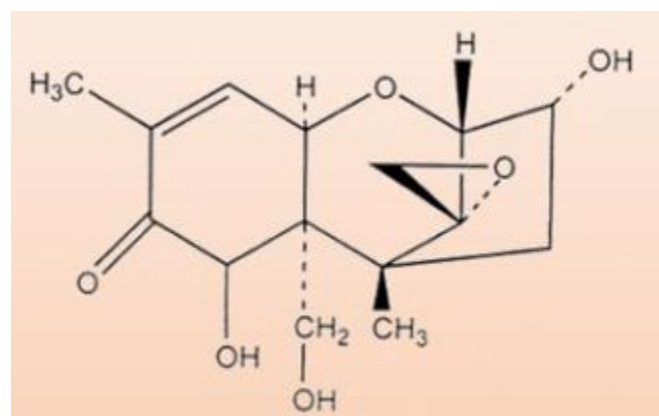
Muchos granos infectados pueden no presentar síntomas o signos visibles de la enfermedad, pero si contener en su interior las micotoxinas que el patógeno genera y llegar a producir la intoxicación de quienes lo consuman (Herbario virtual, Cátedra de Fitopatología, FAUBA).



**Figura 5.** Algunos de los síntomas de la Fusariosis de la espiga en cebada. A y B: espigas afectadas, C y D: granos sanos y afectados, respectivamente. Tomado de García Mariño (2016).

### 1.5 Micotoxinas

Las especies de *Fusarium* producen más de 100 metabolitos secundarios, conocidos como micotoxinas y la mayoría de ellas pueden afectar la salud humana y animal. *Fusarium graminearum* sintetiza micotoxinas del grupo de los tricotecenos, tales como deoxinivalenol (DON) y nivalenol (NIV) (Figura 6). El DON actúa como inhibidor de la biosíntesis de proteínas y es un factor de virulencia de *F. graminearum*, lo que facilita la propagación del patógeno y contribuye a los síntomas de la enfermedad (McCormick, 2003). Se ha podido detectar su presencia en los cereales procesados (pan, pastelería fina, cereales de desayuno, pasta), aunque los niveles de DON son menores que en los granos sin procesar o semiprocados (harinas). El deoxinivalenol es muy termoestable, por lo que durante la molienda y la panificación no se eliminan ni se reducen los niveles de esta micotoxina (ELIKA, <https://seguridadalimentaria.elika.eus/fichas-de-peligros/deoxinivalenol/>).



**Figura 6.** Estructura molecular de DON. Tomado de: Universidad Nacional Autónoma de México ([https://masam.cuautitlan.unam.mx/mohos\\_toxigenos\\_unigras/generalidades.html](https://masam.cuautitlan.unam.mx/mohos_toxigenos_unigras/generalidades.html)).

Los síntomas causados por el consumo de granos infectados con altas concentraciones de DON en animales provocan un menor consumo, rechazo del alimento, menores ganancias de peso o producción de leche, una baja en las defensas y en casos extremos vómitos e intoxicación. En humanos se registraron casos de mareos, náuseas y dolor de cabeza. Debido a su naturaleza soluble en agua, las micotoxinas como el DON, pueden transferirse de la malta a la cerveza (Habler et al., 2017). Por estas razones la mayoría de los países han establecido reglamentaciones para proteger a los consumidores de los efectos perjudiciales del consumo de DON determinando niveles de tolerancia.

En nuestro país, actualmente el Comité del Codex sobre Contaminantes en los Alimentos establecen como límites máximos: 1 ppm de DON en productos a base de cereales (harinas) y 0,2 ppm de DON en alimentos a base de cereales para lactantes y niños de corta edad (Artículo 156 quater – Resolución Conjunta SRYGS y SAB N°22/2019 <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-22-2019-325414/texto>). Sin embargo, las malterías tienen límites en gran medida autoimpuestos, ya que no existen regulaciones en cuanto a la malta o la cerveza.

### **1.6 Red Nacional de Cebada Cervecera**

La EEA INTA Bordenave, en convenio de asistencia técnica con la Cámara de la Industria Cervecera Argentina (que representa a las empresas AB-InBev, Boortmalt y Cerfolly), realiza cada año una red de ensayos distribuidos en toda la región productiva del país. En el mismo se evalúa y compara el rendimiento y calidad comercial de varios cultivares que hay en el mercado y líneas experimentales de cebada cervecera. Está claro que, al diversificar los ambientes, se obtiene una lectura más amplia sobre el comportamiento de cada variedad ante diferentes condiciones agroclimáticas que afectan, en mayor o menor medida, el desempeño de los materiales evaluados.

Durante la campaña 2020 la Red Nacional de Cebada Cervecera (así se le llama a la red de ensayos) estudió un total de 18 materiales, 12 comerciales y 6 líneas experimentales avanzadas. Para ello se realizaron ensayos comparativos, utilizando un diseño en bloques completos aleatorizados con 4 repeticiones para cada variedad. La red de ensayos se distribuyó en 21 localidades, una de las cuales incluyó 2 fechas de siembra distintas, comprendiendo así un total de 22 ensayos en evaluación.

Debido a las epidemias recientes, la industria maltera ha debido extremar los controles de los lotes que reciben, rechazando aquellos cuyo nivel de DON supera las 0,5 ppm. En años con alta incidencia de la enfermedad, ABInbev Argentina ha subido este máximo a 2 ppm, lo que hace que la gran mayoría de los lotes de la Zona Sur cumplan este requisito. En la zona Centro Norte donde, al haber mayores temperaturas y precipitaciones en el llenado de grano, es mayor la presencia de micotoxinas. Cargill también ha flexibilizado la política de recibo, lo que ha hecho que se reciban la gran mayoría de los lotes. Para cebada forrajera, las especificaciones en cuanto a DON son mucho más laxas, en muchos países se admiten hasta 5 ppm de DON (Cortese, 2019). Profundizar en el conocimiento acerca de los niveles de DON en las variedades y líneas comerciales de cebada de nuestro país permitiría identificar aquellos materiales con mejores respuestas a la FE y orientar los programas de mejoramiento genético hacia el desarrollo de cultivares más resistentes.

## HIPÓTESIS

-Los niveles de DON que se encuentran en granos de cebada como consecuencia de la infección de *F. graminearum* varían de acuerdo al genotipo de cebada, existiendo variedades con un mejor comportamiento (menor contenido relativo de DON).

-La aplicación de fungicida previene las infecciones de *Fusarium* spp., llevando a menores niveles de DON en los granos.

## OBJETIVO

El propósito de este trabajo fue determinar la presencia y concentración de DON en muestras de granos de cebada cervecera provenientes de la Red Nacional de Cebada Cervecera de la campaña 2020.

Con los resultados obtenidos se busca:

- Establecer si existen materiales de mejor comportamiento frente a *Fusarium* spp. En la argentina e investigar cuál es la situación a nivel mundial y en el país en la búsqueda de resistencia.
- Evaluar si la aplicación del fungicida foliar fue efectiva para contrarrestar el grado de infección.

## METODOLOGÍA DE TRABAJO

### Materiales evaluados

El experimento se llevó a cabo en la Red de Cebada Cervecera (REC) en 2020. Las localidades incluidas fueron: 9 de Julio, Junín, Alberti, Rojas, Pergamino, Bolívar, Coronel Dorrego, Coronel Suárez (2 épocas de siembra), Bordenave, La Dulce, Miramar, Balcarce (INTA), Balcarce (Agrar), Chillar, Barrow, Tres Arroyos, Oliveros, Justiniano Posse, Bigand, Marcos Juárez y Paraná. La representatividad que tienen estas localidades en la producción nacional de cebada es muy grande. Buenos Aires es la provincia donde se informó mayor superficie sembrada para Cebada 2022/2023, representando el 93,12% del total (SISA, 2023).

En cada localidad se evaluaron un total de 18 materiales, incluyendo 12 cultivares comerciales (Alhue, Alicia, Andreia, Charles, Danielle, Fatima, Jennifer, Militza, Montoya, Overture, Sinfonia y Yanara) y 6 líneas experimentales de cebada cervecera (L1-2019 a L6-2019). Como la obtención de registros sanitarios para cada variedad es uno de los objetivos que se persiguen con la conducción de estos ensayos, se aplicó el fungicida foliar Orquesta® Ultra Basf (Fluxapyroxad 5% + Pyraclostrobin 8,1% + Epoxiconazole 5%) a una dosis de 1200 cm<sup>3</sup>/ha, en estado de hoja bandera. Por lo tanto, para cada localidad y genotipo, hay dos tratamientos, con y sin aplicación de fungicida

Los resultados de la REC 2020 de rendimiento en Kg/ha promedio, calibre en % de granos retenidos sobre la zaranda de 2.5 mm (% Primera calidad) y contenido de proteína y humedad promedio (%) de cada ambiente y genotipo evaluados se pueden encontrar en <https://cebadacervecera.com.ar/red-nacional-de-cebada-cervecera-resultados-2020/>.

## Cuantificación de DON

Se realizó un procedimiento práctico que consistió en moler cada una de las muestras de grano cosechado por separado, teniendo especial cuidado en no contaminar ningún material con otro. Para la molienda se utilizó un molino ciclónico Udy (Figura 7). El producto de cada molienda se empaquetó en bolsas de papel madera y se almacenó a 4°C en la cámara de frío del Laboratorio de Fitopatología de la UNS para su conservación. Una vez terminada la etapa de molienda se procedió a la cuantificación de DON en cada una de las muestras (cada muestra está definida como una variedad, con o sin aplicación de fungicida, en su respectiva localidad) mediante un equipo Quicksan (Envirologix), utilizando tiras reactivas DON Flex AQ-304-BG siguiendo el protocolo propuesto por la empresa Envirologix ([https://www.youtube.com/watch?v=JROoB7Dn\\_2o](https://www.youtube.com/watch?v=JROoB7Dn_2o)). El kit para la medición y las tiras reactivas fueron facilitados por gentileza de la empresa Brascorp ([www.brascorp.com.ar](http://www.brascorp.com.ar)).



**Figura 7.** Molino ciclónico Udy con el que se realizó la molienda individual de cada muestra (A y B) y bolsas conteniendo las muestras de grano (C).

Procedimiento:

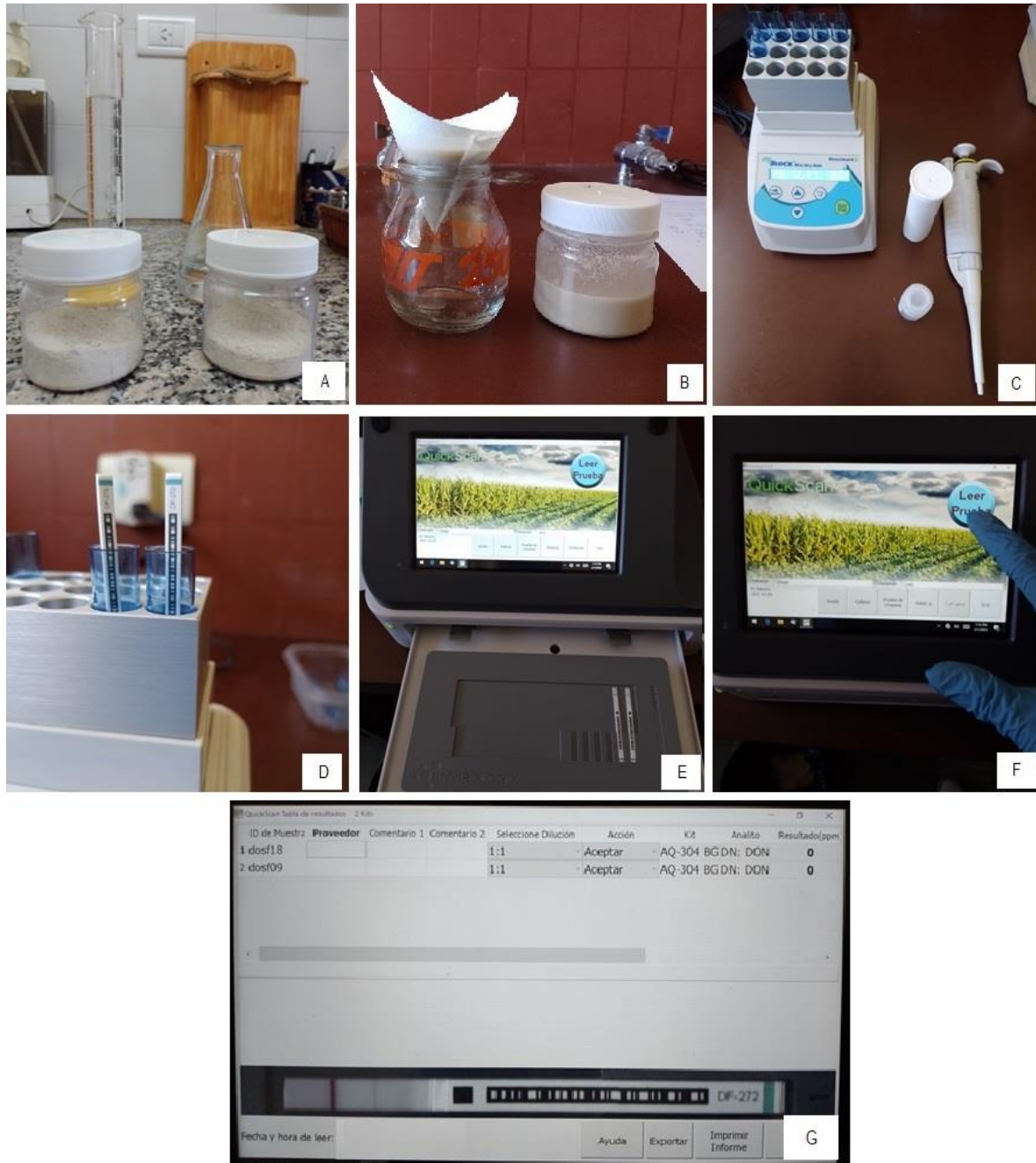
- Se pesaron 20 g de molienda en un frasco hermético de 200 mL, con tapa a rosca (Figura 8).



- Se agregaron 100 mL agua destilada (5 mL por gramo de muestra) a temperatura ambiente (Figura 9A).
- Se tapó el frasco y se agito 30 segundos.
- Se filtró con filtro grosor 0,22 mm, peso base 53 g m<sup>-2</sup>, durante un máximo de 2 minutos (Figura 9B).
- Se agregó 100 µL de Buffer provisto por el kit de Envirologix en un tubo de reacción previamente incubado a 22°C.
- Se agregó 100 µL de filtrado (o sobrenadante) en el mismo tubo de reacción y se mezcló absorbiendo y expulsando con el mismo *tip* de la micropipeta.
- Se incubó a 22°C durante 2 minutos (Figura 9C).
- Se colocó la tira reactiva en el tubo de reacción y se dejó reposar 2 minutos (Figura 9D).
- Se procedió a medir la tira reactiva en el scanner Quikscan (Figura 9E-F)
- El scanner dio un valor de concentración de DON por cada tira reactiva evaluada (Figura 9G).



**Figura 8.** Balanza analítica en la que se pesaron las muestras molidas. Antes del pesaje se realizó la tara de cada recipiente.



**Figura 9.** Cuantificación de DON utilizando el kit DON Flex AQ-304-BG (Envirologix). A. Muestras molidas. B. Incorporación de agua a la muestra y filtrado. C. Incubadora con tubos de reacción. D. Tiras reactivas en tubos de reacción. E. Colocación de tiras reactivas en el scanner Quikscan. F. Lectura de tiras reactivas. G. Resultados.

### Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se consideraron solo los ambientes con presencia de DON (5 localidades). Marcos Juárez fue descartado para el análisis porque solo se contó con muestras del tratamiento sin fungicida (no se realizó el tratamiento con fungicida). Se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) para determinar si existían diferencias entre los valores promedio de DON. Se utilizó un modelo en bloques completamente aleatorizados,



considerando las localidades como bloques. Los factores evaluados fueron el genotipo y el fungicida (con o sin aplicación). Los datos fueron agrupados al no detectarse interacción genotipo\*fungicida ( $p>0,05$ ). Las medias fueron comparadas mediante el test de DMS de Fischer ( $p<0,05$ ). Todos los análisis se realizaron mediante el software estadístico INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2015).

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las 17 localidades evaluadas en la REC 2020, en solo cinco de ellas se detectó DON (Junín, Oliveros, Bigand, Rojas y 9 de Julio). Solo los datos de estas localidades fueron tenidos en cuenta para los análisis estadísticos.

Como se muestra en la Tabla 3, no se halló evidencia significativa de que exista interacción entre los genotipos y los tratamientos ( $p=0,6903$ ; Tabla 3). Tampoco se observaron diferencias significativas entre los lotes tratados con fungicida y los que no ( $p=0,5479$ ). Por otra parte, se encontró evidencia de que existen diferencias significativas entre los valores medios de DON para los genotipos evaluados ( $p=0,0432$ ) que argumentan que existen genotipos de mejores aptitudes que otros frente al ataque de FE.

Los materiales Fatima, L3-2021, Montoya, Overture y Militza fueron los que presentaron las concentraciones promedio más bajas de DON ( $<0,5$  ppm) mientras que L2-2020, L1-2020, Charles, L5-2022 mostraron los niveles más altos ( $>0,65$  ppm) (Tabla 4, Figura 10).

En las localidades donde se detectó la presencia de DON, 13 de las 18 variedades evaluadas presentaron valores promedio de DON mayores al límite de tolerancia de 0,5 ppm. Los resultados arrojan que no hay una buena fuente de resistencia entre los materiales evaluados y la incidencia de la enfermedad está más que nada influenciada por si se dan las condiciones climáticas predisponentes para el desarrollo de esta.

**Tabla 3.** Resultados del ANOVA en bloques completamente aleatorizados.

| Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III) |        |     |       |        |         |
|---|--------|-----|-------|--------|---------|
| F.V.  | SC     | gl  | CM    | F      | p-valor |
| Modelo  | 114,96 | 41  | 2,80  | 23,94  | <0,0001 |
| Localidad                                       | 109,92 | 6   | 18,32 | 156,44 | <0,0001 |
| Genotipo  | 3,40   | 17  | 0,20  | 1,71   | 0,0432  |
| Fungicida                                       | 0,04   | 1   | 0,04  | 0,36   | 0,5479  |
| Genotipo*Fungicida                              | 1,60   | 17  | 0,09  | 0,80   | 0,6903  |
| Error   | 24,59  | 210 | 0,12  |        |         |
| Total   | 139,56 | 251 |       |        |         |

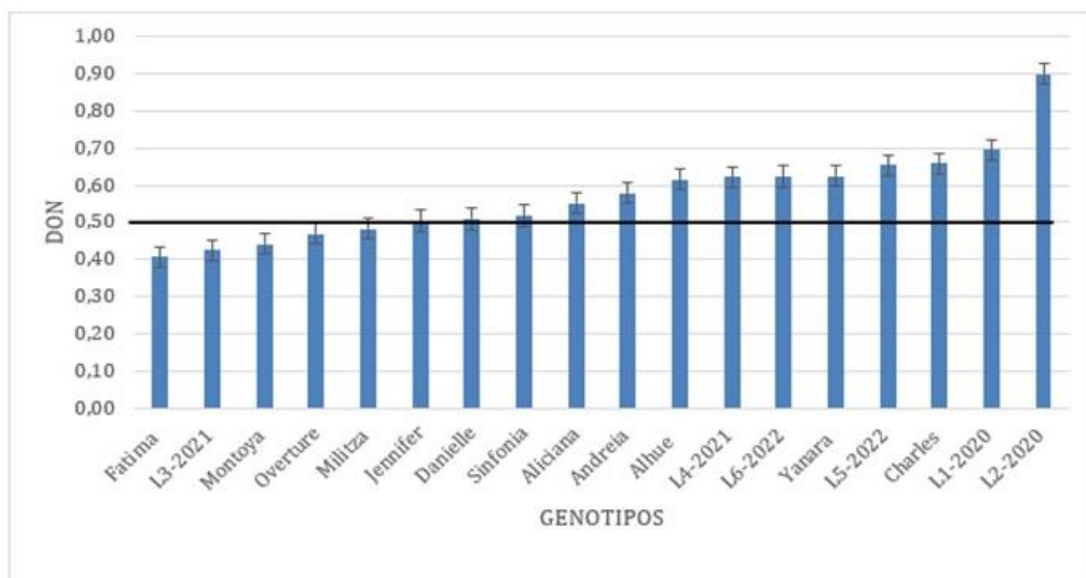
**Tabla 4.** Resultados del test LSD Fisher de comparación de medias.

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=25,49816

Error: 1171,1142 gl: 210

| Genotipo | Medias | n  | E.E. |   |   |   |
|----------|--------|----|------|---|---|---|
| Fatima   | 0,41   | 14 | 9,15 | A |   |   |
| L3-2021  | 0,43   | 14 | 9,15 | A |   |   |
| Montoya  | 0,44   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| Overture | 0,47   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| Militza  | 0,48   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| Jennifer | 0,50   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| Danielle | 0,51   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| Sinfonia | 0,52   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| Aliciana | 0,55   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| Andreia  | 0,58   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| Alhue    | 0,62   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| L4-2021  | 0,62   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| L6-2022  | 0,62   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| Yanara   | 0,63   | 14 | 9,15 | A | B |   |
| L5-2022  | 0,65   | 14 | 9,15 | A | B | C |
| Charles  | 0,66   | 14 | 9,15 | A | B | C |
| L1-2020  | 0,70   | 14 | 9,15 | A | B | C |
| L2-2020  | 0,90   | 14 | 9,15 | A |   | C |

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )



**Figura 10.** Concentración media de DON (ppm) en los genotipos evaluados.

Otro dato para destacar es que solo una (1) de las seis (6) líneas experimentales que se evaluaron está dentro de los niveles de tolerancia de DON, lo que indica que las mismas no

exhiben un mejor comportamiento que aquellas variedades disponibles actualmente en el mercado.

Si comparamos los resultados con lo ocurrido en el año previo (2019) en los ensayos de la REC (Monterroso, 2022) podemos observar que los materiales que presentan bajas concentraciones en el año 2020 no son los mismos que los del año 2019, lo que indicaría que las diferencias en la concentración de DON de los genotipos están muy ligadas al factor ambiental (Tabla 5). Hay que destacar que el año 2020, las condiciones ambientales no fueron particularmente predisponente para la FE (se presentó solo en 5 de las localidades evaluadas), en cambio en el año 2019 la enfermedad se presentó en 10 de las localidades de la REC. En el año 2019 la mayoría de los cultivares (11 de 16) también superaron el nivel de tolerancia permitido. Las líneas experimentales (L1 a L6) no son las mismas en los 2 años de investigación, por lo que no sería válida su comparación entre 2019 y 2020, aunque sí dentro de cada año. Si tomamos en cuenta la posición en el ranking de cada año, las variedades que mostraron mejor comportamiento (contenido más bajo de DON) serían Jennifer, Danielle y Alicia.

**Tabla 5.** Niveles de DON promedio por genotipo: año 2020 (derecha) y 2019 (izquierda). En rojo los genotipos que superan el nivel de tolerancia (> 0,5 ppm). Datos 2019 tomado de Monterroso (2022).

| Genotipo | valor DON promedio | Genotipo | Valor DON promedio |
|----------|--------------------|----------|--------------------|
| L2-2020  | 0,9000             | Charles  | 0,7756             |
| L1-2020  | 0,6957             | L6-2019  | 0,7661             |
| Charles  | 0,6586             | Overture | 0,7633             |
| L5-2022  | 0,6536             | Montoya  | 0,7400             |
| Yanara   | 0,6250             | L5-2019  | 0,6639             |
| L6-2022  | 0,6229             | Andreia  | 0,6128             |
| L4-2021  | 0,6214             | Sinfonia | 0,6017             |
| Alhue    | 0,6150             | L4-2019  | 0,5667             |
| Andreia  | 0,5786             | Fatima   | 0,5344             |
| Aliciana | 0,5521             | Aliciana | 0,5167             |
| Sinfonia | 0,5179             | L3-2019  | 0,5089             |
| Danielle | 0,5093             | L1-2019  | 0,4606             |
| Jennifer | 0,5036             | Traveler | 0,4417             |
| Militza  | 0,4821             | Jennifer | 0,4028             |
| Overture | 0,4686             | Danielle | 0,3867             |
| Montoya  | 0,4421             | L2-2019  | 0,3461             |
| L3-2021  | 0,4257             |          |                    |
| Fatima   | 0,4071             |          |                    |

Ciertas variedades y líneas presentaron mejor comportamiento en cuanto a los niveles de DON encontrados y se relacionaría con la susceptibilidad del material a la fusariosis. Un aspecto a tener en cuenta en referencia a los materiales comerciales de cebada es que la industria lleva a que se cultiven pocas variedades, dominando unas pocas en la superficie cultivada como fue mencionado previamente. También es importante recordar que el objetivo de la industria es que la cebada germine fácilmente y de manera pareja por lo cual resulta clave la uniformidad de los granos. Es por esta razón que al momento de elegir un cultivar los productores tienen preferencia por ciertas variedades como Andreia, Montoya u Overture. La

poca variabilidad genética en los lotes, provoca una alta presión de selección sobre los patógenos, y los materiales se pueden volver susceptibles a *Fusarium* spp. o cualquier otro patógeno al poco tiempo de liberarse al mercado.

Al ver la posición de las líneas experimentales en la Tabla 5, se observa que se presentan distribuidas uniformemente, algunas con mayores niveles de DON al permitido y otras entre las menores. Esto estaría indicando que el mejoramiento del cultivo no está siendo dirigido hacia la búsqueda de resistencia a FE o contenido de DON.

El tratamiento con fungicida no logró reducir los niveles de DON en los genotipos de cebada analizados. Esto se debe a que la aplicación del fungicida foliar Orquesta Ultra® se llevó a cabo durante la etapa de hoja bandera, previo a la fase de susceptibilidad a la fusariosis (antesis), por lo que el tratamiento no fue efectivo. En la Red de Cebada Cervecera (REC), la aplicación del fungicida se enfoca principalmente en el control de enfermedades foliares, sin dirigirse específicamente a la prevención de la FE

## **6. SITUACIÓN MUNDIAL DE LA BÚSQUEDA DE RESISTENCIA A FUSARIOSIS DE LA ESPIGA EN TRIGO Y CEBADA**

### **6.1 Mejoramiento y tipos de resistencia a FE**

La búsqueda de variedades resistentes de cebada a la FE todavía está en proceso. Se han llevado a cabo numerosas investigaciones al respecto con el afán de comprender las complejas reacciones que se desencadenan dentro de los distintos biotipos de cebada que muestran diferentes grados de resistencia al ataque de *F. graminearum*. La resistencia a la FE es un rasgo complejo controlado por múltiples genes y afectado por varios factores ambientales (Bai y Shaner 1994).

Comprender los mecanismos que las plantas llevan a cabo para defenderse de un patógeno y su papel epidemiológico resulta muy útil a la hora de desarrollar estudios sobre resistencia. Muchas investigaciones han puesto énfasis en comprender como son los procesos internos que se llevan a cabo en la planta cuando se produce una infección y cuáles son las principales vías de entrada que el patógeno puede utilizar para colonizar a su huésped. En trigo se conocen cinco tipos de resistencia (Mesterházy, 1995):

Tipo I: es la resistencia a la penetración del patógeno y al inicio de la enfermedad

Tipo II: es la resistencia a la propagación del patógeno en la planta una vez que se establece la enfermedad

Tipo III: es la resistencia a la infección de los granos.

Tipo IV: es la tolerancia de la enfermedad, ya que el rendimiento de los granos se mantiene a pesar de la presencia de la enfermedad.

Tipo V: es la capacidad de la planta para degradar e inhibir la síntesis de toxinas producidas por el hongo.

Se considera que la cebada exhibe una mayor resistencia a la dispersión (resistencia Tipo II) que el trigo y el efecto en la inhibición de producción de DON por parte del patógeno es menos

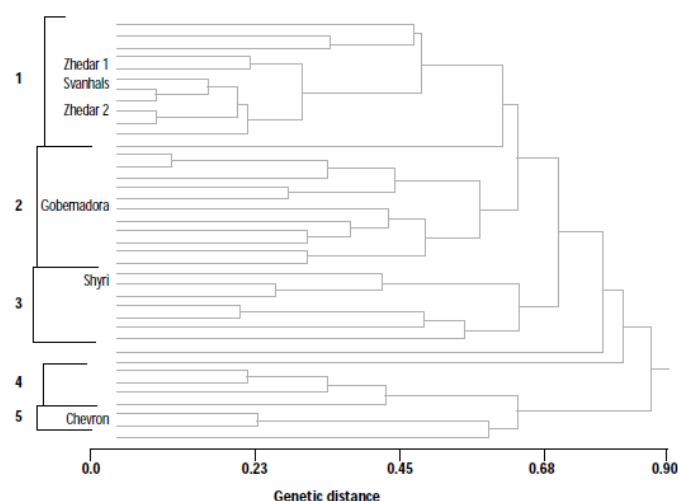
pronunciado (Maier et al. 2006; Boddu et al. 2007). También se sabe que usualmente las distintos Tipos de resistencia son independientes.

Reducir la concentración de DON en el grano es el objetivo de la mayoría de los mejoradores de cebada. Steffenson (1998) menciona que existe una correlación positiva ( $r=0,64$ ;  $P=0,0001$ ) entre la incidencia de FE y la concentración de DON en el grano de cebada. Skadhauge et al. (1997) descubrieron un mutante de cebada libre de proantocianidina que muestra una resistencia *in vitro* extrema a *Fusarium*. Esta resistencia se debe a la acumulación de dihidroquercitina, un potente inhibidor del crecimiento de *Fusarium*.

## 6.2 Fuentes de resistencia en todo el mundo

Es probable que la verdadera resistencia a FE no exista en el acervo genético primario de la cebada. Incluso los niveles moderados de resistencia son extremadamente raros en la cebada (Huang et al., 2013) según evaluaciones extensas de cultivares, variedades locales y variedades silvestres (Steffenson, 2003). Aun así, se han identificado y utilizado en diversos estudios genéticos varias fuentes de resistencia parcial al FE y baja acumulación de DON.

Gilchrist (2001) establece la distancia genética entre los principales genotipos resistentes de cebada utilizando datos morfológicos, agronómicos, de severidad de FE y contenido de DON, y de enfermedades foliares (Figura 10). La mayoría de los genotipos chinos de cebada se agrupan en el grupo 1, además de Svanhals, desarrollado en Suecia. Chevron y el genotipo Cihó 16128 derivado de Chevron (que comprende el grupo 5) son los más resistentes a FE y tienen las concentraciones más bajas de DON. La mayoría de los genotipos de cebada de dos hileras resistentes a FE son susceptibles a roya del tallo, mancha en red y oídio, y todos son susceptibles a la roya de la hoja. Todos los genotipos de seis hileras resistentes a FE son susceptibles a la roya de la hoja, a la roya del tallo y oídio (Urrea et al., 1999). La información presentada en la Figura 10 es útil para los programas de mejoramiento, ya que permite la identificación de cultivares resistentes a FE cuya base de resistencia podría ser diferente, aumentando así la probabilidad de acumular niveles de resistencia cuando la acción genética para la resistencia a FE es aditiva. Sin embargo, la susceptibilidad a las manchas foliares y a la roya sigue siendo un problema que podría impedir el uso de estos genotipos en algunas regiones.



**Figura 11.** Dendrograma basado en un análisis de distancia entre 39 genotipos de cebada (Gilchrist, 2001).

### 6.3 Determinantes génicos de resistencia a FE

Los cultivares resistentes pueden proporcionar un medio eficaz y económicamente sólido para reducir el impacto del FE. Esto requiere, en primer lugar, la identificación de diversas fuentes de resistencia y luego la caracterización de la arquitectura genética del rasgo para facilitar el mejoramiento.

En una investigación realizada en Polonia se estudiaron 100 líneas endogámicas recombinantes (RILs) de cebada infectadas artificialmente con *F. culmorum* y se comprobó que la resistencia a la FE estaba estrechamente ligada a un conjunto de genes asociados a regiones específicas del ADN (QTLs) (Ogrodowicz et al., 2020).

Se detectaron seis QTLs en los cromosomas 2H, 3H, 5H y 7H y 4 QTL para rasgos relacionados con granos dañados con *Fusarium*. No se encontraron QTLs asociados al contenido de DON. En una región del brazo corto del cromosoma 2H se encontraron la mayoría de los QTL asociados con FE y rasgos relacionados con el rendimiento. Las características de la planta que se pusieron “bajo la lupa” para determinar su influencia en la resistencia a la FE fueron las siguientes:

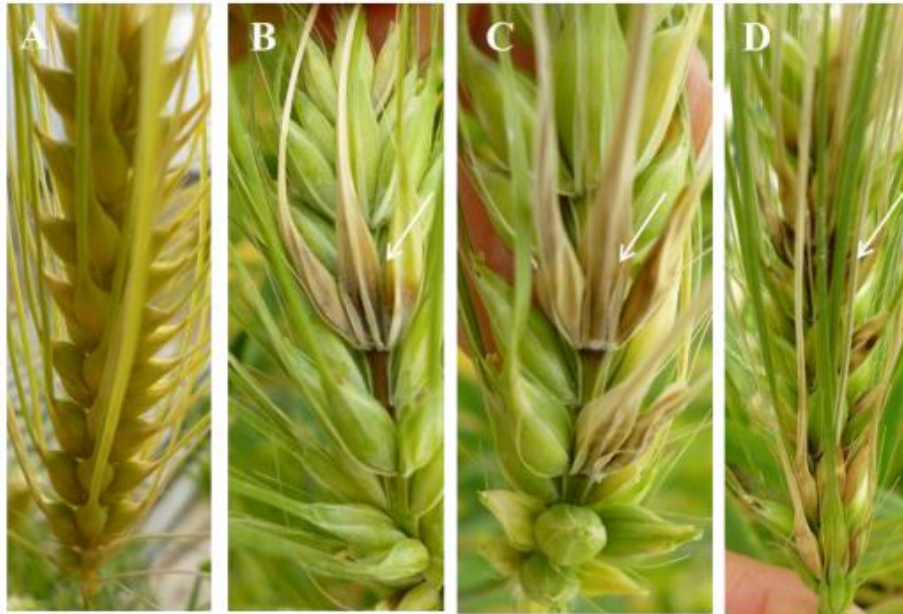
Altura del cultivo: se demostró que la altura del cultivo es inversamente proporcional a la severidad de FE. Esto se podría explicar ya que como mencionamos anteriormente, las esporas del hongo se hospedan en los rastrojos que quedan en el suelo del cultivo anterior, por lo que cuanto más cerca se encuentre la espiga del suelo mayor será la probabilidad de contagio que esta tenga.

Maduración tardía: Se pudo observar que la severidad del ataque de la enfermedad disminuyó en cultivares de maduración tardía. Esto probablemente esté relacionado con evitar el solapamiento entre el periodo más crítico del cultivo y las condiciones climáticas que más favorecen la diseminación y la infección del patógeno.

Compactación de la espiga: También se observó una relación negativa entre FE y biotipos de espigas más laxas. Las espigas laxas pueden estar relacionadas con la resistencia al FE debido a su arquitectura específica que retiene, presumiblemente, menos humedad dentro de toda la espiga (las espigas laxas se secan más rápido y es difícil para el patógeno propagarse hacia arriba y hacia abajo de la espiga). Esto disminuye el ritmo de propagación del hongo (Zhu et al., 1999).

Un dato particularmente interesante es que en este estudio no se encontró una relación positiva entre la intensidad del ataque por *F. graminearum* y la concentración de DON en el grano, lo que puede explicarse por el hecho de que el crecimiento del hongo y la producción de DON dependen en gran medida del clima (Lacey y Bateman, 1999). Otros estudios si encuentran relación entre la concentración de DON y la severidad de FE y en general se considera como un parámetro de la enfermedad (Steffenson, 2003).





**Figura 12.** Espigas de líneas de cebada después de inoculación artificial con *F. graminearum* en invernadero. A. línea sin síntomas de enfermedad. B. línea con síntomas leves. C. línea con síntomas moderados. D. línea con alta incidencia de la enfermedad.

En otro trabajo se estudió durante 3 años la resistencia a *F. graminearum* de 131 líneas avanzadas de cebada maltera inoculadas artificialmente con el patógeno (Figura 11), encontrando en cada año niveles de resistencia muy altos en 7 de esas líneas (Bobadilla Meléndez et al., 2019). Otro punto que es interesante a destacar de este trabajo es que en 2 de los 3 años las inoculaciones fueron por aspersión y en 2016 por punción, mostrándose niveles de severidad de infecciones inferiores con éste último método. McCallum y Tekauz (2002) y Geddes et al. (2008) mencionan que la cebada muestra de manera natural resistencia a la dispersión de la fusariosis a través del raquis; mientras que Jansen et al. (2005) indican que la infección por *F. graminearum* se ve limitada por la inhibición del crecimiento de las hifas en el raquis de este cultivo. Estos supuestos se correlacionan con tal diferencia.

En los últimos años se han desarrollado numerosos mapas genómicos en cebada para determinar regiones asociadas a la resistencia a FE y a la acumulación de DON. Sallam et al. (2023) recopiló la información de 14 estudios de mapeo, generaron un nuevo mapa y establecieron los QTLs asociados a resistencia a FE y acumulación de DON. Encontraron 96 QTLs para resistencia a FE y 57 para acumulación de DON esparcidos por el genoma de cebada (Tabla 8). Muchos de los QTLs explicaron un porcentaje bajo (<10%) de la variación para los rasgos y a menudo se encontraron significativos en solo uno o unos pocos estudios, mostrando poca consistencia y quizás sean debidos más a condiciones experimentales que a un verdadero rol en la enfermedad. Considerando la magnitud del efecto, coherencia de la detección en todos los entornos e independencia de rasgos agromorfológicos, los autores consideran a sólo tres de los 96 QTL para FE y cinco de 57 QTLs para DON como potenciales objetivos para la selección asistida por marcadores. Los QTLs para resistencia a FE son: FHB\_2H\_11 (aportado por Zhedar 2), FHB\_5H\_5 (Zhedar 2) y FHB\_6H\_1 (Chevron). Los QTLs para DON son: DON\_1H\_1 (Chevron), DON\_2H\_4 (Chevron), DON\_3H\_2 (Rasmussen), DON\_4H\_2 (Ciho 4196) y DON\_6H\_1 (Chevron). Estos resultados demuestran que en cebada no existen muchas fuentes de resistencia.

**Tabla 8.** QTLs identificados en cebada en 14 estudios de mapeo para resistencia a FE y contenido de DON (Sallam et al., 2023). Nota: QTL(C1)<sup>A</sup>: QTLs que explicó el 10% o más de la variabilidad fenotípica. QTL(C2)<sup>B</sup>: QTLs que fueron detectados en más de un entorno. QTL(C3)<sup>C</sup>: QTLs que explicaron el 10% o más de la variabilidad fenotípica y fueron detectados en más de un ambiente. QTL(C4)<sup>D</sup>: QTLs que explicaron el 10% o más de variabilidad fenotípica, fueron detectados en más de un ambiente y mapeados independientemente de varios rasgos agromorfológicos.

| Chromosome | QTL(C1) <sup>A</sup> |     | QTL(C2) <sup>B</sup> |     | QTL(C3) <sup>C</sup> |     | QTL(C4) <sup>D</sup> |     |
|------------|----------------------|-----|----------------------|-----|----------------------|-----|----------------------|-----|
|            | FHB                  | DON | FHB                  | DON | FHB                  | DON | FHB                  | DON |
| 1H         | 3                    | 0   | 0                    | 1   | 0                    | 0   | 0                    | 1   |
| 2H         | 32                   | 17  | 17                   | 9   | 15                   | 8   | 1                    | 1   |
| 3H         | 2                    | 2   | 2                    | 1   | 1                    | 1   | 0                    | 1   |
| 4H         | 1                    | 2   | 2                    | 2   | 0                    | 2   | 0                    | 1   |
| 5H         | 4                    | 2   | 2                    | 0   | 2                    | 0   | 1                    | 0   |
| 6H         | 9                    | 4   | 2                    | 3   | 1                    | 2   | 1                    | 1   |
| 7H         | 5                    | 5   | 2                    | 2   | 2                    | 2   | 0                    | 0   |
| Overall    | 56                   | 32  | 27                   | 18  | 21                   | 15  | 3                    | 5   |

#### 6.4 Detoxificación de micotoxinas

Existe un proceso llamado glicosilación que consiste en la conversión enzimática de la toxina DON a la forma no tóxica llamada DON-3-O-glucósido (D3G). Esto ocurre por la adición de un glúcido a la toxina. En varias plantas, incluida la cebada, estos procesos son catalizados por enzimas llamadas UDP-glicosiltransferasas (UGT) que son generalmente reguladas por varios genes. Muchas investigaciones se han llevado a cabo con el objeto de entender cómo funcionan estas enzimas y cómo influyen en la resistencia a FE. El grado de expresión de los genes responsables de estas enzimas ante las infecciones de *Fusarium* y su relación en la conversión de DON a D3G dentro de la planta son los parámetros que mejor explican la resistencia a FE.

Uno de los genes involucrados en este proceso el gen HvUGT13248, el cual se aisló de una variedad de cebada que mostraba alta resistencia a FE. Si bien la conjugación de DON reduce efectivamente el contenido general de toxinas, los conjugados también son indeseables, ya que pueden ser fácilmente hidrolizados a la toxina principal por las bacterias intestinales comunes (Berthiller et al., 2011).

#### 6.5 Uso de inductores de defensa

Un trabajo realizado en la Universidad de La Plata (Saldúa et al., 2017) encontró resistencia a FE en un grupo de cultivares de cebada portadores de resistencia sistémica adquirida (RSA) para áfidos. Se evaluó la aplicación de diferentes inductores hormonales en las variedades con RSA para observar si las respuestas inmunológicas podrían mejorar la sanidad de las plantas frente al ataque de *Fusarium*. Se encontró una línea de cebada que al ser tratada con ácido jasmónico la tolerancia a FE aumentaba.

La inducción de mecanismos de defensa, sin que se produzcan mermas en los componentes del rendimiento, es una estrategia que permitiría reducir el uso de plaguicidas y mejorar considerablemente la respuesta de las plantas a pestes y enfermedades. Para ello se deben



identificar cuáles son los genes que participan de estos mecanismos inducibles de defensas y así poder poner a disposición de los productores cultivares más resistentes, con menores costos en su producción y sin riesgo para su salud y para el medio ambiente.

## 6.6 Medidas para minimizar el riesgo de la enfermedad

El control eficaz a largo plazo de la FE requerirá una estrategia de gestión integrada. Esto incluye:

- El uso de cultivares con mejor comportamiento a la FE.
- Evitar la siembra de cebada o trigo sobre rastrojos infectados (rotación de cultivos).
- Reducir el inóculo de *Fusarium* que reside en los restos de cultivos en la superficie del suelo.
- Aplicación efectiva de fungicidas: las mejores aplicaciones son a principio de floración o doble aplicación a principio/final de floración con fungicidas del grupo de los triazoles.
- El uso de modelos de predicción para la aplicación de fungicidas cuando el riesgo de infección es alto.
- Se han evaluado algunos microorganismos como agentes de biocontrol y uno de los más exitosos fue *Bacillus velezensis* RC218 que demostró reducir la incidencia de FE y el contenido de DON en grano cuando se evaluó la inoculación con *F. graminearum*. Para el caso de infecciones con *F. poae* los mejores fueron *B. inaquosorum* y *B. nakamurai* (Zanon et al., 2024).

Al momento de la cosecha se recomienda

- Realizar un monitoreo 3-4 días antes de la cosecha en donde se evalúen los lotes en donde se observa la enfermedad. La metodología sería la siguiente: Muestreo de 10-20 espigas en 10 puntos diferentes del lote inmediatamente previo a la cosecha. Niveles de infección superiores al 5% de grano afectado puede sugerir que estos lotes deban mantenerse separados de otros lotes para la comercialización.
- Aumentar el caudal de viento de la cosechadora y ajustar las zarandas debido a que los granos más afectados son los más pequeños y livianos.

## 7. CONCLUSIONES

Hanson et al. (1950) observó que no se puede encontrar resistencia en condiciones ambientales no predisponentes a la FE debido a la baja severidad de la enfermedad, es decir, es absolutamente necesaria una presión de selección lo suficientemente fuerte que haga sobresalir los genotipos resistentes. En base a este supuesto, los datos de la REC 2020 no serían suficientes para destacar materiales con mejor comportamiento a la FE. Para generar datos con mayor validez se deberían desarrollar investigaciones que se centren la inoculación artificial del patógeno que nos permita eliminar el factor ambiental y enfocarnos directamente en la interacción entre el genotipo y la enfermedad. Muchas de las investigaciones llevadas a cabo en otras partes del mundo se podrían tomar como guía para aplicar en el país y poder ver qué grado de resistencia presentan las variedades que tenemos disponibles en el

Mercado. Igual hay que tener en cuenta que la situación a nivel nacional coincide con la situación observada a nivel mundial, ya que no existen fuentes de resistencia importantes (Bushnell et al., 2003).

Si bien hoy no parece ser un tema que esté en la agenda inmediata por su relativa severidad con respecto a otros factores que producen mayores pérdidas y la complejidad que conlleva la búsqueda de resistencia debido a la amplia cantidad de genes que interactúan y al influyente factor ambiental, sería deseable continuar evaluando los genotipos en años venideros, que eventualmente serán predisponente a la enfermedad. Por otra parte, sería también interesante evaluar la efectividad del fungicida haciendo un control más preciso y que se ajuste al periodo crítico del cultivo frente a la FE.

En un país en el que están creciendo cada vez más las practicas conservacionistas de suelo, como la siembra directa, debemos tener especial precaución ya que la principal fuente de inóculo va a provenir de los rastrojos de cultivos susceptibles u otras gramíneas que permanecen sobre la superficie del suelo.

La medición de DON que realizamos para analizar el comportamiento sanitario frente a la FE de los distintos genotipos resulta ser un parámetro relativo de la infección, pero no absoluto, por lo que debería asociarse a la evaluación de la sintomatología en espiga para lograr un relevamiento completo del comportamiento de los distintos materiales.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

Alberione, E. 2023. Actualización sanitaria de trigo en Argentina y manejo de enfermedades. CPIA Agropost, marzo-abril, 182.

Bai, G., Shaner, G. 1994. Scab of wheat: prospects for control. Department of Botany and Plant Pathology, Purdue University, EEUU.

Berthiller, F., Krska, R., Domig, K., Kneifel, W., Juge, N., Schuhmacher, R., Adam, G. 2011. Hydrolytic fate of deoxynivalenol-3-glucoside during digestion, *Toxicology Letters* 206, 264-267.

Bobadilla Meléndez, M., Hernández-Anguiano A. M., Zamora-Díaz M. R., Vargas-Hernández M. 2019. Evaluación de líneas de cebada maltera a fusariosis de la espiga y acumulación de deoxinivalenol. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10, 485-498.

Boddu, J., Cho, S., Muehlbauer, G. J. 2007. Transcriptome analysis of trichothecene-induced gene expression in barley. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 20, 1364-1375.

Bushnell, W. R., Hazen B. E., Pritsch C. 2004. Histology and Physiology of Fusarium Head Blight. En: KJ Leonard, WR Bushnell, eds, *Fusarium Head Blight of Wheat and Barley*. APS PRESS, Berlín.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. 2015. InfoStat, Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

Mesterhazy, A. 1995. Types and components of resistance to Fusarium head blight of wheat. *Plant Breeding* 114, 377-386.

ELIKA. Fundación Vasca para la seguridad agroalimentaria, Disponible en: <https://seguridadalimentaria.elika.eus/fichas-de-peligros/deoxinivalenol/>.Página actualizada el 18/05/2023

García Mariño, N. 2016. Selección in vitro para resistencia a boro y deoxinivalenol en cebada: marcadores asociados. Tesis Doctoral, Universitat de Lleida.

Geddes, J.; Eudes, F.; Toker, J. R.; Legge, W.G., Selinger, L. B. 2008. Evaluation of inoculation methods on infection and deoxinivalenol production by *Fusarium graminearum* on barley. Canadian Journal of Plant Pathology 30, 63-73.

Gilchrist, L. 2001. Perspectives on Fusarium head blight resistance in barley. En: Vivar, H.E. y A. McNab (eds.). Breeding Barley in the New Millenium: Proceedings of an International Symposium. Mexico, D.F.: CIMMYT.

Hanson, E., Ausemus, E., Stackman, E. 1950. Varietal resistance of spring wheats to Fusarium head blight. Fitopatología 40, 902-914.

Herbario virtual, Cátedra de Fitopatología, FAUBA. Fusariosis de la espiga del trigo. Disponible en: [https://herbariofitopatologia.agro.uba.ar/?page\\_id=222](https://herbariofitopatologia.agro.uba.ar/?page_id=222)

Huang, Y., Millett, B. P., Beaubien, K. A., Dahl, S. K., Steffenson, B. J., Smith, K. P., Muehlbauer, G. J. 2013. Haplotype diversity and population structure in cultivated and wild barley evaluated for Fusarium head blight responses. Theoretical and Applied Genetics, 126, 619–636.

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria de Uruguay. Tomado de: [http://www.inia.uy/Documentos/INIA%20La%20Estanzuela/INIA\\_guia%20manejo%20FE%20trigo%202014\\_web%20\(1\).pdf](http://www.inia.uy/Documentos/INIA%20La%20Estanzuela/INIA_guia%20manejo%20FE%20trigo%202014_web%20(1).pdf).

Lacey, J., Bateman, G. L., Mirocha, C. J. 1999. Effects of infection time and moisture on development of ear blight and deoxynivalenol production by *Fusarium* spp. in wheat. Applied Biology 134: 277-283.

Li, X., Shin, S., Heinen, S., Dill-Macky, R., Berthiller, F., Nersesian, N., ... Muehlbauer, G. J. 2015. Transgenic wheat expressing a barley UDP-glucosyltransferase detoxifies deoxynivalenol and provides high levels of resistance to *Fusarium graminearum*. Molecular Plant-Microbe Interactions 28, 1237-1246.

Maier, F. J., Miedaner, T., Hadel, B., Felk, A., Salomon, S., Lemmens, M., Kassner, H., Schäfer, W. 2006. Involvement of trichothecenes in fusarioses of wheat, barley and maize evaluated by gene disruption of the trichodiene synthase (Tri5) gene in three field isolates of different chemotype and virulence. Molecular Plant Pathology 7, 449-461.

Mariño N. 2016. Tesis doctoral: selección in vitro para resistencia a boro y deoxinivalenol en cebada: marcadores asociados. Universidad de Lleida.

Miralles, J D., Bennech-Arnold, R., Abeledo G. 2011. Cebada Cervecera. Editorial facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

McCallum, B. D., Tekauz, A. 2002. Influence of inoculation method and growth stage on Fusarium head blight in barley, Canadian Journal of Plant Pathology 24, 7780.

Monterroso, F. 2022. Presencia de la micotoxina deoxinivalenol en granos de la Red Nacional de Cebada Cervecera. Tesina de grado Ingeniería Agronómica, UNS.

- Mourellos, C. A., Malbrán, I., Balatti, P. A., Ghiringhelli, P. D., Lori, G. A. 2014. Gramineous and non-gramineous weed species as alternative hosts of *Fusarium graminearum*, causal agent of Fusarium head blight of wheat, in Argentina. *Crop Protection* 65, 100-104.
- Ogrodowicz, P., Kuczyńska, A., Mikołajczak, K., Adamski, T., Surma, M., Krajewski, P., ..., Jasińska, D. 2020. Mapping of quantitative trait loci for traits linked to Fusarium head blight in barley. *PLoS One* 15, e0222375.
- Saldúa, L., Perello, L., Yanniccari, M., Giménez, D., Malbrán, I., Lori, G., Castro, A. 2017. Defensas inducibles a fusariosis de la espiga en líneas experimentales de cebada. *Investigación Joven* 4, 70.
- Schweiger, W., Boddu, J., Shin, S., Poppenberger, B., Berthiller, F., Lemmens, M., ..., Adam, G. 2010. Validation of a candidate deoxynivalenol-inactivating UDP-glucosyltransferase from barley by heterologous expression in yeast. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 23, 977-986.
- Sallam, A. H., Haas, M., Huang, Y., Tandukar, Z., Muehlbauer, G., Smith, K. P., Steffenson, B. J. 2023. Meta-analysis of the genetics of resistance to Fusarium head blight and deoxynivalenol accumulation in barley and considerations for breeding. *Plant Breeding* 143, 2-25.
- Skadhauge, B., Thomsen, K. K., von Wettstein, D. 1997. The role of the barley testa layer and its flavonoid content in resistance to *Fusarium* infections- *Hereditas* 126, 147-160.
- Steffenson, B. J. 2003. Fusarium head blight of barley: Impact, epidemics, management, and strategies for identifying and utilizing genetic resistance. En K. J. Leonard & W. R. Bushell (Eds.), *Fusarium head blight of wheat and barley*. American Phytopathological Society Press. pag. 241–295.
- Trail, F. (2009). For blighted waves of grain: *Fusarium graminearum* in the postgenomics era. *Plant Physiology* 149, 103-110.
- Urrea, C.A., Horsley, R.D., Schwarz, P.B., B.J. Steffenson. 1999. Genetic diversity and characterization of barley genotypes with partial resistance to Fusarium head blight. 16<sup>th</sup> American Barley Researcher Workshop. Idaho Falls, EEUU.
- Villar de Galich, M. 2002. Trigo: Actualización 2002. INTA EEA Marcos Juárez. Información para Extensión N°71.
- Zanon, M. S. A., Cavaglieri, L. R., Palazzini, J. M., Chulze, S. N., Chiotta, M. L. 2024. *Bacillus velezensis* RC218 and emerging biocontrol agents against *Fusarium graminearum* and *Fusarium poae* in barley: In vitro, greenhouse and field conditions. *International Journal of Food Microbiology* 413, 110580.
- Zhu, H., Gilchrist, L., Hayes, P., Kleinhofs, A., Kudrna, D., Liu, Z., Prom, L., Steffenson, B., Toojinda, T., Vivar, H. 1999. Does function follow form? Principal QTLs for Fusarium head blight (FHB) resistance are coincident with QTLs for inflorescence traits and plant height in a doubled-haploid population of barley. *Theoretical and Applied Genetics* 99, 1221-1232.