

# Capítulo 15

## Calidad del grano

Alfredo Cirilo

Natalia Izquierdo



## 15. Calidad del grano

**Alfredo Cirilo y Natalia Izquierdo**

### 15.1. Estructura y composición del grano

Existe una amplia gama de tipos de granos de maíz. Las diferencias entre estos maíces radican en el tamaño, forma y color del grano, la dureza de su endosperma y la composición química. Tales diferencias condicionan la aptitud del grano para diferentes usos y destinos.

El componente más abundante del grano de maíz es el almidón, que representa entre 61 y 78% del peso seco del grano. Este carbohidrato está formado por dos tipos de cadenas: la amilosa (cadenas lineales unidas con enlaces  $\alpha$ -1,4) y la amilopectina (cadenas ramificadas que presentan cadenas lineales unidas con enlaces  $\alpha$ -1,4 con ramificaciones en enlaces  $\alpha$ -1,6). El almidón se almacena en estructuras de reserva denominadas amiloplastos dentro de las células del endosperma y constituye la principal fuente de energía para la futura planta durante la germinación y primeras etapas de vida de la plántula.

Las proteínas representan entre el 6 y 12% del peso seco del grano. Al igual que en otros cereales, incluyen algunas proteínas metabólico-estructurales, fundamentales para la estructura y el metabolismo del grano, y otras proteínas que tienen función de reserva. De estas últimas, la fracción más importante es la de prolaminas denominadas zeínas. Hay cuatro tipos de zeínas según su composición y peso molecular y se organizan en estructuras esféricas denominadas cuerpos proteicos en el interior de las células del endosperma. La denominada fracción zeínas-2 (conformada por beta y gamma zeínas) se localiza en la periferia de los cuerpos proteicos, estableciendo uniones entre cuerpos proteicos vecinos mediante la formación de puentes disulfuro por su contenido en aminoácidos azufrados. La fracción denominada zeínas-1 (conformada por alfa y delta zeínas), en cambio, constituye el relleno de los cuerpos proteicos, aportando estabilidad mecánica a esa estructura (Lending y Larkins, 1989; Mazhar y Chandrashekar, 1995; Shewry y Halford, 2002). Las zeínas se caracterizan por poseer bajo contenido de lisina, lo que hace que el grano de maíz sea deficiente en este aminoácido esencial. Se han desarrollado maíces con mayores niveles de lisina que los tradicionales como consecuencia de la reducción por mejora genética del contenido de zeínas e incremento de otras proteínas más ricas en este aminoácido; sin embargo, como ocurre en numerosos casos de genotipos seleccionados específicamente, la mejora en calidad es castigada con menores rendimientos y la presencia de atributos agronómicamente poco deseables.

Los cuerpos proteicos unidos entre sí conforman una estructura en red dentro de la cual se forman y crecen los amiloplastos. El grado de compactación entre ambos tipos de estructuras endospermáticas, los amiloplastos y los cuerpos protei-

cos, define la dureza del endosperma (Gooding y Davies, 1997; Cirilo y Andrade, 1998). Cuando el grado de compactación es leve, el endosperma resultante en esa parte del grano es harinoso, mientras que si el grado de compactación es intenso, el endosperma de esa porción es vítreo. La dureza resultante del grano dependerá de la proporción de endosperma vítreo y harinoso. Así, hay algunos tipos de grano con textura totalmente harinosa, otros que son totalmente vítreos y hay granos intermedios con relaciones variables de ambos tipos de endosperma. La dureza de los granos está condicionada, en gran parte, por la composición química de ambos componentes mayoritarios del grano. La abundancia, composición zeínica y firmeza de la red proteica condicionan la compactación que se logrará en el endosperma y así, su dureza (Robutti et al., 2000b; Gerde et al., 2016). Por su parte, la composición química del almidón también influye sobre la determinación de la dureza del endosperma ya que cuanto mayor sea la proporción de amilosa en el almidón de los amiloplastos mayor será el grado de dureza que pueda alcanzar el endosperma debido a que las cadenas lineales de amilosa son más compresibles que las de amilopectina dentro de la red de cuerpos proteicos que los comprime. En efecto, los endospermas córneos poseen por lo general mayor concentración de amilosa que los harinosos (Dombrink-Kurtzman y Knutson, 1997).

El tercer componente mayoritario del grano de maíz es el aceite, que se concentra en el embrión, a diferencia del almidón y las proteínas que se encuentran en su mayor parte en el endosperma del grano. El grano entero de maíz, al igual que otros cereales, posee relativamente baja concentración de aceite (3-6%, Mason y Cruz-Mason 2002), pero el germen aislado posee una concentración de aceite comparable a la de los granos oleaginosos (>40%).

## 15.2. Usos y procesamiento industrial

La mayor proporción de la producción mundial de maíz se destina a la alimentación animal integrando raciones, mientras que el resto es procesado en diversas industrias. En efecto, los granos de maíz tienen una muy amplia gama de aplicaciones industriales. El procesamiento industrial diferirá según el producto a obtener. Los tres principales procesamientos son la molienda seca, la molienda húmeda y la fermentación. En la industria de la molienda seca, se realiza una separación de los componentes anatómicos del grano (pericarpio, germen y endosperma) y se fracciona el endosperma en trozos de diverso tamaño durante el proceso de molienda. Los trozos de mayor tamaño, denominados flaking grits, son destinados a la elaboración de cereales para desayuno, snacks, cerveza y otros. Estos trozos de endosperma, de constitución mayoritariamente vítrea, son los de mayor valor comercial. También se obtienen de la molienda otras fracciones de endosperma de menor tamaño de partícula, como sémolas y harina de maíz. Si bien hay diversos factores que influyen en el rendimiento de flaking grits durante la molienda (forma del grano, tamaño, ajustes del proceso mecánico), los granos de mayor dureza endospermática son los que mayor rendimiento de flaking grits producen, mientras que los granos de menor

dureza producen en la molienda una mayor cantidad de fracciones de bajo valor. El secado postcosecha es fundamental en los granos destinados a la molienda seca ya que, si se realiza en forma incorrecta, con apuro y temperatura excesiva, puede afectar el proceso de fraccionamiento de la industria debido a que genera fisuras internas en el endosperma córneo que reducen el rendimiento de flaking grits durante la molienda, aumentando la proporción de fracciones de menor valor.

En la industria de la molienda húmeda el objetivo es extraer el almidón nativo o puro del endosperma del grano. Ese almidón posee numerosos usos y aplicaciones en la industria vinculados a su capacidad endulzante y espesante, entre otros atributos. El proceso de extracción implica la maceración del grano con agua y agregado de dióxido de azufre que, junto con enzimas proteasas propias del grano, ablandan las estructuras que contienen el almidón. Mediante diversos procesos físicos se separan el pericarpio y el germen del resto del grano y luego se separan las proteínas y el almidón del endosperma. La industria de molienda húmeda demanda granos con alto contenido de almidón y sin excesiva dureza de endosperma ya que la misma retarda el proceso de maceración. Un mal secado del grano con elevada temperatura en la postcosecha también puede afectar su rendimiento de almidón en la molienda húmeda ya que dificulta el proceso de maceración y la obtención del almidón puro al incrementar su ligamiento con las proteínas.

El germen separado del resto de las estructuras del grano durante la molienda se destina a la industria aceitera para extraer su aceite crudo. Este aceite, una vez refinado, posee muy buenas características organolépticas y culinarias que lo hacen apto para el consumo humano. Es un aceite suave, bastante estable y con alta cantidad de tocoferoles. Los ácidos grasos que componen el aceite y su concentración son: palmítico (8,6-16,5%), esteárico (0-3,3%), oleico (20,0-42,2%), linoleico (34,0-65,6%), linolénico (0-1,1%), araquídico (0-1,1%) y cantidades menores de otros ácidos grasos (Codex Alimentarius Commission, 2019). El germen desgrasado es un producto rico en proteínas y se lo utiliza para la alimentación animal conformando, junto con el pericarpio del grano, el hominy feed. Dado su uso en alimentación animal directa, un aspecto importante a evaluar en los granos destinados a esta industria es su contenido de micotoxinas nocivas para la salud de los animales ya que las mismas se pueden concentrar durante el procesamiento industrial.

Por su lado, la industria de la fermentación tiene como objetivo la obtención de bioetanol a partir de los carbohidratos del grano. El procesamiento del grano con este destino involucra las etapas de preparación del sustrato, la fermentación y la destilación del fermentado. En la preparación del sustrato, el grano es molido en harina y tratado con enzimas para obtener los azúcares fermentables. Para ello, se recurre a la acción de enzimas alfa-amilasas que producen la licuefacción del almidón y luego se le agrega una enzima secundaria (glucoamilasa) para convertir las moléculas del almidón licuado en azúcares fermentables (dextrosa). La fermentación es el proceso por el cual esos azúcares son transformados en etanol y gas carbónico por la acción de levaduras. Finalmente, en la destilación el etanol resultante del proceso anterior es separado del caldo de fermentación y purificado.

Del proceso de destilación se obtienen además dos subproductos importantes: el anhídrido carbónico y los granos destilados. El anhídrido carbónico se obtiene en grandes cantidades durante la fermentación y se puede recoger, limpiar de residuos de alcohol, comprimir y ser usado como gasificante de bebidas o para congelar carne. Los granos destilados, ya sea húmedos o secos, componen la burlanda o DGS que se destina a la alimentación animal.

Cada una de las tres industrias descritas demanda una calidad específica de grano tal que les permite maximizar el rendimiento industrial por hacer más eficientes los respectivos procesos industriales. Dicha calidad depende de la composición del grano de maíz. Por lo tanto, es conveniente conocer los factores que modifican esa composición.

### **15.3. Efectos ambientales sobre la calidad del grano de maíz**

Durante el crecimiento del cultivo en el campo se van sintetizando y acumulando a lo largo del período de llenado de los granos los componentes que conformarán el grano cosechado, definiendo así su calidad final. Las dinámicas de síntesis y acumulación de los distintos componentes del grano, gobernadas por regulaciones enzimáticas y la disponibilidad de sustrato para las reacciones, pueden ser influenciadas por el ambiente de producción, por lo que la composición final del grano es el resultado del balance de las distintas rutas metabólicas. Así es como existe una importante variabilidad en la calidad de los granos a obtener, incluso dentro de un mismo genotipo, que puede ser explorada según la oferta de recursos y condiciones ambientales de la localidad y el año de producción, así como también por las decisiones de manejo del cultivo que pueden modificar su aprovechamiento o mitigación. Un aspecto relevante en la producción de maíz es que la calidad del grano y el rendimiento del cultivo no necesariamente van de la mano. La calidad se determinará principalmente por las condiciones ambientales y de cultivo durante el período de llenado de los granos mientras que el rendimiento dependerá mayormente de las condiciones de crecimiento durante el período de floración (Andrade et al., 1999; Capítulo 4).

Reducciones en la disponibilidad de fotoasimilados por grano (relación fuente/destino) que reducen el tamaño del grano también afectan el contenido y concentración de sus componentes principales (almidón, proteínas y aceite). En términos relativos, las proteínas son las más sensibles a tales cambios (Uhart y Andrade, 1995; Borrás et al., 2002). Esto se debe a que una limitación en la disponibilidad de fotoasimilados para los granos durante su etapa de llenado también reduce el suministro de los mismos a las raíces, afectando la absorción de nitrógeno del suelo para complementar la removilización hacia los granos del nutriente localizado en las estructuras vegetativas, limitando la síntesis de proteínas en el grano en situaciones de elevada demanda para el llenado de granos (Pan et al., 1995). De esta manera, el contenido de proteínas del grano resulta muy sensible a las condiciones a las que

se expone el cultivo. Analizando datos de experimentos realizados durante varios años en diversas localidades de la zona productora de maíz en Argentina con híbridos de maíz de diferente dureza endospermática, Cerrudo et al. (2017) observaron que en todos ellos la concentración de proteínas aumentó a medida que mejoró la calidad del ambiente evidenciada por el mayor rendimiento en grano logrado. En cambio, a diferencia de lo que ocurre con las proteínas, la acumulación de almidón en el grano es más estable frente a variaciones en la calidad del ambiente de cultivo ya que la removilización de las reservas de fotoasimilados de la planta (carbohidratos solubles acumulados principalmente en tallo) permite amortiguar las variaciones en la fotosíntesis actual y proveer los recursos necesarios para sostener la síntesis del almidón del grano durante su llenado. Sólo en condiciones muy extremas, con severas restricciones para el crecimiento del cultivo en la etapa de postfloración, se pueden observar reducciones en la concentración de almidón en el grano de maíz.

La concentración de aceite del grano es también un carácter bastante estable en maíz y poco influenciado por el ambiente (Tanaka y Maddoni, 2008). Recientemente Abdala et al. (2018) caracterizaron la composición del grano de 32 híbridos de maíz difundidos actualmente en Argentina y observaron que la concentración de aceite varió sólo entre 4,5 y 5,5%. La estabilidad en la concentración de aceite del grano ante cambios en el ambiente también fue observada en híbridos seleccionados por alta concentración de aceite. En efecto, tanto en híbridos convencionales como en los de alto aceite la concentración de aceite sólo se redujo en condiciones extremas de crecimiento del cultivo como, por ejemplo, con altos niveles de defoliación (Mangen et al., 2005; Thomison y Nafziger, 2003).

Atendiendo a estas generalidades referidas a variaciones de los tres componentes principales del grano de maíz (almidón, proteína y aceite), se presentan a continuación y con mayor detalle los efectos del ambiente de producción, la elección del genotipo y las decisiones de manejo agronómico del cultivo sobre la determinación de dos de las principales cualidades del grano que refieren a sendas calidades para destinos específicos de uso: la dureza del endosperma y la composición del aceite.

### 15.3.1. Dureza del endosperma

La dureza del endosperma es una característica intrínseca del genotipo (Robutti et al., 2000a, Duarte et al., 2005, Gerde et al., 2016, Abdala et al., 2018). Sin embargo, las condiciones ambientales, principalmente durante el llenado de los granos, repercuten sobre el tamaño (Cirilo y Andrade, 1996; Borrás y Otegui, 2001; Cerrudo et al., 2013) y composición del grano (Borrás et al., 2002) y sobre su dureza (Eyherabide et al., 2004; Cirilo et al., 2011; Mayer et al., 2019; Tamagno et al., 2016). Las variaciones ambientales son particularmente importantes en Argentina dada la amplitud de su área maicera que involucra una extensa franja latitudinal (Hall et al., 1992; Capítulo 1) que genera, junto a la combinación de diversas prácticas de manejo (fechas de siembra, fertilización, densidad de plantas, etc.), una varia-

da gama de condiciones de crecimiento del maíz en las cuales se producen sus granos. Atendiendo a esto, Cerrudo et al. (2017) analizaron una red de ensayos que incluyó varias localidades del área maicera de Argentina distribuidas sobre una extensa transecta latitudinal (desde Corrientes a Viedma, entre 27 y 40° LS) donde evaluaron varias fechas de siembra (desde comienzos de primavera hasta inicios del verano), distintos niveles de fertilización (nitrogenada y azufrada) e híbridos de diversa expresión de dureza de endosperma (flint, semidentado y dentado) de similar largo de ciclo de crecimiento usados en la región. Como resultado reportaron que la condición de crecimiento (definida por la combinación de fecha de siembra, manejo de la fertilización y localidad) explicó el 64 % de la variación en la dureza del grano mientras que el genotipo sólo explicó el 22% de dicha variación.

Cirilo et al. (2011) indagaron los procesos afectados por las variaciones del ambiente y del manejo del cultivo y que están involucrados en la determinación de la dureza del grano de maíces 'flint' en experimentos a campo realizados en esa área maicera de Argentina. Estos autores encontraron granos más pesados y más duros a medida que las condiciones para el crecimiento del cultivo durante la etapa postfloración incrementaron la relación fuente/destino para el llenado de los granos. En efecto, Cerrudo et al. (2017), evaluando la transecta latitudinal mencionada anteriormente, hallaron una firme asociación entre la dureza del grano (estimada por la relación de molienda de fracciones gruesas y finas resultantes del molino) y la fuente de fotoasimilados disponible durante el llenado de los granos (Figura 15.1). Por consiguiente, junto con la elección del híbrido a sembrar, resultan estratégicas las decisiones de manejo agronómico que aseguren una buena provisión de fotoasimilados a los granos para su llenado durante la etapa de postfloración, tales como las siembras tempranas, el empleo de densidades moderadas de plantas y la provisión de una buena disponibilidad de nutrientes, todas ellas adecuadamente ajustadas a la oferta edafoclimática de cada localidad, ya que permitirán la obtención de granos con la dureza buscada.

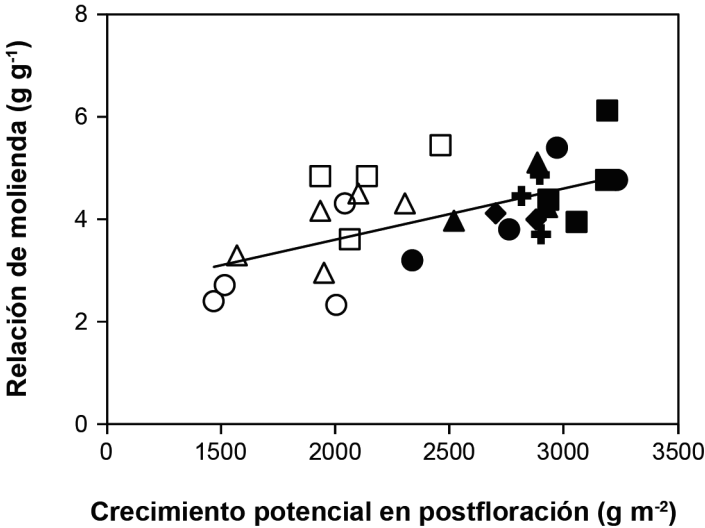


Figura 15.1: Dureza del grano de maíz en función de la fuente de fotoasimilados disponible (estimada por el crecimiento potencial del cultivo en postfloración) para fechas de siembra temprana (símbolos llenos) y tardía (símbolos vacíos) en diferentes localidades en transecta latitudinal del área maicera de Argentina: Corrientes-27°LS (diamantes), Paraná-31°LS (cruces), Pergamino-33°LS (cuadrados), Balcarce-37°LS (círculos), and Viedma-40°LS (triángulos). Cada punto es el promedio de tres híbridos de distinta aptitud para la molienda seca creciendo sin limitantes hídricas ni nutricionales en distintas localidades de la región maicera argentina ( $y = 1,02 \cdot 10^{-3}x + 1,6$ ;  $R^2 = 0,37$ ,  $P < 0,001$ ). (Adaptado de Cerrudo et al., 2017).

### Las proteínas del grano

El efecto de las variaciones ambientales sobre la dureza del endosperma resultan de su influencia sobre la síntesis y deposición de las proteínas de reserva (tipos de zeínas) y del almidón (amilosa y amilopectina) del grano. Wegary et al. (2011) y Gerde et al. (2016) reportaron aumentos en la deposición de proteínas en los granos de maíz frente a adiciones crecientes de fertilización nitrogenada. Dada su reconocida incidencia en la síntesis de proteínas, la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo es, entonces, uno de los factores que influyen sobre la dureza del endosperma. En los experimentos anteriormente mencionados sobre la transecta latitudinal con diversos tipos de maíces, se han encontrado aumentos en la dureza del grano junto con incrementos en las proteínas del grano y el rendimiento del cultivo, en respuesta al agregado de fertilizante nitrogenado en momentos cercanos a la floración, incluso en los mejores ambientes de producción (Cirilo y Cerrudo, 2014; Cerrudo et al., 2017). La Figura 15.2 muestra la directa relación entre las respuestas relativas de la dureza del grano (relación de molienda) y del rendimiento a la mejora en la nutrición nitrogenada en floración (Cirilo y Cerrudo, 2014).



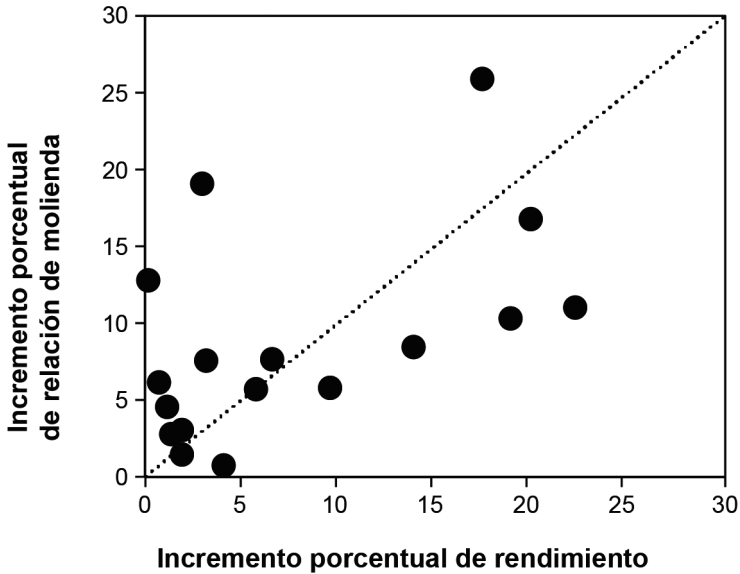


Figura 15.2: Relación entre los incrementos porcentuales resultantes de refertilización en prefloración respecto del testigo de la relación de molienda y del rendimiento en grano (promedios de tres híbridos de distinta aptitud para la molienda seca) en distintas localidades de la región maicera argentina. La línea punteada representa la relación 1:1 entre ambas variables. (Adaptado de Cirilo y Cerrudo, 2014).

Siendo que las zeínas, y particularmente las zeínas-1, alcanzan su mayor deposición durante las fases finales del llenado del grano (Ingle et al., 1965; Guo et al., 2013), es esperable que los incrementos en el contenido total de proteína del grano de maíz (por mayor disponibilidad de fotoasimilados para el crecimiento del grano en postfloración y por agregado de fertilizante nitrogenado en floración) se correspondan directamente con el contenido de zeínas, y que sea la fracción de zeínas-1 la que predomine en los granos más pesados, determinando una matriz proteica más fuerte en el endosperma (Singletary et al., 1990; Lee et al., 2006). En este sentido, se ha reportado que el contenido de zeínas-1 en granos de maíz es la fracción zeínica más influenciada por el ambiente del cultivo (Robutti et al., 2005; Gerde et al., 2016), mientras que el contenido de zeínas-2 resulta más dependiente del genotipo (Mestres y Matencio, 1996; Eyhéabide et al., 1996; Robutti et al., 2000a). Cerrudo et al. (2019), analizando el comportamiento de varios híbridos comerciales de maíz con variabilidad genética en dureza (desde granos dentados a 'flint') en la mencionada diversidad de ambientes y condiciones de producción de Argentina, también encontraron que las variaciones en la proteína de los granos están más explicadas por variaciones en el componente de zeínas-1 que de zeínas-2. La composición relativa de ambos tipos de zeínas en los cuerpos proteicos del endosperma afecta su dureza (Robutti et al., 1997). En este sentido, Cerrudo et al. (2017),

sobre la misma base de datos, reportaron que, si bien el ranking de dureza de los distintos tipos de híbridos analizados se mantuvo a través de todas las condiciones de cultivo evaluadas, las diferencias entre híbridos se incrementaron cuando dichas condiciones mejoraron favoreciendo la expresión de mayores valores de dureza y de rendimiento en grano. Por lo tanto, nuevamente, además de la correcta elección del genotipo es conveniente evitar la siembra con altas densidades y fechas tardías (particularmente en localidades de clima fresco de mayor latitud con período estival corto) y, a la vez, asegurar una buena nutrición mineral, especialmente nitrogenada, para obtener granos con la dureza requerida por la molienda seca.

### El almidón del grano

El almidón del grano de maíz también es sensible a variaciones en las condiciones de producción del cultivo y se ha reportado variabilidad en la participación de la amilosa en dicha composición frente a distintos ambientes de producción. En este sentido, Martínez et al. (2017), analizando los granos de la red de ensayos realizados sobre la anteriormente mencionada transecta latitudinal (27-40° LS) en Argentina, observaron que la relación amilosa/almidón se incrementó hacia el norte de dicha transecta y que las fechas tardías presentaron menor porcentaje de amilosa en todas las localidades evaluadas. Estos autores observaron que la temperatura mínima durante el llenado efectivo de los granos fue la variable que mejor se asoció con las variaciones en el porcentaje de amilosa del grano y en la relación amilosa/almidón, siendo ambos valores mayores cuanto más elevada fue esa temperatura (Figura 15.3). Martínez et al. (2019) confirmaron esta relación con experimentos específicos a campo donde manipularon la temperatura de las espigas en distintos momentos del llenado de los granos, encontrando que la primera etapa del llenado efectivo fue la más sensible, mientras que variaciones severas en la relación fuente/destino o en la oferta nutricional no afectaron de manera notable la composición del almidón. Estos cambios se pueden explicar por el efecto directo que tiene la temperatura sobre la actividad de las enzimas involucradas en la síntesis de los constituyentes del almidón (Lenihan et al., 2005). Particularmente la actividad de la enzima ramificadora del almidón, la que genera las uniones  $\alpha$ -1,6 conformando la amilopectina (James et al., 2003), sería la más afectada por el aumento de la temperatura. Así, incrementos térmicos en el ambiente de cultivo durante el período de llenado de los granos disminuirían la actividad de esta enzima y por ende la síntesis de amilopectina, incrementando en consecuencia la proporción de amilosa en el almidón. Considerando que la amilosa es más compresible que la amilopectina por la red proteica en que están insertos los amiloplastos en la matriz del endosperma, estos cambios impactan sobre la dureza del grano. Por lo tanto, la elección de localidades de ambientes más cálidos de menor amplitud térmica para la producción de maíz y la siembra en fechas tempranas permitirían obtener granos de mayor dureza que en otras localidades de mayor latitud o en siembras más demoradas.

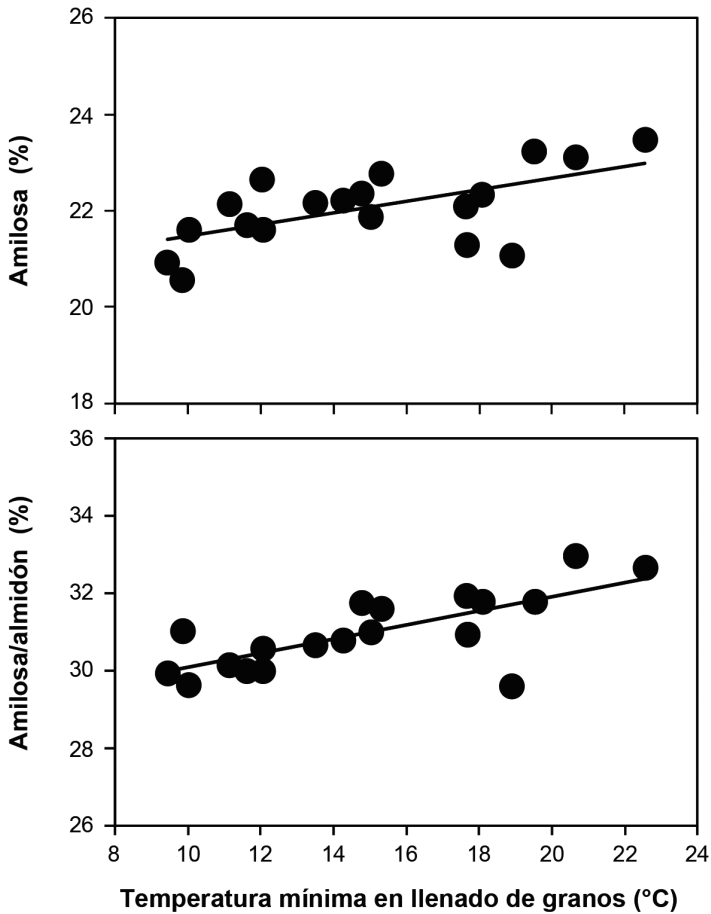


Figura 15.3: Porcentajes de amilosa (figura superior) y relación amilosa/almidón (figura inferior) en función de la temperatura mínima durante el período de llenado efectivo de los granos (promedios de tres híbridos de distinta aptitud para la molienda seca) en distintas localidades de la región maicera argentina. Para Amilosa (%)  $y = 20,2 + 0,12x$ ,  $R^2 = 0,36$ ,  $p = 0,01$ . Para amilosa/almidón (%)  $y = 28,3 + 0,18x$ ,  $R^2 = 0,53$ ,  $p = 0,001$ . (Adaptado de Martínez et al., 2017).

### 15.3.2. Composición del aceite

Las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla el cultivo de maíz y transcurre el llenado de los granos también inciden sobre la composición de ácidos grasos y la calidad final del aceite resultante. Izquierdo et al. (2009) reportaron una clara relación entre la temperatura media diaria durante el período de llenado de los granos y la concentración de ácido oleico del aceite de maíz (Figura 15.4). Este efecto ha sido descrito en aceites de distintas especies y se explicaría por

el efecto de la temperatura sobre la actividad de las enzimas involucradas en la ruta de biosíntesis de los ácidos grasos, afectando el paso metabólico de oleico a linoleico y acumulándose, en consecuencia, mayor proporción del primero de ellos. Entonces, aceites provenientes de distintas localidades o de distintas fechas de siembra presentan diferencias en la calidad de su aceite. La relación fuente/destino durante el llenado de los granos también ha sido descrita como un factor que modifica la composición ácida del aceite de maíz. En este sentido, incrementos en relación fuente/destino promueven una mayor concentración de ácido oleico y la reducción de los ácidos grasos poliinsaturados (Izquierdo et al., 2009; Figura 15.4). Estos efectos también han sido descritos en genotipos de maíz con composición ácida del aceite modificada. En este sentido, Zuñil et al. (2012) reportaron que los híbridos alto oleico de maíz también incrementaron su concentración de oleico a expensas de los ácidos poliinsaturados al aumentar la temperatura o la radiación solar interceptada y que la magnitud de estos cambios fue superior a la observada en genotipos no mejorados por ese carácter. Además, al igual que en otras especies, la disponibilidad de nutrientes (NPK) en maíz puede alterar la composición ácida del aceite (Ray et al., 2019) pero siempre en menor magnitud que los efectos reportados para temperatura y radiación solar interceptada. La síntesis de otros componentes del aceite como son los tocoferoles también es afectada por el ambiente. En situaciones de alta disponibilidad de fuente de fotoasimilados para el llenado de los granos, la cantidad total de tocoferoles por grano se incrementó en comparación con situaciones de baja fuente disponible (Izquierdo et al., 2011). Esa mayor acumulación de tocoferoles se relacionó directamente con la acumulación de aceite en el grano (Izquierdo et al., 2011). Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre en otras especies, la concentración final de tocoferoles en el aceite no resultó modificada por las variaciones en la fuente de fotoasimilados durante el llenado de los granos. Nuevamente resulta evidente que la elección adecuada de localidades y decisiones de manejo agronómico permiten obtener granos con calidades de aceite diferenciales.

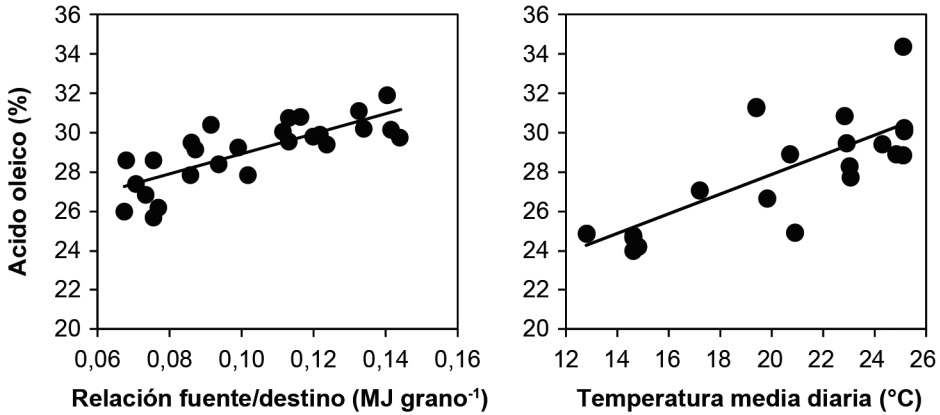


Figura 15.4: Relación entre la concentración de ácido oleico del aceite y la relación fuente/destino (radiación fotosintéticamente activa interceptada por planta por cada grano durante el período de llenado de granos; izquierda) o la temperatura media diaria durante el período de llenado de los granos (derecha). Para ácido oleico vs relación fuente/destino  $y = 23,81 + 50,83x$ ,  $R^2 = 0,61$ ,  $p < 0,0001$ ; para ácido oleico vs temperatura media diaria  $y = 17,72 + 0,50x$ ,  $R^2 = 0,56$ ,  $p < 0,0001$ . (Adaptado de Izquierdo et al., 2009).

### 15.3.3. Otras calidades

Además de los maíces con usos y destinos derivados de la dureza del endosperma y de la composición del aceite existen otros tipos de granos de maíz con diversos atributos obtenidos de la manipulación y selección genéticas o del aprovechamiento de variedades botánicas que son destinados a usos específicos. Entre ellos, el maíz pisingallo y el maíz alto aceite son sembrados extensivamente como especialidades en los cuales las variaciones en el ambiente de producción y el ajuste del manejo agronómico pueden modificar la calidad del grano obtenido.

#### Maíz pisingallo

El maíz pisingallo es una variedad botánica de maíz (*Zea mays* L. var. *evarta*) que es utilizada para la elaboración de pochoclos o palomitas de maíz. La principal característica diferencial del grano de maíz pisingallo es su capacidad de formar grandes copos cuando explota al ser calentado. Los granos de maíz pisingallo contienen una alta proporción de endosperma córneo, donde el almidón queda encapsulado en una fuerte malla proteica elástica y al ser calentado se expande generando presión hasta alcanzar la explosión del pericarpio, formando la palomita (Ziegler, 2001). El maíz pisingallo produce pochocho o palomitas de gran tamaño

debido a que tiene la correcta relación de tipos de endosperma córneo (mayoritario en este tipo de grano) y harinoso y con un pericarpio suficientemente fuerte (es el más grueso de todos los tipos de maíz conocidos; Singh et al., 2004) para contener la presión interna que se genera al calentarlo hasta el límite necesario para provocar la expansión del almidón. El volumen de expansión del grano, que se define como el volumen (en  $\text{cm}^3$ ) ocupado por los pochoclos producidos por cada gramo de granos sometido a cocción, es el principal parámetro de calidad en maíz pisingallo (Ziegler, 2001). El mismo depende principalmente del tamaño de las palomitas formadas y también de la cantidad de granos explotados. Existen varias características del grano que influyen sobre el volumen de expansión, entre ellas su contenido de humedad (Park y Maga, 2002), el grosor y grado de integridad del pericarpio (Mohamed et al., 1993; Da Silva et al., 1993), el tamaño del grano (Song et al., 1991; Allred-Coyle et al., 2000) y, especialmente, el contenido de proteínas (Borrás et al., 2006; Soylyu y Tekkanat, 2007). Si bien la aptitud diferencial para este destino de los granos de maíz pisingallo es una propiedad intrínseca, la misma puede ser modificada por el manejo agronómico y el ambiente de cultivo por lo que es necesario el ajuste del manejo cultural que permita expresar, además de su potencial de producción, una calidad conforme a la demanda que asegure la colocación del producto en el mercado y evite reducciones en las bonificaciones de precio.

Como todo cultivo de maíz, el rendimiento de maíz pisingallo es el resultado de la producción de biomasa por vía fotosintética a partir del aprovechamiento de la radiación solar y la fracción de ese crecimiento que termina alojado en los granos a cosecha (Andrade et al., 1996; Capítulos 3 y 4). La planta de maíz pisingallo presenta menor follaje con respecto a la del maíz común; el área foliar por planta en pisingallo sólo alcanza en general al 70-75% de la que tiene un maíz convencional (Cirilo, 2012). Esto limita su capacidad de captura de radiación cuando se lo cultiva en densidades bajas, por lo que el empleo de prácticas agronómicas que mejoran la eficiencia de captura de la radiación incidente por el cultivo, como el aumento en la densidad de plantas y la implantación con menor distancia entre surcos de siembra, puede generar ventajas en su crecimiento (Severini et al., 2010; Capítulos 9 y 10). En el mismo sentido, es necesario asegurar la sanidad del follaje, previniendo la proliferación de plagas o enfermedades que puedan comprometer la integridad y funcionamiento del área foliar desplegada. Por otro lado, los aumentos en la densidad de plantas del cultivo reducen el crecimiento de cada individuo y, por consiguiente, declina la granazón de cada planta, aunque el número total de granos en el cultivo se incrementa por la mayor cantidad de plantas y, por consiguiente, su rendimiento (Severini et al., 2008a). En general, los maíces pisingallo poseen un menor peso potencial de grano comparado con los maíces comunes (ca., sólo 50-60%) y también son menos sensibles a reducir su peso final de grano en respuesta a reducciones en el crecimiento de la planta durante la etapa de llenado de los granos (Severini et al., 2011). Sin embargo, reducciones en la proporción del crecimiento de la planta por cada grano a llenar durante dicha etapa (relación fuente/destino) por aumentos excesivos de la densidad de plantas pueden afectar el contenido de proteínas del grano y su volumen de expansión (Severini et al., 2008b; Figura

15.5), especialmente en siembras tardías (Balbi et al., 2010); por lo tanto, el ajuste del manejo del cultivo debe evitar tales situaciones. Del mismo modo es necesario asegurar una adecuada nutrición mineral, particularmente nitrogenada, para garantizar la calidad del grano dada la estrecha relación entre el contenido de proteína y su volumen de expansión (Severini et al., 2008b). Entonces es conveniente atender estos aspectos del manejo agronómico del maíz pisingallo para prevenir mermas en la calidad comercial.

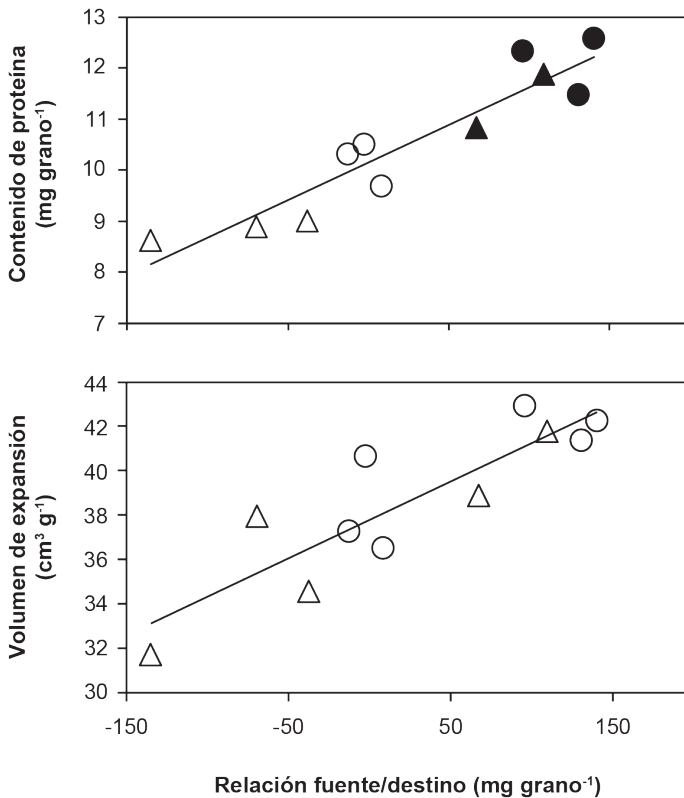


Figura 15.5: Contenido de proteína (figura superior) y volumen de expansión (figura inferior) de maíz pisingallo en respuesta a variaciones en la relación fuente/destino (estimada como el crecimiento del cultivo por cada grano durante el llenado de granos) provocadas por: densidad de 3 pl m<sup>-2</sup> sin (círculos llenos) y con (círculos vacíos) 75% de defoliación al inicio del período de llenado de granos, y densidad de 9 pl m<sup>-2</sup> sin (triángulos llenos) y con (triángulos vacíos) 75% de defoliación al inicio del mismo período. Para contenido de proteína vs crecimiento de grano  $y = 10,2 + 0,0015x$ ,  $R^2 = 0,88$ ,  $P < 0,001$ ; para volumen de expansión vs crecimiento de grano  $y = 37,8 + 0,035x$ ,  $R^2 = 0,76$ ,  $p < 0,005$ . (Adaptado de Severini et al., 2008b).

## Maíz alto aceite

Los híbridos de maíz alto aceite presentan concentraciones de aceite de 6-8% (versus 4-5% de los granos de maíces convencionales). Por consiguiente, este grano es preferido para integrar las raciones de bovinos y pollos debido a su alto valor energético como sustituto de grasas animales (Thomison et al., 2003). Los granos de maíz alto aceite aportan mayor valor calórico a las dietas, mejorando la tasa de engorde y la calidad de la carne o leche producidas (LaCount et al., 1995; Andrae et al., 2001). El mayor contenido de aceite también incide sobre la calidad de productos elaborados a partir de esos granos como por ejemplo las tortillas (Vazquez-Carrillo et al., 2014).

El incremento en la concentración de aceite se logra al aumentar la relación embrión/grano, ya que en el embrión es donde se concentra el aceite. Los maíces alto aceite poseen en general menor rendimiento que los convencionales (Laurie et al., 2004) debido al mayor costo energético requerido para la síntesis de aceite respecto de la del almidón e incluso, las proteínas. Una estrategia empleada para producir granos con estas características sin sacrificar demasiado rendimiento es la siembra de dos materiales a campo en mezcla de semillas, el mayoritario (90%) que no produce polen y el polinizador (10%) que porta el carácter alto aceite de modo de aprovechar el potencial de rendimiento del primero con el efecto de xenia en la polinización aportado por el segundo (Thomison et al., 2002). Existen también híbridos con niveles de aceite en grano mayor al 7% para su siembra convencional con una misma semilla, que son obtenidos por técnicas de mejoramiento tradicionales. Estos presentan mayor tamaño de embrión y mayor concentración de aceite en el embrión y, a la vez, un nivel de rendimiento en grano competitivo frente a los maíces comunes (Dudley y Lambert, 1992; Coutiño et al., 2008).

Restricciones en la disponibilidad de fotoasimilados por grano durante el llenado debidas a baja irradiancia o defoliación afectan el peso del grano (Borrás y Otegui, 2001) y su composición (Borrás et al., 2002). Mientras esa disminución reduce los contenidos de proteína y almidón (mg por grano) y promueve un descenso en la concentración de proteína y un aumento en la de almidón, la concentración de aceite en el grano no varía debido a una relación embrión/endosperma conservada (Paddick y Sprague, 1939) y una concentración de aceite en el embrión constante (Ingle et al., 1965) a través de un amplio rango de pesos de grano. Sin embargo, una drástica reducción de la fuente de fotoasimilados durante postfloración puede quebrar la estabilidad de la relación embrión/grano si la interrupción del llenado del grano ocurre durante su etapa temprana (Tanaka y Maddonni, 2008). No obstante, la estabilidad tanto de la relación embrión/grano como de la concentración de aceite del embrión frente a distintas relaciones fuente/destino durante el llenado en condiciones de campo confieren alta homeostasis a la concentración de aceite del grano de maíz (Thomison et al., 2003), por lo que las variaciones en el ambiente de producción o en el manejo del cultivo tienen escasa incidencia en ese atributo.



## Otros maíces especiales

A través del mejoramiento genético se han desarrollado maíces con calidades especiales aprovechando mutaciones en el genoma que generan granos que difieren en su estructura y/o composición química respecto de los maíces comunes y les confieren cualidades especiales para cubrir demandas específicas de la industria de procesado o el consumo directo. Entre éstos, los granos de maíz waxy portan una mutación que hace que el almidón almacenado esté constituido casi en su totalidad por amilopectina con muy baja cantidad de amilosa comparado con los maíces comunes que tienen cerca de 25% de amilosa (Thomison, 2011). De esta forma, el almidón posee bajo nivel de retrogradación permitiendo producir geles más estables y de textura suave. Estos granos son procesados mediante molienda húmeda obteniendo como principal producto ese almidón modificado que tiene diversos usos industriales (Ferguson, 2001) y mayor rendimiento de etanol (Yangcheng et al., 2012). Por su parte, existen otros granos de maíz de alta amilosa que portan la mutación amilosa “extender” (ae) de carácter recesivo que determina una mayor síntesis de amilosa, alcanzando valores de hasta 36-65% (Ferguson, 2001). Estos granos también se procesan mediante molienda húmeda, pero suelen presentar mayores inconvenientes en el procesamiento debido a esos altos niveles de amilosa. Los almidones con esa composición producen geles duros y opacos y poseen potenciales aplicaciones en la industria de los alimentos, del papel, textiles y de adhesivos y packaging biodegradables, entre otros usos.

Otro tipo especial de maíz es el de alta calidad de proteína (QPM: quality protein maize) asociada al gen mutante opaco-2 que posee proteínas con doble contenido de lisina y triptófano respecto de los maíces comunes deficientes en esos aminoácidos esenciales. Por mejora genética en CIMMYT se corrigieron deficiencias originales de textura de grano, rendimiento y comportamiento agronómico (Vivek et al., 2008). Su inclusión en la dieta de poblaciones vulnerables en los que el maíz compone su alimento principal puede mejorar notablemente el crecimiento y estado de salud de los niños. Esta especialidad es también usada en la alimentación de monogástricos ya que permite acelerar su crecimiento sin necesidad del agregado de suplementos proteínicos sintéticos a la ración. Finalmente, el maíz dulce (*Zea mays* L. var. *Saccharata*) tiene contenidos de azúcares solubles en sus granos que varían entre 10% y 35% (Macua et al., 2007). Se cultiva para consumo humano directo y se cosecha anticipadamente evitando la compactación del endosperma y logrando un mayor contenido de agua y azúcares en el grano. El sabor de estos maíces se debe a mutaciones [e.g., “sugary 1” (su1), “shrunken 2” (sh2), “sugary enhancer” (se1)] que, solas o combinadas, incrementan el contenido de azúcares simples a expensas de la síntesis de almidón por retardar su conversión, confiriendo al grano dulzor y texturas entre cremosas y crujientes según la proporción de fitoglucógeno (Ordás et al., 2007; Jeon et al., 2010; Dinges et al., 2001; Schultz y Juvik, 2004).

En la expresión de la calidad específica de todos estos maíces mutantes predomina el determinismo genético con poca influencia del ambiente. Sin embargo, todas las recomendaciones de manejo y ambiente de producción que se discutieron

para los otros maíces especiales en esta sección en cuanto a asegurar buenas condiciones para el crecimiento del cultivo, especialmente durante la etapa de llenado de granos, son pertinentes y aplican para la producción de estos maíces para obtener granos con la calidad requerida según la industria o destino final.

#### **15.4. Consideraciones finales**

Las variaciones en el ambiente de producción generadas por las distintas localidades y por las variaciones en el manejo agronómico del cultivo modifican la composición de los granos de maíz, afectando su calidad y su desempeño en el procesamiento industrial o su preferencia en el consumo directo. Una parte importante de las diferencias esperadas están relacionadas con las condiciones de crecimiento y la biomasa producida por el cultivo durante la etapa postfloración, que condicionan el llenado de los granos y su composición. En consecuencia, el conocimiento de los procesos y mecanismos responsables de estos efectos permiten la elección correcta del híbrido a sembrar y de las condiciones del ambiente de producción, así como el ajuste del manejo del cultivo, estrategias que deben ser consideradas conjuntamente para obtener granos de maíz con la calidad requerida para la industria o el destino específico. El conocimiento de esas respuestas es también de interés para la industria de procesamiento de maíz al orientarla acerca de la calidad del grano a conseguir según la procedencia y la manera con que el grano fue producido.

#### **15.5. Principales conceptos prácticos**

- Para obtener granos que alcancen la dureza requerida por la industria de la molienda seca es necesario, además de la correcta elección del genotipo, asegurarles buena provisión de fotoasimilados para su llenado; por lo tanto, es conveniente evitar la siembra con altas densidades y fechas tardías (particularmente en localidades de clima fresco de mayor latitud con período estival corto) y, a la vez, asegurar una adecuada nutrición mineral, especialmente nitrogenada.
- En caso de ser necesario el secado artificial del grano en postcosecha, si su destino es la industria de la molienda seca, es fundamental que el mismo se realice en forma correcta, de manera lenta y sin elevada temperatura, para evitar deteriorar la calidad cosechada con fisuras internas en el endosperma que reducen el rendimiento de flaking grits y aumentan el de fracciones de menor valor en la molienda.
- Un mal secado del grano en la postcosecha también puede afectar el rendimiento en la molienda húmeda ya que dificulta el proceso de maceración y obtención del almidón puro al incrementar su ligamiento con las proteínas; además es conveniente prever que la excesiva dureza de endosperma tam-

bién retarda el proceso de maceración.

- Es importante evitar el desarrollo de micotoxinas en los granos ya que las mismas se pueden concentrar en el subproducto resultante del procesamiento de la molienda húmeda (hominy feed) que se destina a la alimentación animal.
- Para producir maíces con composición acídica diferencial es importante tener en cuenta que el aceite de granos obtenidos en localidades o fechas de siembra que aseguren ambientes cálidos y/o buena provisión de fotoasimilados durante su llenado presenta mayores porcentajes de ácido oleico a expensas de los ácidos grasos poliinsaturados.
- Las variaciones en el ambiente o en el manejo del cultivo tienen escasa incidencia en la calidad de maíces con alta concentración de aceite en el grano dada la estabilidad de la relación embrión/grano y de la concentración de aceite del embrión en condiciones de campo; sin embargo, una drástica reducción de la fuente de fotoasimilados durante postfloración puede quebrar esa estabilidad si ocurre durante la etapa temprana del llenado del grano.
- En la producción de maíz pisingallo es necesario asegurar una adecuada nutrición mineral, particularmente nitrogenada, para garantizar calidad del grano dada la estrecha relación entre el contenido de proteína y su volumen de expansión. Además, es conveniente ajustar la estructura del cultivo (manejando la densidad y distancia entre hileras) para compensar su menor foliosidad en la captura de radiación y asegurar la sanidad de las hojas desplegadas. Además, si bien el peso del grano es bastante estable, es necesario tener presente que un aumento excesivo de la densidad de plantas puede afectar la calidad comercial, especialmente en siembras tardías.
- Dado que el rendimiento en grano obtenido con maíces de calidades diferenciales es generalmente inferior al de los maíces comunes (por el mayor requerimiento energético para producir granos con más proteína o aceite o por limitaciones en su potencial genético), la decisión de producir estos granos requiere prever su colocación en el mercado con acuerdos o contratos de presiembra para asegurar los sobreprecios esperados.

## 15.6. Referencias

- Abdala L., N. Vitantonio-Mazzini, J. Gerde, F. Martí Ribes, G. Murtagh y L. Borrás. 2018. Cambios en el germoplasma Argentino en dureza de grano de maíz. En: Manejo de maíz Flint. Editor: Lucas Borrás. Pp 13-30.
- Andrae J.G.; S.K., Duckett, C.W. Hunt, G.T. Pritchard y F.N. Owens, 2001. Effects of feeding high-oil corn to beef steers on carcass characteristics and meat quality. *Journal of Animal Science*, 79: 582-588. <https://doi.org/10.2527/2001.793582x>
- Allred-Coyale T.A.; R.B. Toma, W. Reiboldt y M. Thakur. 2000. Effects of moisture content, hybrid variety, kernel size, and microwave wattage on the expansion volume of microwa-

- ve popcorn. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 51: 389-394. <https://doi.org/10.1080/096374800426984>
- Andrade F.H., S.A. Uhart y A.G. Cirilo. 1993. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crops Research* 32: 17–25. doi: 10.1016/0378-4290(93)90018-I
- Andrade F.H., C. Vega, S. Uhart, A. Cirilo, M. Cantarero y O. Valentinuz. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Science*, 39: 453-459. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X0039000200026x>
- Andrade F.H. y M.A. Ferreiro. 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Research*, 48: 155-165. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(96\)01017-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(96)01017-9)
- Balbi C., N. Neiff, A. Ferrero y A.G. Cirilo. 2010. Maíz pisingallo en el noreste argentino: Efecto de genotipo, densidad de plantas y fecha de siembra. *Actas IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio de Sorgo*. Rosario, 17-19 Noviembre 2010.
- Borrás L. y M. E. Otegui. 2001. Maize kernel weight response to post-flowering source-sink ratio. *Crop Science*, 49: 1816-1822. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.1816>
- Borrás L., J. A. Curá y M.E. Otegui. 2002. Maize kernel composition and post-flowering source-sink ratio. *Crop Science*, 42: 781-790. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.7810>
- Borrás F., K. Seetharaman, N. Yao, J. L. Robutti, N.M. Percibaldi y G.H. Eyherávide. 2006. Relationship between popcorn composition and expansion volume and discrimination of corn types by using zein properties. *Cereal Chemistry*, 83: 86-92. <https://doi.org/10.1094/CC-83-0086>
- Cerrudo A. 2018. Incidencia del ambiente y el tipo de híbrido en la composición y la dureza del grano de maíz. Tesis Dr. Facultad de Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata).
- Cerrudo A., R.D. Martínez, N.G. Izquierdo, P. Laserna, A. Cirilo, L. Reinoso y O. Valentinuz, C. Balbi, F.H. Andrade. 2017. Environmental contribution to kernel hardness and yield of three contrasting maize hybrids. *Crop Science*, 57: 2788-2798. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.12.0997>
- Cerrudo A. y J. Di Matteo, E. Fernandez, M. Robles, L.O. Pico, F.H. Andrade. 2013. Yield components of maize as affected by short shading periods and thinning. *Crop and Pasture Science*, 64: 580-587. <https://doi.org/10.1071/CP13201>
- Cerrudo A., M.P. Laserna, N.G. Izquierdo y F.H. Andrade, A.G. Cirilo. 2019. Post-flowering environment affects zein composition and kernel hardness. *II Simposio Español de Fisiología y Mejora de Cereales*. Universidad de Córdoba, Córdoba, España. Resumen.
- Cirilo A.G. 2012. Fundamentos ecofisiológicos para el manejo del cultivo de maíz pisingallo. *Actas VII Jornada de Actualización Técnica de Maíz*. INTA-AIANBA-MAIZAR- Pergamino, 11 de julio de 2012. Versión CD, pág 1-4.
- Cirilo A.G., M. Actis, F.S. Borrás, J.L. Robutti, F.H. Andrade y O.R. Valentinuz. 2011. Crop management affects dry-milling quality of flint maize kernels. *Field Crops Research*, 122: 140-150. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.03.007>
- Cirilo A.G., F.H. Andrade. 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Science*, 36:325-331. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600020019x>
- Cirilo A.G. y A. Cerrudo. 2014. Calidad en maíz Flint: importancia de la nutrición nitrogenada del cultivo. En: *Manejo eficiente del nitrógeno en maíces Flint*. Borrás, L. (Ed.). pág. 49-59.
- Cirilo A.G. y F.H. Andrade. 1998. Maíz. En: Aguirrezábal L.; Andrade F. (coords.) *Calidad de Productos Agrícolas. Bases ecofisiológicas, genéticas y de manejo agronómico*. Imprenta Laukakolor: Buenos Aires. pp. 315-322.
- Codex Alimentarius Commission. 2019. *Codex alimentarius: Normas internacionales de los*

- alimentos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y Organización Mundial de la Salud. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/es>
- Coutiño-Estrada B., A. Ortega-Corona, V. Vidal-Martínez, G. Sánchez-Grajales y S. García-Acuña. 2008. Selección recurrente para incrementar el contenido de aceite en maíz Comiteco. *Rev. Fitotec. Mex.* 31 (Núm. Especial 3): 5-8. [https://doi.org/10.35196/rfm.2008.Especial\\_3.5](https://doi.org/10.35196/rfm.2008.Especial_3.5)
- Da Silva W.J., B.C. Vidal, M.E.Q. Martins, H. Vargas, C. PereiraM. Zerbetto y L.C.M. Miranda. 1993. What makes popcorn pop? *Nature* 362(6419), 417.
- Dinges J.R., C. Colleoni, A.M. Myers y M.G. James. 2001. Molecular structure of three mutations at the maize sugary1 locus and their allele-specific phenotypic effects. *Plant Physiology* 125: 1406-1418. <https://doi.org/10.1104/pp.125.3.1406>
- Dombrink- Kurtzman M.A. y C.A. Knutson. 1997. A study of maize endosperm hardness in relation to amylose content and susceptibility to damage. *Cereal Chemistry*, 74: 776-780. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1997.74.6.776>
- Duarte A.P., S.C. Mason, D.S. Jackson y J.C. Kiehl. 2005. Grain quality of Brazilian maize genotypes as influenced by nitrogen level. *Crop Science*, 45: 1958-1964. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0587>
- Dudley, J.W. y R.J. Lambert. 1992. Ninety generations of selection for oil and protein in maize. *Maydica* 37: 81-87. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6123514>
- Eyhérbade G.H., J.L. Robutti, N.M. Percibaldi, D.A. Presello y M. del P. Alvarez. 2004. Association between grain yield and endosperm hardness in maize cultivars. *Maydica*, 49: 319-326. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=16851754>
- Eyherabide G.H., J.L. Robutti y F.S. Borrás. 1996. Effect of near-infrared transmission-based selection on maize hardness and the composition of zeins. *Cereal Chemistry*, 73: 775-778.
- Ferguson V. 2001. High amylose and waxy corn. In: *Specialty Corns*. Editor A.R. Hallauer. CRC Press, NY.
- Gerde J.A., S. Tamagno, J.C. Di Paola y L. Borrás. 2016. Genotype and nitrogen effects over maize kernel hardness and endosperm zein profiles. *Crop Science*, 56: 1225-1233. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.08.0526>
- Gooding M.J. y W.P. Davies. 1997. *Wheat production and utilization*. CAB Int., Wallingford, Uk. 3350.
- Hall A.J., C.M. Rebella, C.M. Ghersa, J.P. Culot. 1992. Field-crops systems of the Pampas. En: Pearson CJ (Ed.) *Field Crop Ecosystem*. Elsevier, Amsterdam, pp 413-450.
- Ingle J., D. Beitz y R.H. Hageman. 1965. Changes in composition during development and maturation of maize seeds. *Plant Physiology*, 40:835-839. <https://doi.org/10.1104%2Fpp.40.5.835>
- Izquierdo N.G., S. Nolasco, C. Mateo, D. Santos y L.A.N. Aguirrezábal. 2011. Relationship between oil tocopherol concentration and oil weight per grain in several crop species. *Crop and Pasture Science*, 62: 1088-1097. <https://doi.org/10.1071/CP11313>
- Izquierdo N.G., L.A.N. Aguirrezábal, F.H. Andrade, C. Geroudet, M. Pereyra Iraola y O. Valentínuz. 2009. Intercepted solar radiation affects oil fatty acid composition in crop species. *Field Crops Research*, 114: 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.07.007>
- James M.G., K. Denyer y A.M. Myers. 2003. Starch synthesis in the cereal endosperm. *Current Opinion in Plant Biology*, 6: 215-222. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00042-6)
- Jeon J.S., N. Ryoo, T.R. Hahn, H. Walia y Y. Nakamura. 2010. Starch biosynthesis in cereal endosperm. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48: 383-392. <https://doi.org/10.1016/j>

- plaphy.2010.03.006
- LaCount D.W., J.K. Drackley, T.M. Cicela y J.H. Clark. 1995. High Oil Corn as Silage or Grain for Dairy Cows During an Entire Lactation. *Journal of Dairy Science*, 78: 1745-1754. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76800-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76800-X)
- Laurie C.C.; Chasalow, S.D.; LeDeaux, J.R.; McCarroll, R.; Bush, D.; Hauge, B.; Lai, C.; Clark, D.; Rocheford, T.R. y J.W. Dudley. 2004. The genetic architecture of response to long-term artificial selection for oil concentration in the maize kernel. *Genetics*, 168: 2141-2155. <https://doi.org/10.1534/genetics.104.029686>.
- Lending C.R. y B.A. Larkins. 1989. Changes in the zein composition of protein bodies during maize endosperm development. *Plant Cell*, 1: 1011-1023. <https://doi.org/10.1105/tpc.1.10.1011>
- Lenihan E., L. Pollak y P. White. 2005. Thermal properties of starch from exotic-by-adapted corn (*Zea mays* L.) lines grown in four environments. *Cereal Chemistry*, 82: 683-689. <https://doi.org/10.1094/CC-82-0683>
- Macua J.I., I. Lahoz, S. Calvillo, J.J. Rodriguez y J.M. Bozal. 2007. Maíz dulce. Cultivo en Navarra. *Revista Navarra Agraria*, EneroFebrero 2007. ITG Agrícola. Navarra. España.
- Mangen T.F., P.R. Thomison y S.D. Strachan. 2005. Early-season defoliation effects on Top-Cross high-oil corn production. *Agronomy Journal*, 97: 823-831. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0237>
- Martínez R.D., A.G. Cirilo, A. Cerrudo, F.H. Andrade, L. Reinoso, O. Valentinuz, C. Balbi y N.G. Izquierdo. 2017. Changes of starch composition by postflowering environmental conditions in kernels of maize hybrids with different endosperm hardness. *European Journal of Agronomy*, 86: 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.04.001>
- Martínez R.D., A.G. Cirilo, A. Cerrudo, F.H. Andrade y N.G. Izquierdo. 2019. Discriminating post-silking environmental effects on starch composition in maize kernels. *Journal of Cereal Science*, 87: 150-156. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.03.011>
- Mason S. y N. Croz-Mason. 2002. Agronomic practices influence maize grain quality. *Journal of Crop Production*, 5: 75-91. doi:10.1300/J144v05n01\_04
- Mayer L.I., A.G. Cirilo y G.A. Maddonni. 2019. Kernel hardness-related traits in response to heat stress during the grain-filling period of maize crops. *Crop Science*, 59: 318-332. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.04.0245>.
- Mazhar H. y A. Chandrashekar. 1995. Quantification and distribution of kafirins in the kernels of sorghum cultivars varying in endosperm hardness. *Journal of Cereal Science*, 21: 155-162. [https://doi.org/10.1016/0733-5210\(95\)90031-4](https://doi.org/10.1016/0733-5210(95)90031-4)
- Mestres C. y F. Matencio. 1996. Biochemical basis of kernel milling characteristics and endosperm vitreousness of maize. *Cereal Science*, 24: 283-290.
- Mohamed A.A., R.B. Ashman y A.W. Kirleis. 1993. Pericarp Thickness and Other Kernel Physical Characteristics Relate to Microwave Popping Quality of Popcorn. *Journal of Food Science*, 58: 342-346. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb04271.x>
- Ordás B., M.C. Romay y P. Revella. 2007. Maíz Dulce, ¿Por qué no? *Revista Horticultura* N° 202. Octubre de 2007. España.
- Paddick M.E. y H.B. Sprague. 1939. Maize seed characters in relation to hybrid vigor. *Journal of the American Society of Agronomy*, 31:743-750.
- Pan W.L., J.J. Camberato, R.H. Moll, E.J. Kamprath y W.A. Jackson. 1995. Altering source-sink relationships in prolific maize hybrids: consequences for nitrogen uptake and remobilization. *Crop Science*, 35: 836-845. <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500030034x>
- Park D. y J.A. Maga. 2002. Effects of storage temperature and kernel physical condition on popping qualities of popcorn hybrids. *Cereal Chemistry*, 79: 572-575. <https://doi.org/10.1002/cche.10022>

- org/10.1094/CCHEM.2002.79.4.572
- Ray K., H. Banerjee, S. Dutta, A.K. Hazra y M. Kaushik. 2019. Macronutrients influence yield and oil quality of hybrid maize (*Zea mays* L.). *Plos one*, 14 (5): e0216939. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216939>
- Robutti J.L., F.S. Borrás, G.H. y Eyhéride. 1997. Zein composition of mechanically separated coarse and fine portions of maize kernels. *Cereal Chemistry*, 74: 75-78. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1997.74.1.75>
- Robutti J.L., F.S. Borrás, F.E. Ferrer, N.M. Percibaldi y C.E. Knutson. 2000b. Evaluation of quality factors in Argentine maize races. *Cereal Chemistry*, 77: 24-26. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2000.77.1.24>
- Robutti J.L., F.S. Borrás, M.E. Ferrer y J.A. Bietz. 2000a. Grouping and identification of Argentine maize races by chemometric analysis of zein RP-HPLC data. *Cereal Chemistry*, 77: 91-95. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2000.77.2.91>
- Robutti J.L., F.S. Borrás, A.M. Di Martino y G.H. Eyhéride. 2005. Estudio de la composición de las zeínas y glutelinas en híbridos comerciales de maíz cultivados en diferentes ambientes. Su asociación con la dureza del grano. En: *Actas del 8° Congreso Nacional del Maíz. Capítulo: Usos e Industrialización*. AIANBA (Ed.), Rosario, Santa Fe, Argentina. pp. 393-395.
- Schultz J. A. y J.A. Juvik. 2004. Current models for starch synthesis and the sugary enhancer1 (se1) mutation in *Zea mays*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 42: 457-464. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2004.05.008>
- Severini A.D., A.G. Cirilo y L. Borrás. 2008a. Maíz pisingallo: El manejo del cultivo y la calidad comercial. En: *3ra. Jornada de Actualización Técnica de Maíz. Jornada Actualización Técnica de Maíz, INTA Pergamino, 17 Julio 2008*. Pág. 31-34.
- Severini A.D., L. Borrás y A.G. Cirilo. 2010. Determinación del rendimiento y la calidad de maíz pisingallo en función del crecimiento del cultivo durante el llenado de granos. *Actas IX Congreso Nacional de Maíz y I Simposio de Sorgo*. Rosario, 17-19 Noviembre 2010.
- Severini A.D., L. Borrás, M. Westgate y A.G. Cirilo. 2008b. Expansión del grano de maíces pisingallo y disponibilidad de asimilados por grano durante el llenado efectivo. *Actas XIII Reunión Latinoamericana y XXVI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal*. Rosario, 21-24 Septiembre 2008. Pág. 52.
- Severini A.D., L. Borrás, M.E. Westgate y A.G. Cirilo. 2011. Kernel number and kernel weight determination in dent and popcorn maize. *Field Crops Research*, 120: 360-369. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.013>
- Shewry P.R. y N.G. Halford. 2002. Cereal seed storage proteins: structures, properties and role in grain utilization. *Journal of Experimental Botany*, 53: 947-958. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.947>
- Singh S.K., S. Narpinder y K. Maninder. 2004. Characteristics of the different corn types and their grain fractions: physicochemical, thermal, morphological and rheological properties of starches. *Journal of Food Engineering*, 64:119-127. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.09.023>
- Singletary G.W., D.C. Doehlert, C.M. Wilson, M.J. Muhitch y F.E. Below. 1990. Response of enzymes and storage proteins of maize endosperm to nitrogen supply. *Plant Physiology*, 94: 858-864. <https://doi.org/10.1104/pp.94.3.858>
- Song A., S.R. Eckhoff, M. Paulsen y J.B. Litchfield. 1991. Effects Of Kernel Size And Genotype On Popcorn Popping Volume And Number Of Unpopped Kernels. *Cereal Chemistry* 68: 464-467. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=5281038>
- Soylu S. y A. Tekkanat. 2007. Interactions amongst kernel properties and expansion volume

- in various popcorn genotypes. *Journal of Food Engineering* 80: 336-341. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.001>
- Tamagno S., I.A. Greco, H. Almeida, J.C. Di Paola, F. Marti Ribes y L. Borrás. 2016. Crop management options for maximizing maize kernel hardness. *Agronomy Journal*, 108: 1561-1570. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0590>.
- Tanaka W. y G.A. Maddonni. 2008. Pollen source and post-flowering source/sink ratio effects on maize kernel weight and oil concentration. *Crop Science*, 48: 666-677. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.08.0450>.
- Thomison P.R. 2011. Specialty corns: waxy, high-amylose, high-oil, and high-lysine corn. Ohio State University Extension. <http://ohioline.osu.edu/agf-fact/0112.html>.
- Thomison P.R. y E.D. Nafziger. 2003. Defoliation affects grain yield, protein and oil of Top-Cross High-oil corn. *Plant Management Network*. <https://doi.org/10.1094/CM-2003-1027-01-RS>.
- Thomison P.R., A.B. Geyer, L.D. Lotz, H.J. Siegrist y T.L. Dobbels. 2002. TopCross high-oil corn production: agronomic performance. *Agronomy Journal*, 94: 290-299. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.0290>
- Thomison P.R., A.B. Geyer, L.D Lotz, H.J Siegrist y T.L Dobbels. 2003. Top cross high oil corn production: Select grain quality attributes. *Agronomy Journal*, 95:147-154. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.1470>
- Uhart S.A. y F.H. Andrade. 1995. Nitrogen deficiency in maize: II. Carbon-nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. *Crop Science* 35: 1384-1389.
- Vázquez-Carrillo M.G., D. Santiago-Ramos, Y. Salinas-Moreno, J. López-Cruz, M.C. Ybarra-Moncada y A. Ortega-Corona. 2014. Oil content in maize (*Zea mays* L.) genotypes and its relationship with quality and texture of tortilla. *Agrociencia*, 48: 159-172.
- Vivek B.S., A.F. Krivanek, N. Palacios-Rojas, S. Twumasi-Afriyie y A.O. Diallo. 2008. Mejoramiento de maíz con calidad de proteína (QPM): Protocolos para generar variedades QPM. México, D.F.: CIMMYT.
- Wegary D., M. T. Labuschagne y B. S. Vivek. 2011. Protein quality and endosperm modification of quality protein maize (*Zea mays* L.) under two contrasting soil nitrogen environments. *Field Crops Research*, 121: 408-415. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.01.010>
- Yangcheng H., J. Hongxin, M. Blanco y J. Jane. 2012. Characterization of normal and waxy corn starch for bioethanol production. *Agricultural and Food Chemistry*, 61:379-386. <https://doi.org/10.1021/jf305100n>
- Ziegler K.E. 2001. Popcorn. En: "Corn: Chemistry and Technology", Chapter 22, 2nd Edition Edited by: Pamela J. White and Lawrence A. Johnson, American Association of Cereal Chemist.
- Zuil S.G., N. G. Izquierdo, J. Luján, M. Cantarero y L. A. N. Aguirrezábal. 2012. Oil quality of corn and soybean genotypes with increased oleic acid percentage as affected by intercepted solar radiation and temperature. *Field Crops Research*, 127: 203-214. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.019>