



**DINÁMICA DE LA COSECHA DE HUITLACOCHÉ (*Ustilago maydis* Cda.)
EN NUEVE HÍBRIDOS COMERCIALES DE MAÍZ †**

**[DYNAMICS OF HUITLACOCHÉ HARVEST (*Ustilago maydis* Cda.) IN
NINE COMMERCIAL CORN HYBRIDS]**

**Cuauhtémoc Escalante-Perez¹, Evert Villanueva-Sánchez^{2*},
Jaime Sahagún-Castellanos¹, Irma Sánchez-Cabrera³
and Clemente Villanueva-Verduzco^{1*}**

¹*Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-
Texcoco Km 38.5 Chapingo, Estado de México, C. P. 56230. México.*

²*CONACYT-Universidad Autónoma Chapingo, Laboratorio Nacional de
Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal. Carretera México-Texcoco Km
38.5 Chapingo, Estado, de México, C. P. 56230. México. Email.
clemente.villanueva@gmail.com*

³*Recursos Genéticos y Productividad Orientación Genética, Colegio de
Postgraduados Campus Montecillo. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco,
Montecillo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230. México.*

**Corresponding author*

SUMMARY

Background. In contract farming, planned production is desirable. The planned artificial production of huitlacoche can be achieved by successive sowing dates to guarantee the continuous supply of the product throughout the year. **Objective.** To analyze the yield of huitlacoche and its harvest distribution through cutting in nine maize commercial hybrids. **Methodology.** An experiment was carried out in a completely randomized design, with four replications in Chapingo State of México, México. Measurements of yield and quality (gall size) of the fungus were made in four cuts per hybrid during harvest. **Results.** In the nine hybrids studied, most of the harvest was concentrated in the second cutting. The Cronos and Dk-2042 hybrids (3,608 kg·ha⁻¹ and 3,301 kg·ha⁻¹, respectively) were the best in yield and quality of fungal galls and with contrasting distribution of their harvest. **Implications.** Hybrids Cronos and Dk-2042 can be used in an intensive and continuous production unit of huitlacoche. Cronos can be used to attend a daily demand of 1.5 t of fresh huitlacoche; while the Dk-2042 can be used to satisfy a weekly demand of 6 t, due to the respective overlaps of harvest among successive sowing dates. A surface of 14 ha is required, sowing 1 ha·week⁻¹ of corn with a yield of 6 t·ha⁻¹ to offer to the market 1.5 t·día⁻¹ (Cronos hybrid) or 6 t·week⁻¹ (Dk-2042 hybrid), depending on their contrasting distribution of the harvest among cutting. **Conclusions.** There are clear differences among the distribution of the harvested huitlacoche among commercial maize hybrids. The analysis of the yield per cutting allows to establish the varietal pattern of fungus harvest. Sequential plantings of complementary harvesting dynamics hybrids can be scheduled to serve continuous supply contracts.

Keywords: Corn hybrids; huitlacoche; productivity; harvest distribution.

RESUMEN

Antecedentes. En la agricultura por contrato, la producción planificada es deseable. La producción artificial planificada de huitlacoche puede lograrse mediante siembras sucesivas para garantizar la oferta continua del producto durante todo el año. **Objetivo.** Analizar el rendimiento de huitlacoche y la distribución de la cosecha por corte en nueve híbridos comerciales de maíz. **Metodología.** Se realizó un experimento en un diseño completamente al azar, con cuatro repeticiones en Chapingo Estado de México, México. Mediciones de rendimiento y calidad (tamaño de agallas) del hongo, se realizaron en cuatro cortes por híbrido durante la cosecha. **Resultados.** En los nueve híbridos estudiados, la mayor parte de la cosecha se concentró en el segundo corte. Los híbridos Cronos y Dk-2042 (3,608 kg·ha⁻¹ y 3,301 kg·ha⁻¹, respectivamente) fueron los mejores en rendimiento y calidad de agallas del hongo y con distribución contrastante de su cosecha. **Implicaciones.** Los híbridos Cronos y Dk-2042 pueden ser utilizados en una unidad de producción intensiva y continua de huitlacoche. Cronos puede ser utilizado para responder a una demanda diaria de 1.5 t de huitlacoche fresco; mientras que Dk-2042 puede usarse para responder una demanda de 6 t semanales, por los respectivos traslapes de cosecha entre siembras sucesivas. Se requiere de una superficie de 14 ha, sembrando 1 ha·semana⁻¹ de maíz con un rendimiento de 6 t·ha⁻¹ para ofrecer al mercado 1.5 t·día⁻¹ (híbrido Cronos) o 6 t·semana⁻¹

† Submitted July 2, 2019 – Accepted July 23, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462.

¹ (híbrido Dk-2042), en función de su distribución contrastante de la cosecha entre cortes. **Conclusiones.** Hay claras diferencias entre la distribución de la cosecha de huitlacoche entre híbridos comerciales de maíz. El análisis del rendimiento por corte permite establecer el patrón varietal de la cosecha del hongo. Pueden programarse siembras secuenciadas de híbridos de dinámica de cosecha complementaria para atender contratos de abastecimiento continuo. **Palabras clave:** Híbridos de maíz; huitlacoche; productividad; distribución de cosecha.

INTRODUCCIÓN

El huitlacoche (*Ustilago maydis* Cda.) es un hongo que enferma al cultivo de maíz y también es apreciado para el consumo humano (Agrios, 2005, Kamper *et al.*, 2006, Villanueva, 2007 y 2009, Aydoğdu and Gölükçü, 2017). En México se consume desde la época prehispánica debido a su exquisito sabor; su consumo era exclusivo para los emperadores ya que se consideraba un manjar. Debido a su sabor único, el consumo de huitlacoche va en aumento y cada vez tiene más demanda en México, Estados Unidos, Europa y Japón, principalmente. También se ha considerado como uno de los platillos de la cocina tradicional mexicana y más recientemente de la alta cocina internacional (Guzmán, 1994). En México se consumen entre 400-500 t de huitlacoche obtenido por recolección (Villanueva, 2007 y 2009, Aydoğdu and Gölükçü, 2017) y no hay datos estadísticos sobre el volumen de producción del huitlacoche cultivado. Las propiedades nutricionales del huitlacoche se han determinado por varios autores en base seca, mostrando altos contenidos de hidratos de carbono y fibra (45.0 a 66.5 % y 11.0 a 26.6 %, respectivamente), con una cantidad respetable de proteína cruda (11.62 a 16.4 %), mientras que el de grasas es bajo (1.0 a 6.5 %) (Mendoza, 2008); es muy rico en magnesio ($262.69 \pm 0.0 \text{ mg.kg}^{-1}$), fósforo ($342.07 \pm 0.02 \text{ mg.kg}^{-1}$) y zinc ($2.51 \pm 0.06 \text{ mg.kg}^{-1}$); en ácidos grasos (oleico: $42.49 \pm 0.12\%$; linoleico: $26.97 \pm 0.18\%$; palmítico: $14.79 \pm 0.17\%$; 11-eicosenóico: $4.39 \pm 0.10\%$ y araquidónico: $2.86 \pm 0.10\%$); fenoles y flavonoides antioxidantes (fenoles totales: $113.11 \pm 0.2 \text{ mg GAE.kg}^{-1}$ de muestra seca; flavonoides totales ($28.51 \pm 0.16 \text{ mg CE.kg}^{-1}$ de materia seca; actividad antioxidante IC₅₀: $186.44 \pm 0.09 \text{ mg.mg}^{-1}$ DPPH), resaltando que el huitlacoche es mucho más rico en sustancias bioactivas que la mayoría de los hongos comestibles (Aydoğdu and Gölükçü, 2017). Contiene aminoácidos esenciales como lisina, glicina, valina, leucina y ácido glutámico, así como otros catorce aminoácidos comunes. Además, contiene cantidades considerables de polifenoles, β -glucanos, azúcares libres y compuestos antioxidantes (Desentis *et al.*, 2006; Valdez-Morales, 2016), que se incrementan con la cocción así como sustancias con probada actividad benéfica para la salud como campesteril-3- β -glucopiranosido, Δ 7-avenasterol, Δ 7-estigmasterol, ergosterol, α -tocoferol, β -criptoxantina, ácido clorogénico, catequina, metil galato, epicatequina y ácido gálico, que son antioxidantes que ayudan a reducir el daño generado durante el estrés oxidativo (Salazar-López *et al.*, 2017). Así mismo contiene vitaminas como tiamina, biotina, riboflavina,

niacina fólico y ácido ascórbico; y minerales como calcio, nitrógeno, fósforo (Ruíz y Martínez, 1998). El huitlacoche además de enfermedad del maíz (León *et al.*, 2004), alimento humano (Ruíz y Martínez, 1998; Villanueva, 2007), hongo medicinal (Guzmán, 1994) y modelo biológico para estudiar las bases moleculares de la patogenicidad de los hongos fitopatógenos, se ha usado también como medio para producir en bioreactores aminoácidos y vacunas (Juarez-Montiel *et al.*, 2015) y se plantea su uso como aditivo en la elaboración de tortillas mexicanas (Aydoğdu and Gölükçü, 2017).

Algunos productores de maíz e investigadores han aplicado técnicas para inducir la infección de huitlacoche artificialmente, evalúan cepas nativas, mezclas de ellas y hasta cruza, como también la cantidad de inóculo, forma y época de aplicación, las condiciones ambientales tanto en campo abierto como en invernadero, para producir el mayor porcentaje de incidencia, severidad y rendimiento del hongo en las mazorcas inoculadas (Villanueva *et al.*, 2007). Por lo que su producción artificial es una realidad en México, donde ya es un nuevo cultivo desde el 2007. En los estudios se reportan rendimientos de 12 t.ha^{-1} de hongo fresco (Martínez *et al.*, 2000) a cielo abierto y de hasta 29 t.ha^{-1} en invernadero (Madrigal *et al.*, 2010). Se sabe que para producir huitlacoche artificialmente es necesario un genotipo de maíz (hospedante) susceptible al hongo, así como también que el patógeno sea altamente virulento y que el ambiente sea favorable con una humedad relativa entre 80-85 % (Villanueva *et al.*, 2007) y una temperatura entre 16-32 °C (Walbot y Skibbe, 2010, León *et al.*, 2004).

El huitlacoche del maíz es una especie de hongo que posee reproducción sexual y por lo tanto gran variación genética, que implica existencia de variantes en los componentes fisiológicos, los cuales determinan en gran parte la eficiencia biológica y la productividad, así como las prácticas de manejo agronómico apropiadas para un mejor desarrollo del maíz como cultivo hospedante del huitlacoche y del rendimiento del hongo (Villanueva *et al.*, 2007). El crecimiento del huitlacoche se puede referir a un incremento irreversible de materia seca o volumen, cambios en tamaño, masa, forma o número de estructuras, como una función del genotipo y el ambiente, dando como resultado un aumento cuantitativo del tamaño y peso de la agalla (masa de teliosporas del hongo cubierta por una capa blanquecina externa llama peridio; el conjunto de agallas son la parte consumible del huitlacoche fresco). Es un proceso complejo que

incluye muchos fenómenos como división celular, elongación, fotosíntesis, síntesis de otros compuestos, respiración, translocación, absorción y transpiración del maíz como planta hospedante (Martínez *et al.*, 2000). No existen antecedentes del estudio de la dinámica de la cosecha a través de los diferentes cortes (pasos de cosecha) que se realizan en el huitlacoche cultivado. El presente estudio se desarrolló con el objetivo conocer la diversidad de distribución de la cosecha (cortes) de huitlacoche entre híbridos comerciales de maíz que permita para programar el abasto continuo de la demanda del huitlacoche fresco. Con la hipótesis de que existe variabilidad entre híbridos de maíz en la distribución de cosecha (los cortes) de huitlacoche, que permite programar volúmenes sostenidos de cosecha en una unidad intensiva de producción de huitlacoche cultivado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento

El experimento se estableció en el Campo Agrícola Experimental “San Martín” de la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo Estado de México; el cual se encuentra ubicado entre los paralelos 19° 29' LN y 98° 53' LW a una altura de 2250 msnm. El tipo climático es Cb (wo) (i') g, templado subhúmedo con verano fresco y largo, con una temperatura promedio anual de 15 °C, con lluvias en verano (García, 1998).

Diseño y unidad experimental

El experimento incluyó nueve híbridos comerciales: Anaconda, A-7573, Caimán, Campanero, Cronos, Dk-2042, Gatillero, Gladiador y Sultán 1. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental fue una parcela de 10 surcos de 32 m de largo con una planta cada 30 cm y surcos separados cada 80 cm (62,500 plantas h⁻¹).

Preparación del inóculo

El inóculo fue preparado con teliosporas de *Ustilago maydis* Cda., provenientes de mazorcas frescas con agallas aun cubiertas por las hojas. Fueron seleccionadas las agallas sanas, limpias, con peridio íntegro y sin coloraciones atípicas; luego, fueron trituradas en una licuadora (vaso desinfectado) con agua destilada estéril. Se filtraron las teliosporas y se ajustó la suspensión a una densidad de 10⁶

teliosporas.ml⁻¹, al aplicar la fórmula $V_1 D_1 = V_2 D_2$. La densidad D_2 deseada es preestablecida (10⁶ teliosporas.ml⁻¹); se logró al contar una densidad inicial D_1 alta (mayor a la D_2 deseada), en un volumen inicial (V_1) también conocido. Los tres datos conocidos (V_1 , D_1 y D_2), se sustituyeron en la ecuación y se despejó V_2 para conocer el volumen a que se debe aforar con agua destilada estéril para lograr la densidad D_2 preestablecida deseada (Villanueva *et al.*, 2007).

Manejo del experimento

Al cultivo de maíz en campo se le aplicaron cinco riegos, el primero y el segundo, a los uno y ocho días después de la siembra; y los últimos tres riegos después del segundo en intervalos de 15 días a manera de punta de riego (después se dejó al abasto de agua de lluvia). Se realizó un laboreo con cultivadora a los 20 días después de la siembra y a los 10 días después se aporcó. La fertilización fue con la fórmula 138-68-00 en dos aplicaciones; la primera con la mitad del nitrógeno y todo el fósforo, y la segunda aplicación con el resto del nitrógeno al momento del aporque.

Inoculación

Las aplicaciones del inóculo fueron hechas con una jeringa hipodérmica estéril cuando los “jilotes” exponían sus estigmas en aproximadamente 5 cm fuera de las brácteas. Se aplicó 1 ml de suspensión de teliosporas en el punto medio de cada uno de los tres tercios en que se le puede dividir al jilote, previa eliminación de una banda longitudinal de la hoja externa del jilote con fines de limpieza de los sitios de inoculación (tres por jilote) (Fig. 1). La densidad de inóculo en la suspensión aplicada fue de 10⁶ teliosporas.ml⁻¹. Se realizaron tres pases consecutivos de inoculación, uno por día.

Cosecha y registro de datos

La cosecha de huitlacoche se realizó en cuatro cortes a los 20, 25, 30, 35 días después de la primera inoculación. El indicador de la cosecha fue cuando las mazorcas (elotes) estaban abultadas, por un desarrollo completo por el término del crecimiento de las agallas, cuidando que las agallas aún no eclosionaran, al permanecer cubiertas por su peridio. Los datos de rendimiento de agallas de huitlacoche desprendidas de la mazorca (sin restos de olote); y calidad (tamaño) de agallas fueron obtenidos al momento de la cosecha.



Figura 1. Técnica y etapa de inoculación.

VARIABLES EN ESTUDIO

Rendimiento ($t \cdot ha^{-1}$) se determinó con la suma del peso de las agallas de dos categorías (primera y segunda) en cada uno de los cuatro cortes. Tamaño de agalla (mm), las agallas se clasificaron con la ayuda de una caja tamiz con cuadros de 1 cm^2 para seleccionar las agallas de primera calidad (las más grandes), las restantes se consideraron como agallas de segunda. Fueron pesados los dos tamaños de agallas recolectadas en cada corte de huitlacoche.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza y una prueba de medias (Tukey). El programa estadístico utilizado fue SAS (Versión 9.0). Se graficó la dinámica del rendimiento ($kg \cdot ha^{-1}$ y %) por cada uno de los cuatro cortes, en cada híbrido, en promedio de híbridos. Asimismo, con los datos experimentales obtenidos y los rendimientos por cada uno de los cuatro cortes, se analiza un caso y se propone una planificación de producción continua de huitlacoche con siembras seriadas de 1 ha por semana, en un sistema basado en una superficie de 14 ha totales.



Figura 2. a: Vista del experimento; híbridos al inicio de crecimiento de las agallas, b: A-7573, c: Caimán y d: Campanero; híbridos al inicio de la cosecha, e: Cronos y f: Dk-2042; vista de cosecha, g y h.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento total

Existieron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) entre tratamientos (híbridos) para rendimiento total, donde los híbridos Cronos y Dk-2042 mostraron mayor producción de agallas ($4.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) de las cuales 87 % son agallas grandes de primera calidad. Los híbridos Gladiador, Gatillero y Caimán se caracterizaron por generar la menor producción de agallas de las dos calidades (Fig. 3). Los nueve híbridos presentaron rendimientos que oscilaron entre 1.30 a $4.54 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, los cuales son bajos comparados con

los reportados por Martínez (2000) quien obtuvo un rendimiento de huitlacoche por hectárea de $12 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ a cielo abierto y Madrigal *et al.* (2010) quienes encontraron un rendimiento de $29.8 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en invernadero. Estos bajos rendimientos pueden explicarse por la falta de humedad en el suelo presentado en la canícula, después de la inoculación influyendo negativamente en la patogénesis y en el tiempo de cosecha. Se sabe que en localidades con clima subtropical los rendimientos a nivel comercial promedian en $4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ a cielo abierto y que la duración de siembra-inoculación, de siembra-cosecha y de inoculación-cosecha es del orden 70, 90 y 20 días respectivamente (datos no presentados).

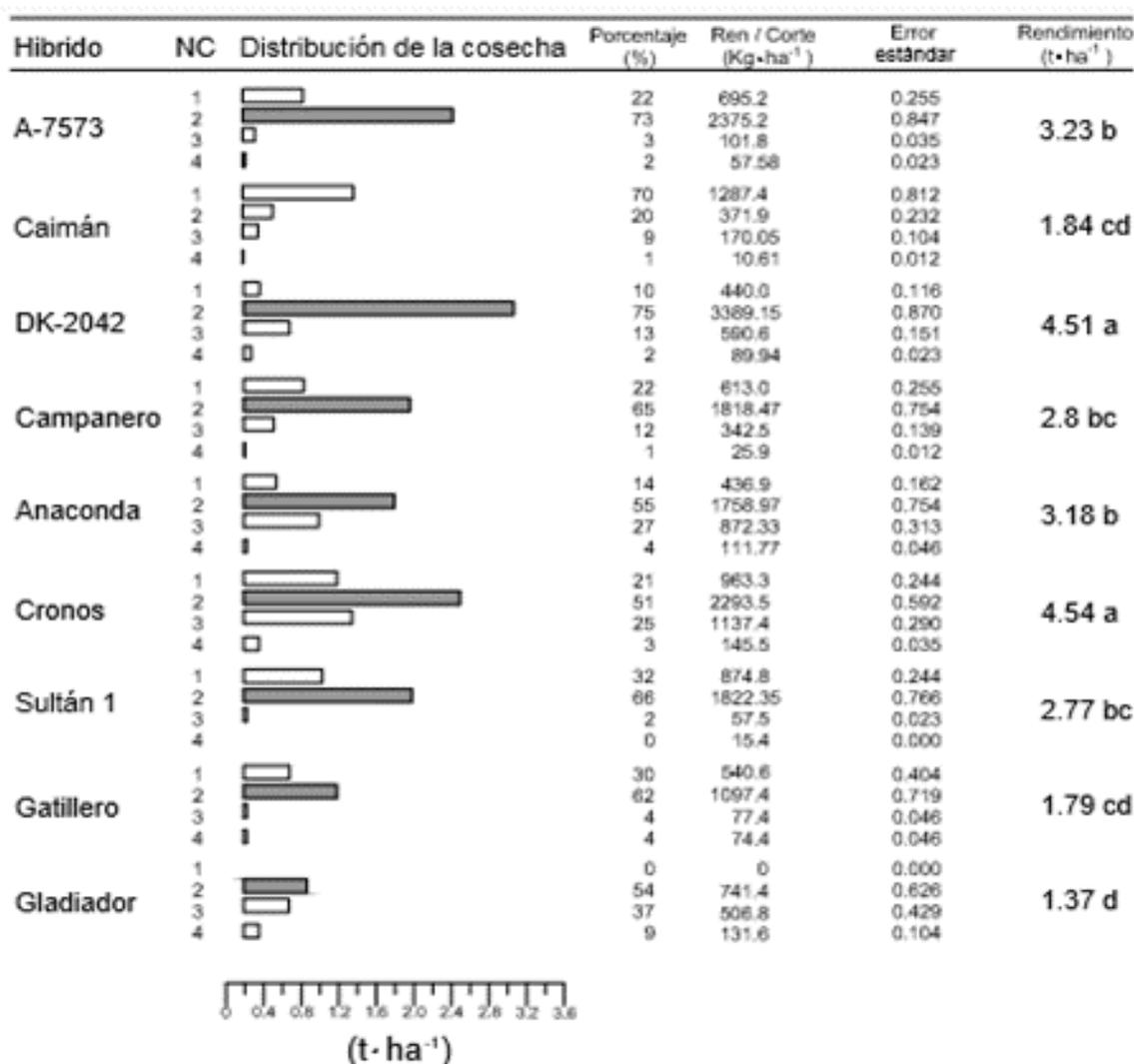


Figura 3. Distribución del rendimiento por corte en nueve híbridos comerciales de maíz inoculados con formulación basada en teliosporas de huitlacoche. Medias con la (s) misma (s) letra (s) dentro de la columna Rendimiento son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey; DMSHT=0.05: diferencia mínima significativa honesta de Tukey; NC: Número de corte 1, 2, 3 y 4 (20, 25, 30, 35 días después de la inoculación); Ren/corte: rendimiento de hongo por corte ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Dinámica del rendimiento de huitlacoche por corte

Se detectaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) entre rendimiento por corte de los tratamientos (híbridos). En el corte 2 (25 días después de la inoculación) se obtuvo el mayor rendimiento en todos los híbridos. El híbrido Dk -2042 tuvo una producción de 3,369 kg·ha⁻¹ en el corte 2 el cual representó el 75 % de su rendimiento total. En este mismo corte el híbrido A-7573 presentó un rendimiento de 2,375 kg·ha⁻¹ que representó el 73 % de su producción total (Fig. 3).

Es importante mencionar que en esta fecha de corte fueron muy importantes la alta humedad relativa (75 a 85 %), la precipitación (43-53 mm) y las temperaturas frescas (28 a 35 °C) presentes durante los 20 días posteriores de la inoculación ya que estas pudieron favorecer al desarrollo y crecimiento de las agallas, así como también la humedad del suelo (80-85 % de humedad aprovechable) (Madrigal *et al.*, 2010).

El híbrido Cronos mostró el rendimiento mejor distribuido entre cortes. Empezó produciendo 0.96 t·ha⁻¹ (21 %) del total de su producción, seguido de 2.3 t·ha⁻¹ (51 %) en el segundo corte, y para el tercer corte mantuvo 1.13 t·ha⁻¹ (25 %) de rendimiento total (Fig. 3). En contraste el híbrido Dk-2042 tuvo una producción muy concentrada en el corte 2. Empezó produciendo 0.44 t·ha⁻¹ (10 %) del total su producción,

seguido de 3.39 t·ha⁻¹ (75 %) en el segundo corte, y para el tercer fue de 0.59 t·ha⁻¹ (13 %) de rendimiento total. (Fig. 3).

Estos resultados son de valiosa ayuda para la planificación de siembras, respondiendo así positivamente a las demandas crecientes de huitlacoche fresco en el mercado nacional e internacional (Villanueva *et al.*, 2007). La siembra de maíz para huitlacoche en clima subtropical (600-1200 msnm) puede ser más rentable porque al no haber heladas se puede producir huitlacoche todo el año, reduciendo los tiempos de operación y manejo en campo. Así mismo se pueden utilizar paralelamente tecnologías más eficientes como: la labranza cero que ayuda optimizar el tiempo en la preparación del terreno-siembra y el riego por goteo para distribuir la humedad eficientemente en el cultivo, en momentos clave para el desarrollo del huitlacoche.

Tamaño (Calidad) de agallas

Hubo diferencias significativas del tamaño de agallas entre cortes. El segundo corte produjo más agallas de primera calidad en todos los híbridos (Fig. 4). No hubo diferencias significativas entre híbridos; sin embargo, los híbridos DK-2042 y Cronos fueron numéricamente superiores (3,608 kg·ha⁻¹ y 3,301 kg·ha⁻¹, respectivamente) al producir agallas de primera calidad (Fig. 5).

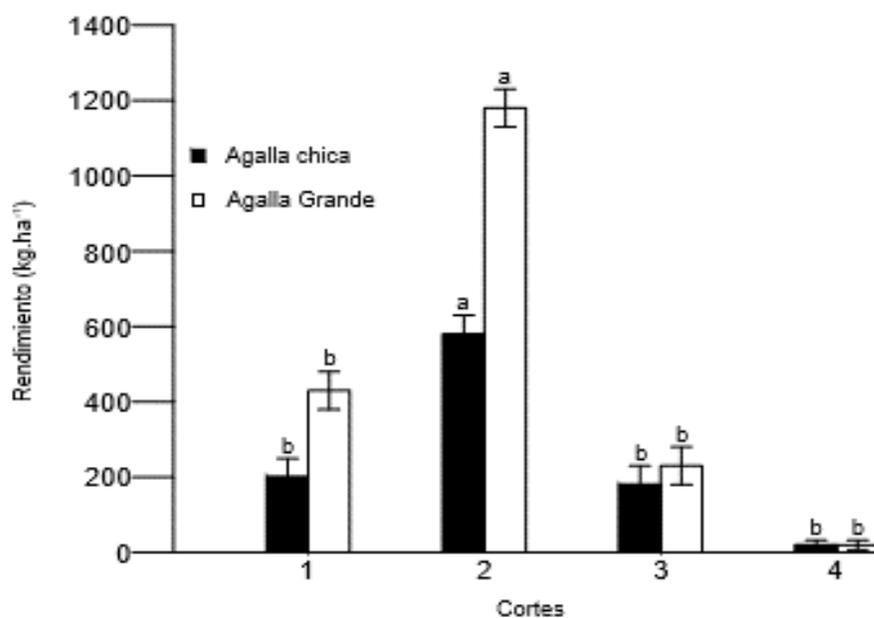


Figura 4. Producción de agallas de huitlacoche de primera y segunda calidad por corte en promedio de nueve híbridos comerciales de maíz (media de cuatro repeticiones). Valores con la misma letra de columnas son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

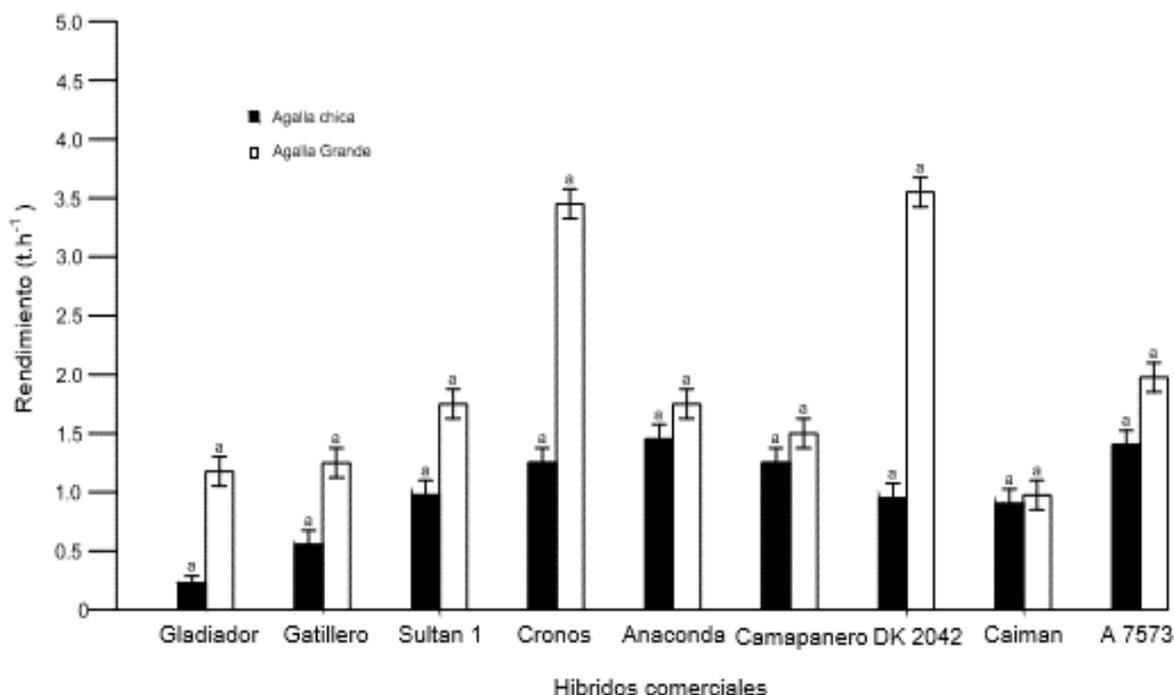


Figura 5. Producción de agallas de huitlacoche de primera (agallas grandes) y segunda calidad (agallas chicas) en nueve híbridos comerciales de maíz (media de cuatro repeticiones). Valores con la misma letra de columnas son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

Programación secuenciada siembra-cosecha

Se realizó un ejercicio de caso de programación calendarizada de siembra-cosecha basado en el patrón de distribución del rendimiento por corte en los híbridos Cronos y Dk-2042, por su alta producción de agallas de primera calidad y por sus altos rendimientos totales de huitlacoche. Se asumió un rendimiento de 6 t·ha⁻¹ debido a que es un rendimiento intermedio entre el obtenido en este experimento y el que ha sido obtenido en otros experimentos a cielo abierto como los realizados por Martínez *et al.* (2000).

En este ejercicio, se plantea como meta cosechar una tonelada diaria de huitlacoche a partir de los 90 días después de la primera siembra en un clima subtropical (600-1200 msnm); lo cual se logra sembrando 1 ha.semana⁻¹ y se requiere de la disponibilidad de 14 ha, de las cuales 12 ha son para la siembra secuenciada de 1 ha semanal de maíz para inocular huitlacoche; y las dos hectáreas adicionales serían para hacer rotación de cultivos con leguminosas.

La planificación propuesta con el híbrido Cronos se muestra en la Fig. 6. En la sección (A) se representa la distribución de la cosecha en cuatro cortes por cada siembra programada (I–IV). En la primera siembra se observa un primer corte a los 90 días con un rendimiento de 1.2 t·ha⁻¹; el segundo corte es a los 92 días con un rendimiento de 3.0 t·ha⁻¹ siendo este el

punto máximo de cosecha en todas las siembras; estos picos altos de producción están separados cada 6 días de una siembra a otra (debido a que se siembra 1 ha.semana⁻¹). El tercer corte de la primera siembra se traslapa con el primer corte de la segunda siembra teniendo una suma de 2.7 t·ha⁻¹ (Fig. 6, sección B pico III). El cuarto corte de la primera siembra se traslapa con el segundo corte de la segunda siembra sumando 3.2 t·ha⁻¹ (Fig. 6, sección B pico IV). Este comportamiento es cíclico para las sucesivas siembras. Por lo tanto, con este híbrido, con la siembra de 1 ha.semana⁻¹ es posible cosechar un promedio de 1.5 t·ha⁻¹ diarias durante 90 días, en el modelo planteado de 14 ha con siembra de 1 ha.semana⁻¹.

En contraste, en la planificación propuesta con el híbrido Dk-2042 se observa la distribución de la cosecha en sus cuatro cortes (Fig. 7, sección A). El primer corte es a los 90 días con un rendimiento de 0.6 t·ha⁻¹; el segundo corte es a los 92 días con un rendimiento de 4.5 t·ha⁻¹, siendo este el punto máximo de cosecha en todas las siembras. Estos picos altos de producción también están separados cada 6 días de una siembra a otra (debido a que se siembra 1 ha.semana⁻¹). Con este híbrido, sólo se presenta un traslape que es en el corte IV de la primera siembra con el corte I de la segunda siembra teniendo una suma de 0.72 t·ha⁻¹ (Fig. 7, Sección B pico IV). A diferencia del híbrido Cronos, el híbrido Dk-2042 presenta una cosecha concentrada solo en un corte semanal de 4.5 t·ha⁻¹.

Para los dos híbridos analizados en el experimento es posible obtener rendimientos programados. En el caso de usar el híbrido Cronos se puede responder a una demanda diaria, mientras que en contraste, con el híbrido Dk-2042 se puede responder a demandas semanales. La utilización de uno o del otro depende de la frecuencia de abasto de la demanda exigida por el mercado y de la logística utilizada para su distribución.

Los híbridos más sobresalientes con base en rendimiento de huitlacoche y de calidad de agallas, son Cronos y Dk-2042, debido a su mayor susceptibilidad

genética ya que la cepa y la técnica utilizadas para la inoculación fueron las mismas para los nueve híbridos evaluados. El segundo corte es el punto donde se cosecha mayor rendimiento y con agallas de mejor calidad en todos los híbridos evaluados. En un sistema de producción intensiva y continua de huitlacoche puede ser utilizado el híbrido Cronos como respuesta a una demanda diaria de $1.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de huitlacoche fresco; mientras que el híbrido Dk-2042 puede ser utilizado para responder una demanda semanal de $6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de huitlacoche fresco.

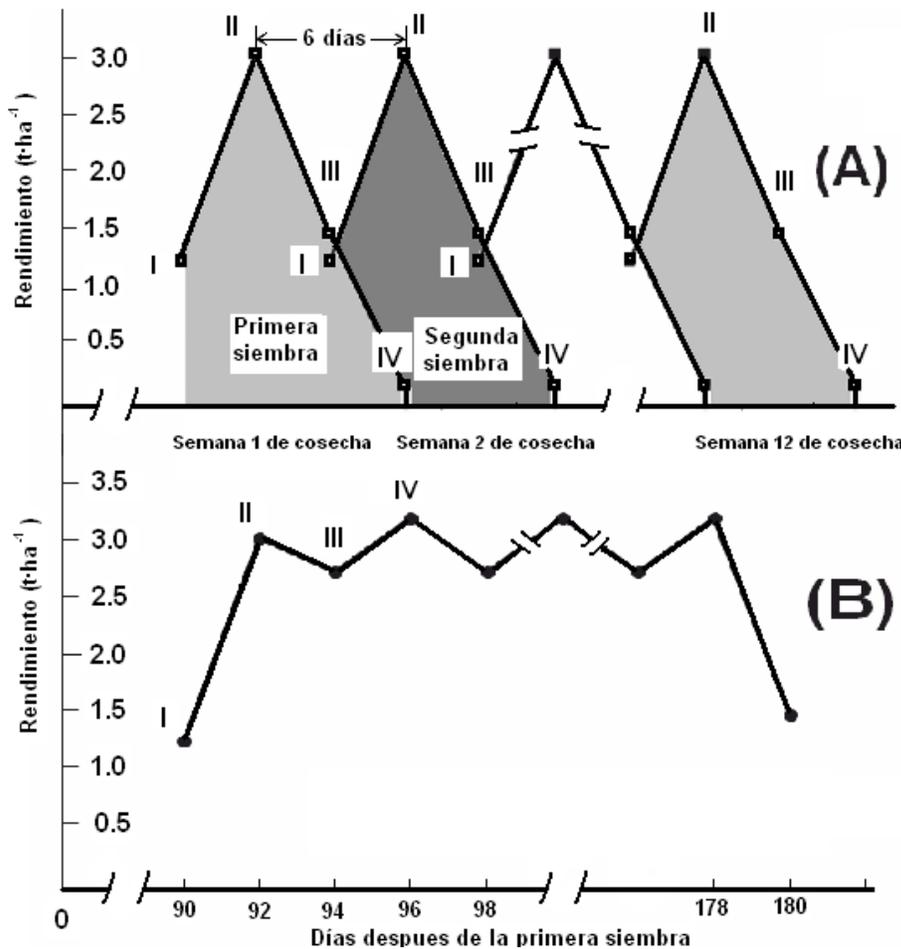


Figura 6. Representación gráfica de la dinámica de cosecha de huitlacoche obtenida mediante siembras semanales sucesivas de 1 ha, con el híbrido Cronos. (A): traslape de cosechas y (B): suma de cosechas traslapadas. I: primer corte; II: segundo corte; III: tercer corte; IV: cuarto corte.

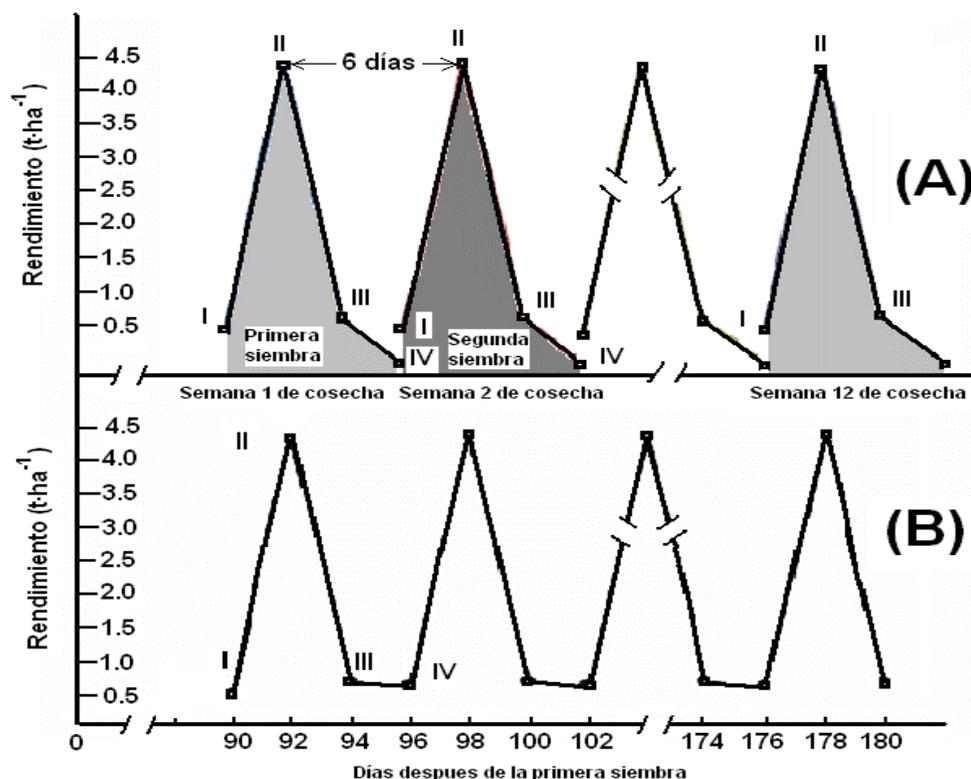


Figura 7. Representación gráfica de la dinámica de cosecha de huitlacoche obtenida mediante siembras semanales sucesivas de 1 ha, con el híbrido Dk-2042. (A): traslape de cosechas y (B): suma de cosechas traslapadas. I: primer corte; II: segundo corte; III: tercer corte; IV: cuarto corte.

CONCLUSIONES

Hay claras diferencias entre la distribución de la cosecha de huitlacoche entre híbridos comerciales de maíz, así como en el rendimiento y calidad del hongo producido. En los nueve híbridos estudiados, la mayor parte de la cosecha se concentra en el segundo corte. El análisis del rendimiento entre cortes por híbrido, permite establecer el patrón varietal de cosecha de huitlacoche. Pueden programarse siembras secuenciadas de híbridos de dinámica de cosecha complementaria para atender contratos de abastecimiento continuo, en localidades sin incidencia de heladas. Los híbridos Cronos y Dk-2042 fueron los mejores en rendimiento y calidad de agallas del hongo y con distribución complementaria de su cosecha entre cortes. Se requiere de una superficie de 14 ha, sembrando 1 ha.semana⁻¹ de maíz con un rendimiento de huitlacoche 6 t.ha⁻¹ para ofrecer al mercado 1.5 t.día⁻¹ (con el híbrido Cronos) o 6 t.semana⁻¹ (con el híbrido Dk-2042).

Agradecimientos

Financiamiento. Se recibió financiamiento del proyecto CONACYT-COMECYT-PEI No. AC/2009-02/009 (NN) para la realización del trabajo.

Conflicto de intereses. Todos los autores declaran que no hay conflicto de intereses relacionados con esta publicación.

Cumplimiento de estándares de ética. Por su naturaleza, el presente trabajo no requirió aprobación por comité de bioética.

Disponibilidad de datos. El autor de correspondencia podrá proporcionar la información o datos necesarios, con previa solicitud.

REFERENCIAS

- Amador-Rodríguez, K.Y., Pérez-Cabrera, L. E. Guevara-Larac, F., Chávez-Velac, N. A., Posadas-Del Río, F. A. Silos-Espino, H., Martínez-Bustos, F. 2019. Physicochemical, thermal, and rheological properties of nixtamalized blue-corn flours and masas added with huitlacoche (*Ustilago maydis*) paste. *Food chemistry*, 278, 601-608.
- Aydoğdu, M., and Gölükçü, M. 2017. Nutritional value of huitlacoche, maize mushroom caused

- by *Ustilago maydis*. Food Science and Technology, 37(4), 531-535.
- Agrios, G.N. 2005. Plant pathology. Five edition. Academic Press. USA. 922 p.
- García, E. 1998. Modificación al sistema de clasificación climática de Köepen. Ed. Offset Larios S. A. de C. V. México. 217 p.
- Guzmán, G. 1994. Los hongos en la medicina tradicional de Mesoamérica y México. Ed. Iberoamericana. México. 278 p.
- Juárez-Montiel, M, Romero-Maldonado, A., Monreal-Escalante, E., Becerra-Flora, A., Korban-Schuyler S, Rosales-Mendoza, S., Jiménez-Bremont, J. F. 2015. The corn smut ('huitlacoche') as a new platform for oral vaccines. PloS one, 10(7).
- Kamper, J., Kahmann, R., and Böcker, M. 2006. Insights from the genome of the biotrophic fungal pathogen *Ustilago maydis*. Nature. 444:97-101. DOI: 10.1038/nature05248
- León, R., Cabrera, J., Martínez, A., Herrera, L., Méndez, L., Reynaga, C. and Ruiz, J. 2004. Infection of alternative host plant species by *Ustilago maydis*. New Phytology. 164:337-346. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01171.x>
- Madrigal, J., Villanueva, C., Sahagún, J., Acosta, M., Martínez, L. and Espinosa, T. 2010. Production test of greenhouse hydroponic huitlacoche (*Ustilago maydis* Cda.). Revista Chapingo Serie Horticultura. 16(3):177-182. DOI: 10.5154/r.rchsh.2010.16.022
- Martínez, L., Villanueva, C., and Sahagún, J. 2000. Susceptibility and resistance of maize to the edible fungus huitlacoche (*Ustilago maydis* Cda.) improving its virulence. Revista Chapingo Serie Horticultura. 6(2):241-255. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.1999.10.069>
- Mendoza, A., Berndt, P., Djamei, A., Weise, C., Linne, U., Marahiel, M., Vranes, M., Kamper, J. and Kahmann, R. 2008. Physical-Chemical plant-derived signals induce differentiation in *Ustilago maydis*. Journal of Molecular Microbiology. 71(4):895-911. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2008.06567.x>
- Pan, J.M., Baumgarten, A., and May, G. 2008. Effects of host plant environment and *Ustilago maydis* Cda. Infection on the fungal endophyte community of maize (*Zea mays* L). New Phytologist. 178:147-156. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2007.02350.x
- Ruiz, H.J. and Martínez, A.D. 1998. The Fungus *Ustilago maydis*, from the Aztec cuisine to the research laboratory. International Microbiology. 1:149-158. DOI:10.2436/im.v1i2.60
- Salazar-López, J. M., Martínez-Saldaña, M.C., Reynoso-Camacho, R., Chávez-Morales, R.M., Sandoval Cardoso, M. L., Guevara-Lara, F. 2017. Capacidad antioxidante y caracterización fitoquímica de extractos etanólicos de huitlacoche (*Ustilago maydis*-*Zea mays*) crudo y cocido Antioxidant capacity and phytochemical characterization of ethanolic extracts from raw and cooked huitlacoche (*Ustilago maydis*-*Zea mays*). Rev Mex Cienc Farm 48 (3):37-47.
- Valdez-Morales, M. Céspedes, L.C., Valverde, M. E. Ramírez-Chávez, E. Paredes-López, O. 2016. Phenolic compounds, antioxidant activity and lipid profile of huitlacoche mushroom (*Ustilago maydis*) produced in several maize genotypes at different stages of development. Plant foods for human nutrition, 71(4), 436-443. Villanueva, V.C., Molina, J., Castillo, F. and Zavaleta, E. 1999. Artificial induction of "huitlacoche" (*Ustilago maydis* Cda.): influence of different conditions in the field. Micología Neotropical Aplicada. 12:41-47.
- Villanueva, V.C., Sánchez, E. y Villanueva, E. 2007. El huitlacoche y su cultivo. Ed. Mundi Prensa, México. 96p.
- Walbot, V., and Skibbe, S. 2010. Maize host requirements for *Ustilago maydis* tumor induction. Sexual Plant Reproduction. 23:1-13. doi: 10.1007/s00497-009-0109-0