

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE GASTRONOMIA

**UTILIZACIÓN DEL CEREAL SORGO BLANCO Y ROJO MALTEADO
COMO INGREDIENTE PRINCIPAL EN UN DESTILADO: WHISKY DE
GRANO ARTESANAL LIBRE DE GLUTEN**

SHARIOTH ELIZABETH BOVELL MONROY

8-843-2485

PANAMÁ, PANAMÁ
REÚBLICA DE PANAMÁ

2026

UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE GASTRONOMIA

**UTILIZACIÓN DEL CEREAL SORGO BLANCO Y ROJO MALTEADO
COMO INGREDIENTE PRINCIPAL EN UN DESTILADO: WHISKY DE
GRANO ARTESANAL LIBRE DE GLUTEN**

SHARIOTH ELIZABETH BOVELL MONROY

8-843-2485

PANAMÁ, PANAMÁ
PANAMÁ. REÚBLICA DE PANAMÁ

2026

UTILIZACIÓN DEL CEREAL SORGO BLANCO Y SORGO ROJO MALTEADO
COMO INGREDIENTE PRINCIPAL EN UN DESTILADO: WHISKY DE GRANO
ARTESANAL LIBRE DE GLUTEN

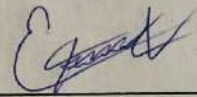
SUSTENTACIÓN DE TESIS DE GRADO SOMETIDO PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE LICENCIATURA EN ARTES CULINARIAS

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE GASTRONOMÍA

PERMISO PARA SU PUBLICACIÓN Y REPRODUCCIÓN, TOTAL O PARCIAL,
DEBE SER OBTENIDO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS.

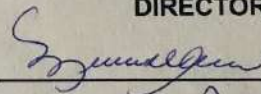
APROBADO

MGTR. ERICK TRUJILLO



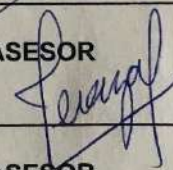
DIRECTOR

MGTR. MINERVA ARROCHA



ASESOR

MGTR. RICARDO PERAZA



ASESOR

PANAMÁ, PANAMÁ

REPÚBLICA DE PANAMÁ

2026

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación, en primer lugar, a Dios, fuente de sabiduría, fortaleza y perseverancia, quien me concedió la capacidad, la paciencia y la determinación necesarias para culminar esta etapa fundamental de mi formación profesional.

A mi familia, pilar fundamental de mi vida, por su apoyo incondicional, su comprensión constante. Cada palabra de aliento, cada gesto de confianza y cada esfuerzo realizado fueron determinantes para alcanzar este logro académico. Su ejemplo de constancia. La unión y la responsabilidad han sido una inspiración constante para mi crecimiento personal y profesional.

A mi madre Juana Monroy, por inculcarme valores sólidos como la responsabilidad, la honestidad, el compromiso y el amor por el conocimiento. Gracias por creer en mí incluso en los momentos de mayor dificultad, por brindarme apoyo moral y emocional, y por enseñarme que el esfuerzo sostenido es el camino hacia la superación.

A mis hermanos, Inés Bovell, Carmen Bovell y Julio Bovell, quienes, a lo largo de mi formación universitaria, me motivaron y contribuyeron al desarrollo de mi pensamiento crítico. A mi amor Kimberly Pacheco, la que forma parte de mi ser, gracias por estar. No puedo pedirte más cariño.

Finalmente, dedico este trabajo a todas aquellas personas que, directa o indirectamente, formaron parte de este proceso, Este logro también les pertenece.

Sharioth Elizabeth Bovell Monroy

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad de Panamá, en especial a la Facultad de Ciencias Agropecuarias, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y por contribuir de manera significativa a la formación de profesionales.

A mi familia, por su amor incondicional, comprensión y aliento en los momentos más desafiantes. Sin su apoyo emocional y moral, este logro no habría sido posible.

A mis profesores por su orientación, asesoría técnica y acompañamiento constante durante el desarrollo de mi persona. Su experiencia, paciencia y criterio académico fueron fundamentales para mi desarrollo personal.

A mis compañeros y amigos, por su apoyo moral, su motivación constante y por compartir experiencias, conocimientos y momentos de aprendizaje que hicieron más enriquecedor este proceso académico.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron lo cual me motivó a seguir adelante y a no desistir ante los retos que conllevan la investigación y la innovación.

Sharioth Elizabeth Bovell Monroy

ÍNDICE

I.- INTRODUCCION	20
1.1 Planteamiento del problema	21
1.2. Antecedentes	22
1.3. Justificación	23
1.4. Objetivo general	24
1 .4.1 Objetivos específicos	24
1.5. Hipótesis	25
1.6. Alcances y limitaciones del estudio	26
1.6.1. Alcances	26
1.6.2. Limitaciones	27
II- MARCO TEÓRICO	28
2.1.- Whisky.....	28
2.1.1.- Origen del whisky.....	28
2.1.2. Tipos de whisky.....	30
2.2.- Sorgo.....	44
2.2.1.- Origen del sorgo.....	45
2.2.2.- Descripción botánica del sorgo.....	47
2.2.3.- Estructura y composición química y nutricional del grano de sorgo.....	52
2.2.4.- Ventajas del sorgo frente a otros cereales utilizados en la elaboración de whisky.....	59.

2.2.5.- Producción y disponibilidad en el mercado panameño e internacional del sorgo bicolor.....	63
2.2.6.- Tipos de Sorgo (Sorghum bicolor).....	69
2.2.6.1.- Sorgo de Grano (Food-grade Sorghum).....	71
2.2.6.2.- Sorgo Forrajero (Forage Sorghum).....	73
2.2.6.3.- Sorgo Dulce (Sweet Sorghum).....	73
2.2.6.4.- Sorgo Industrial o Bioenergético.....	74
2.2.6.5.- Sorgo Ceroso (Waxy Sorghum).....	74
2.2.6.6.- Sorgo Perlado o Pulido (Pearled Sorghum).....	74
2.2.6.7.- Sorgo sudanés y híbridos Sorghum–Sudan (Sudangrass / Sorgo–Sudán).....	74
2.2.6.8.- Sorgo para Escoba (Broomcorn).....	75
2.3.- Maíz (Zea mays L.).....	75
2.3.1.- Origen y domesticación del maíz.....	76
2.3.2.- Composición química y nutricional del grano de maíz.....	76
2.3.3.- Germinación del maíz y cambios bioquímicos.....	79
2.3.4.- Uso del maíz germinado como componente funcional del proceso fermentativo en el destilado de whisky de grano elaborado con sorgo blanco y sorgo rojo malteado.....	80
2.4.- Malteado y su importancia en la producción de whisky de grano con sorgo blanco y sorgo rojo, así como con maíz germinado.....	82
2.5.- Maceración en la producción de whisky de grano con sorgo blanco y sorgo rojo con maíz germinado.....	88
2.6.- Fermentación y destilación de cereales.....	90

2.6.1.- Fermentación.	90
2.6.2.- Destilación.....	93
2.6.3.- Métodos artesanales vs. industriales de destilación.....	96
2.7.- Maduración del destilado de whisky de grano a base de sorgo blanco y sorgo rojo malteado con maíz germinado.	98
2.8.- Whisky artesanal libre de gluten.....	101.
II.8.1.- Bebida alcohólica artesanal.....	101
II.8.2.- Regulaciones y normativas sobre bebidas “libres de gluten”.....	102
2.9.- Estudios previos o investigaciones similares sobre bebidas a base de sorgo.....	109
III. MARCO METODOLOGICO.....	117
3.1 Diseño de la investigación.....	117
3.2 Delimitación del estudio.....	117
3.3 Variables del estudio.....	118
3.3.1 Variable dependiente.....	118
III.3.2 Variable Independiente.....	119
3.4 Población y Muestra.....	120
3.4.1 Población.....	120
3.4.2 Muestra.....	120
IV. Recolección, Análisis e interpretación de datos.....	121
4.1 Población encuestada.....	121
4.2 Condiciones de Aplicación.....	121
4.3 Instrumento de Recolección	121

4.4 Preguntas de la encuesta sensorial	122	
4.5 Datos obtenidos de las preguntas realizadas.....	123	
V. Conclusión.....	130	VI.
Recomendaciones.....	132	
VII. Referencias bibliográficas.....	134	
VIII. Anexos.....	157	

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1. Distribución de los encuestados según su edad	123
Tabla 2. Consumo de Bebidas Destiladas	124
Tabla 3. Evaluación del Destilado.....	125
Tabla 4. Evaluación del sabor del Destilado.....	126
Tabla 5. Evaluación de la suavidad en boca	127
Tabla 6. Evaluación del equilibrio general del destilado.....	128
Tabla 6. Nivel de aceptación del destilado.....	129
Tabla 7. Prueba experimental 1.	142
Tabla 7. Prueba experimental 2.	144
Tabla 8. Prueba experimental 3.....	146
Tabla 9. Características físicas del destilado.....	158
Tabla 10. Características organolépticas del destilado.....	158

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Grafica 1. Limpieza y pureza del destilado.....	155
Grafica 2. Color del destilado	156
Grafica 3. Evaluación sensorial promedio (escala 1–9)	159
Grafica 4. Nivel de aceptación (% de participantes).....	160
Grafica 5. Preferencia del consumidor	161
Grafica 6. Distribución de los encuestados por sexo.....	163
Grafica 7. Distribución de los encuestados según el rango de edad	163

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Raíz de la planta de sorgo	47
Figura 2. Tallo de la planta de sorgo.....	48
Figura 3. Hojas de la planta de sorgo.....	49
Figura 4. Pedúnculo de la planta del sorgo.....	50
Figura 5. Inflorescencia de la planta de sorgo.....	51
Figura 6. Estructura del grano de sorgo.....	59
Figura 7. Estructura del grano del maíz (Zea mays).....	79
Figura 8. M.P. seleccionada. Granos de maíz, sorgo blanco y sorgo rojo.....	147
Figura 9. Materia prima limpia, sin impurezas, polvos ni cuerpos extraños. Granos de sorgo rojo, sorgo blanco y maíz.....	147
Figura 10. Ejemplo de remojo (maíz).....	148
Figura 11. Ejemplo de germinación (maíz).....	149
Figura 12. Secado de los granos (sorgo blanco y sorgo rojo).....	150
Figura 13. Molienda de cereales (sorgo blanco).....	150
Figura 14. Maceración de los granos (sorgo blanco y sorgo rojo con maíz).....	151
Figura 15. Proceso de fermentación.	152

Figura 16. Proceso de destilación.....	152
---	------------

GLOSARIO

Alambique

Equipo utilizado en la destilación para separar los componentes de una mezcla líquida mediante la evaporación y la condensación.

Alcohol etílico (etanol)

Compuesto químico obtenido en la fermentación alcohólica, principal producto de la elaboración de bebidas destiladas.

Artesanal

Proceso o producto elaborado a mano o con la ayuda de herramientas manuales, mediante técnicas tradicionales y la habilidad de un artesano.

Azúcares fermentables

Carbohidratos simples (como glucosa, fructosa y maltosa) que las levaduras transforman en alcohol.

Biomasa

Es materia orgánica de origen vegetal o animal que puede utilizarse como fuente de energía.

Caroteno

Es un pigmento natural de color anaranjado o rojo que se encuentra en vegetales como zanahorias y tomates y que, en los animales, se transforma en vitamina A.

Cribas

Instrumentos o máquinas, como tamices o zarandas, que sirven para separar materiales sólidos por tamaño mediante mallas o telas agujereadas, clasificando los finos y reteniendo los gruesos.

Criopreservación

Es el proceso de enfriar y almacenar células, tejidos u organismos a temperaturas extremadamente bajas (usualmente -196°C con nitrógeno líquido) para detener su actividad biológica y preservarlos para su uso futuro.

Destilación

Proceso físico mediante el cual se separan componentes de una mezcla líquida, aprovechando sus diferentes puntos de ebullición.

Enzima

Proteína que cataliza específicamente una reacción bioquímica del metabolismo.

Fenólicos

Son compuestos orgánicos que contienen uno o más grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) unidos a un anillo aromático, formando un grupo fenol.

Fermentación alcohólica

Transformación de los azúcares en alcohol y dióxido de carbono realizada por microorganismos como las levaduras.

Germinación

Proceso natural en el que una semilla se desarrolla hasta convertirse en una nueva planta.

Gluten

Conjunto de proteínas presentes en cereales como el trigo, la cebada y el centeno. Su ausencia en el sorgo y el maíz lo convierte en un cereal apto para personas con enfermedad celíaca.

Levadura

Microorganismo unicelular que fermenta los azúcares y produce alcohol y compuestos aromáticos.

Malteado

Proceso de transformación de los granos de cereal en malta mediante remojo, germinación y secado.

Mosto

Mezcla líquida obtenida a partir de cereales o frutas, rica en azúcares fermentables y destinada a la fermentación.

Panícula

Es un tipo de inflorescencia, es decir, un conjunto de flores muy ramificadas, similar a un racimo de racimos.

Plántula

Planta joven en sus primeras etapas de vida, desde que emerge de la semilla germinada hasta que desarrolla sus hojas verdaderas.

Poder diastásico

Capacidad enzimática de una malta para convertir el almidón en azúcares fermentables durante la maceración.

Potencial enológico

Capacidad de una materia prima agrícola (uvas, cereales, frutas, etc.) para su uso en la elaboración de bebidas alcohólicas fermentadas o destiladas, en función de sus características químicas, físicas y sensoriales.

Quitina

Es un polisacárido de larga cadena que se encuentra en el exoesqueleto de insectos y crustáceos, y en las paredes celulares de hongos.

Taninos

Son compuestos fenólicos naturales presentes en plantas como la uva y el té, y en la corteza de árboles, y se utilizan para curtir pieles.

Sacarificación

Es la hidrólisis de carbohidratos complejos, como almidón o celulosa, para convertirlos en azúcares más simples y fermentables, como la glucosa, la maltosa y las pentosas.

Sistema radicular

Es el conjunto de raíces de una planta, cuya función principal es la absorción de agua y nutrientes del suelo, así como el anclaje y el soporte de la planta.

Sorgo (*Sorghum bicolor*)

Cereal alternativo, libre de gluten, utilizado como materia prima en la elaboración de destilados artesanales.

Vitrificación

Es una técnica de crio preservación ultrarrápida que transforma el agua de células (como óvulos y embriones) en un estado vítreo (similar a un vidrio amorfo) en lugar de formar cristales de hielo.

Xantofila

Es un pigmento natural de color amarillo que pertenece al grupo de los carotenoides y se encuentra tanto en plantas como en animales.

RESUMEN

El presente proyecto de investigación plantea la elaboración y producción de un whisky de grano artesanal libre de gluten, empleando un cereal alternativo llamado sorgo de grano (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) como materia prima, el cual pasa por un proceso de malteado junto con el maíz germinado como fuente primaria de azúcares fermentables. La propuesta busca aprovechar el potencial del sorgo de grano, tanto el blanco como el rojo, un cereal naturalmente libre de gluten, rico en vitaminas y minerales. Con su aptitud para el malteado, permite y facilita la conversión enzimática de los almidones durante el proceso productivo. La inclusión de maíz germinado fortalece la producción de enzimas diastásicas, que aportan

notas dulces y complejas y contribuyen a la formación de un cuerpo robusto y de un perfil aromático distintivo, enriqueciendo las características sensoriales del destilado. El resultado esperado es un whisky de grano artesanal libre de gluten, que conjuga métodos tradicionales de elaboración con la innovación en materias primas alternativas y que pasa por los debidos procedimientos, como la preparación del mosto, la maceración, la adición de levadura, la fermentación controlada, la destilación fraccionada y, por último, pero no menos importante, la maduración o envejecimiento del whisky. Se busca no solo generar un destilado de calidad organoléptica superior, sino también aportar sostenibilidad y valor agregado a la industria de bebidas alcohólicas artesanales en la ciudad de Panamá.

Palabras clave: Enzima, germinación, malteado, artesanal, diastásico.

ABSTRACT

This research project proposes the development and production of a gluten-free artisanal grain whisky using grain sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) as the raw material. Sorghum undergoes malting, with germinated corn serving as the primary source of fermentable sugars. The proposal seeks to leverage the potential of both white and red grain sorghum, a naturally gluten-free cereal rich in vitamins and minerals. Its suitability for malting facilitates the enzymatic conversion of starch during the production process. The inclusion of germinated corn enhances the

production of diastatic enzymes, which contribute sweet, complex notes and a robust body and distinctive aromatic profile, enriching the spirit's sensory characteristics. The expected result is a gluten-free, artisanal grain whisky that combines traditional brewing methods with innovative alternative raw materials. It undergoes the necessary procedures, including wort preparation, mashing, yeast addition, controlled fermentation, fractional distillation, and, finally, whisky maturation or aging. The aim is not only to produce a spirit of superior organoleptic quality but also to contribute to the sustainability and added value of the artisanal alcoholic beverage industry in Panama City.

Keywords: Enzyme, germination, malting, artisanal, diastatico

I. INTRODUCCIÓN

La industria de las bebidas alcohólicas ha experimentado en las últimas décadas un crecimiento significativo y está influida por la demanda de productos diferenciados, de carácter artesanal y con valor agregado. El whisky, reconocido mundialmente por su complejidad y valor cultural, suele elaborarse con granos como trigo, cebada y centeno, entre otros, que contienen gluten y son componentes fundamentales en su elaboración; esto limita su consumo por personas con enfermedad celíaca o sensibilidad al gluten. En este contexto, el sorgo blanco y el sorgo rojo malteado se presentan como cereales naturalmente libres de gluten, con un alto contenido de almidones y un potencial enológico para la producción de destilados. Su combinación con maíz germinado puede enriquecer el proceso de fermentación.

Esta investigación propone la elaboración de un whisky de grano artesanal libre de gluten y el estudio de las materias primas alternativas previamente mencionadas, con el fin de desarrollar una bebida alcohólica segura para un segmento de la población, sin comprometer la calidad ni la autenticidad del producto. Además de evaluar la viabilidad técnica de este proceso y sus características sensoriales y nutricionales. Ante la carencia de destilerías artesanales a gran escala en la Ciudad de Panamá, se presenta la oportunidad de contribuir a la innovación y desarrollar esta propuesta, que busca promover el uso de cultivos alternativos y el aprovechamiento de recursos locales.

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente, el sector de bebidas alcohólicas, específicamente el destilado, se encuentra en auge y con innovación constante, impulsada por la búsqueda de productos sostenibles y adaptados a las nuevas tendencias de los consumidores. El sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) es un cereal alternativo con alto potencial para la producción de bebidas alcohólicas, ya que es naturalmente libre de gluten, resistente a condiciones climáticas adversas y rico en almidones fermentables. Si bien el sorgo se ha utilizado tradicionalmente en la producción de bebidas alcohólicas en algunas culturas, como en África para la elaboración de cerveza o en China para la elaboración de licor, en Panamá y en la mayoría de los países productores de bebidas alcohólicas, su uso en destilados artesanales aún es limitado, siendo la cebada, el maíz y el centeno los cereales más empleados en la elaboración de whisky.

A pesar de sus ventajas nutricionales y tecnológicas, el sorgo presenta características que requieren ser estudiadas y optimizadas, como el proceso del malteado, ya que el sorgo, en sus granos, no contiene enzimas específicas que realizan los diferentes procesos requeridos y necesarios para llevar a cabo la transformación del almidón; es debido a eso que estos granos deben ser transformados en malta, así se consigue una actividad enzimática adecuada. En tal sentido, lo que se busca con el sorgo malteado es sustituir la cebada malteada, que contiene gluten, y contrastar las principales características que debe tener un whisky comercial con respecto al whisky de grano artesanal libre de gluten. Y establecer

las diferencias, generando así una alternativa para el consumo de personas intolerantes al gluten (celíacas). Asimismo, el maíz germinado puede complementar el proceso al aportar enzimas y compuestos que favorecen la conversión de azúcares. Teniendo en cuenta todos los aspectos desarrollados, surge la interrogante central de esta investigación: ¿Se puede elaborar un whisky de grano artesanal libre de gluten a partir del sorgo blanco y sorgo rojo malteados como materia prima, junto con otro grano, como el maíz germinado, para producir un destilado apto para el consumo de personas intolerantes al gluten?

1.2. Antecedentes

El *Sorghum bicolor* es una especie de cereal perteneciente a la familia de las poáceas. Originario de África oriental, especialmente de Etiopía y Sudán, es conocido por su resistencia a la sequía y su versatilidad agrícola. Históricamente, el sorgo no solo ha sido un alimento básico, sino también un ingrediente clave en la elaboración de bebidas fermentadas en diversas culturas; una de ellas es la propia África oriental, en regiones como Uganda, donde se fermenta el sorgo para producir bebidas tradicionales como la Bushera. Esta bebida casera, elaborada a partir de sorgo molido y agua, fermenta naturalmente y desarrolla un sabor terroso con notas de levadura. Otra de las regiones es China, donde el sorgo también se utiliza en la elaboración de Baijiu, un licor fuerte y tradicional chino. En este caso, el grano se somete a fermentación y destilación para aprovechar su alto contenido de almidón. En la India, aunque el sorgo se cultivó desde el siglo I d.C., su uso en bebidas alcohólicas no fue tan prominente como en África. Sin embargo, algunas

comunidades rurales han empleado métodos de fermentación similares para producir bebidas locales. Igualmente, el sorgo llegó al continente americano probablemente a bordo de barcos de esclavos procedentes de África. Aunque su uso principal ha sido como forraje y alimento, en algunas regiones también se ha explorado su potencial para la elaboración de cervezas artesanales y de destilados.

En el marco de la presente investigación, señalamos que, aunque no existen antecedentes de destilados de sorgo en Panamá, la experiencia de otros países, como China, con el Kaoliang, y Taiwán, donde el sorgo simple se convierte en licor de sorgo, o en Estados Unidos, donde algunas destilerías artesanales han apostado por el sorgo como base para crear whiskies únicos, como en el caso de High Wire Distilling Co. Nos permiten contar con una referencia para realizar investigaciones y adaptaciones de este cereal como base para explorar otras posibilidades en la obtención de nuevas bebidas alcohólicas, en particular para la destilación de whisky.

1.3. Justificación

La presente investigación se centra en el estudio del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), específicamente el sorgo de grano (sorgo blanco y sorgo rojo), un cereal utilizado como materia prima en la fermentación para producir etanol, componente clave de las bebidas alcohólicas. También es una alternativa prometedora para la producción de alcoholes sin gluten. La importancia de este proyecto radica en aportar un análisis de las principales características de este cereal y de las técnicas de malteado, así como en exponer un tipo de destilado derivado del sorgo, ya que es poco producido en algunos países, incluido Panamá, especialmente si se trata

de un destilado artesanal. Asimismo, determinar la factibilidad de la producción para incentivar el emprendimiento de más destilerías en el país. Al mismo tiempo, buscamos diferenciar los aspectos relativos a la implementación del sorgo malteado respecto de otros cereales, como, por ejemplo, la cebada malteada utilizada en whisky comercial. Del mismo modo, resaltar lo que aporta el sorgo de grano como suplemento nutricional. Este trabajo pretende dar a conocer el potencial del whisky de grano artesanal libre de gluten en la industria de bebidas alcohólicas del área de destilados en la Ciudad de Panamá. Así como llegar a consumidores que buscan opciones más saludables y que puedan tolerar, en el caso del gluten.

1.4. Objetivo general

Crear un whisky de grano artesanal libre de gluten utilizando sorgo blanco y sorgo rojo malteados como materias primas principales, en combinación con maíz germinado, y evaluar su viabilidad técnica, sensorial y nutricional.

1.4.1. Objetivos específicos

- Analizar las propiedades fisicoquímicas y nutricionales del sorgo blanco y del rojo malteado, así como del maíz germinado, para determinar su potencial como fuente de azúcares fermentables.
- Examinar la fermentación del mosto elaborado a partir de sorgo blanco, sorgo rojo malteado y maíz germinado, identificando el rendimiento alcohólico y la eficiencia del proceso.

- Producir la destilación artesanal del mosto fermentado, estableciendo los cortes adecuados (cabezas, corazones y colas) para garantizar la calidad y la seguridad del destilado.
- Evaluar el perfil sensorial del whisky obtenido (aroma, sabor, color y cuerpo) mediante pruebas organolépticas, en comparación con los estándares de la categoría.
- Definir la viabilidad nutricional y la ausencia de gluten en el destilado final, asegurando que el producto sea apto para personas intolerantes al gluten.

1.5. Hipótesis

Es posible elaborar un whisky de grano artesanal libre de gluten utilizando sorgo blanco y sorgo rojo malteados como materias primas principales, en combinación con maíz germinado, obteniendo un destilado con calidad técnica, sensorial y nutricional aceptable. Ya que estos ingredientes aportan suficientes azúcares fermentables para un proceso de fermentación eficiente. Dicha estandarización del proceso permitirá obtener un whisky libre de compuestos indeseables y de gluten.

1.6. Alcances y limitaciones del estudio

1.6.1. Alcances

- La investigación se desarrollará durante 6 a 8 meses, periodo durante el cual se producirán lotes experimentales de whisky de grano artesanal libre de gluten y se evaluarán sus características.
- Se efectuará en la Ciudad de Panamá, donde se obtendrán las materias primas y se elaborará el whisky de grano artesanal libre de gluten.
- El estudio se centrará en la viabilidad técnica, sensorial y nutricional del whisky de grano artesanal libre de gluten, elaborado a partir de sorgo blanco y rojo malteado como ingredientes principales, complementado con maíz germinado.
- Se aplicarán técnicas de malteado, fermentación controlada, destilación artesanal y análisis sensorial, así como pruebas para la ausencia de gluten y evaluación nutricional.
- La evaluación sensorial se realizará con un panel de catadores entrenados o de consumidores voluntarios representativos del público objetivo, sin cubrir la totalidad del mercado.

1.6.2. Limitaciones

- La disponibilidad limitada de grano de sorgo blanco y rojo podría limitar la cantidad de lotes experimentales que puedan elaborarse. No se abordará el

escalamiento industrial del proceso. La disponibilidad de materias primas dependerá directamente de la producción del país. El análisis de gluten se realizará según criterios orientativos, no con certificación industrial.

- La duración de la investigación limitará el número de repeticiones y la maduración de los destilados, lo que afectará la posibilidad de realizar análisis más extensos.
- La precisión de los análisis fisicoquímicos y de destilación dependerá de los equipos disponibles, lo que puede generar variaciones en los resultados.
- Dicha investigación se limita a la escala experimental artesanal; por lo tanto, los resultados podrán variar con respecto a los de una producción industrial. Además, la evaluación sensorial depende de la percepción subjetiva de los participantes.

II. MARCO TEORICO

2.1. Whisky

Es una bebida alcohólica destilada, derivada de la fermentación de granos como cebada, centeno, maíz o trigo, y envejecida en barricas de madera, comúnmente de roble. La palabra whisky o whiskey proviene del gaélico escocés “uisge beatha” y del gaélico irlandés “uisce beathadh”, que se traduce como “agua de vida”. En Irlanda, se introdujo una "e" para diferenciar su variante de la escocesa en el mercado estadounidense. A medida que muchos inmigrantes irlandeses se

establecieron en Estados Unidos, esta ortografía fue adoptada a nivel nacional. Sin embargo, dado que el whisky escocés ha sido reconocido mundialmente como el más destacado, otros mercados han optado por conservar la forma original.

Actualmente, "whisky" designa al whisky escocés y a otras variedades producidas fuera de Estados Unidos, mientras que "whiskey" se refiere específicamente al americano e irlandés.

2.1.1. Origen del whisky

El origen del whisky se remonta al descubrimiento de la destilación. Esta técnica tiene sus raíces en la antigua Grecia y fue impulsada por alquimistas cristianos y árabes hasta el siglo XII con fines medicinales y alquímicos. Durante el siglo VIII, los árabes perfeccionaron el alambique, una herramienta crucial para obtener alcoholes. En la Edad Media, el conocimiento sobre la destilación llegó a Europa gracias a traducciones de textos árabes y al intercambio cultural en monasterios, donde los monjes comenzaron a destilar con fines medicinales, produciendo lo que denominaban "aqua vitae".

Una de las primeras menciones sobre la elaboración de whisky o de un destilado derivado de granos fermentados aparece en un relato sobre el rey Eduardo I, en 1210, tras invadir Irlanda, donde probaron un líquido destilado elaborado por monjes irlandeses. Entre los siglos XII y XIII, se cree que fueron los monjes irlandeses quienes adaptaron la destilación de cereales, produciendo bebidas alcohólicas que evolucionaron en lo que hoy conocemos como whisky. Documentos históricos del siglo XII ya mencionan bebidas similares elaboradas a partir de cebada. Mientras

que en Escocia, alrededor del año 1494, la primera referencia oficial aparece en un registro de Exchequer Rolls of Scotland, donde se concede a un fraile, John Cor, la materia prima para elaborar “aqua vitae” a base de malta por el rey Jacobo IV de Escocia. Este documento es considerado la partida de nacimiento oficial del whisky escocés. Durante los siglos XVI y XVII, la destilación de cereales se expandió en Irlanda y Escocia, pasando de la producción monástica a la elaboración en pequeñas granjas. La bebida comenzó a popularizarse entre la población, ya no solo con fines medicinales, sino también recreativos. En este periodo, las técnicas se fueron perfeccionando y surgieron distintos estilos según el cereal empleado: cebada malteada, cebada sin maltear, trigo, centeno o maíz. Con la migración escocesa e irlandesa hacia América en los siglos XVIII y XIX, el conocimiento de la destilación viajó con ellos. En Estados Unidos se adaptó al uso de maíz y centeno, lo que dio origen al bourbon y al rey whiskey, bebidas que se consolidaron como expresiones propias del whisky en Norteamérica. La regulación y consolidación industrial del whisky empezaron en Escocia en 1823; el “Excise Act” legalizó la producción de whisky, impulsó el desarrollo de destilerías formales y redujo la clandestinidad. En el siglo XIX, la invención del alambique de columna (Coffey still) permitió producir whisky a partir de grano de manera más eficiente, lo que facilitó el auge del blended whisky (mezcla de maltas y granos). Por otra parte, en el siglo XX, el whisky se expandió globalmente, consolidándose como una de las bebidas espirituosas más importantes, con denominaciones protegidas como Scotch whisky, Irish whiskey, bourbon y Japanese whisky.

2.1.2. Tipos de whisky

A lo largo del tiempo, diversos tipos han surgido debido a su evolución histórica, clasificados según su lugar de origen, su método de fabricación y su grado de pureza. En este punto vamos a desarrollar cada una de ellas, con especial énfasis en el tipo de whisky de grano, que es la base para la elaboración del whisky de grano artesanal libre de gluten.

Según su procedencia

Whisky escocés. También conocido como *Scotch Whisky*, es un whisky destilado y producido exclusivamente en Escocia. Las características sensoriales del whisky escocés se resaltan por un color que va del dorado al ámbar profundo (según el tipo de barrica), con un aroma que puede incluir notas de malta, miel, frutas secas, vainilla, humo, turba o madera. Es de sabor complejo y equilibrado, con notas dulces, tostadas y ahumadas según el tipo de malta y la región; su graduación alcohólica mínima es de 40% vol. Este estilo de whisky se puede

clasificar en varios tipos:

Whisky escocés de pura malta (*Single Malt Scotch Whisky*). Hecho únicamente con cebada malteada en una única destilería mediante procesos tradicionales.

Whisky escocés de grano único (*Single Grain Scotch Whisky*). También se produce en una sola destilería, pero incluye otros cereales.

Whisky escocés mezclado (*Blended Scotch Whisky*). Combinación de uno o más single malt Scotch whiskies y uno o más single grain Scotch whiskies.

Whisky escocés de malta mezclado (*Blended Malt Scotch Whisky*). Mezcla de varios single malt Scotch Whiskies. Los cuales pueden ser destilados en más de una destilería.

Whisky escocés de grano mezclado (*Blended Grain Scotch Whisky*). Compuesto por single grain Scotch whiskies de diversas destilerías. Este tipo de whisky se rige por normas estrictas establecidas por la ley, según las Scotch Whisky Regulations (2009). Para que una bebida alcohólica destilada pueda denominarse Scotch whisky, debe cumplir los siguientes requisitos: ser destilada y envejecida en Escocia, elaborada a partir de agua, cebada malteada y otros cereales integrales, fermentarse con levaduras, destilarse a menos de 94,8 % vol. de alcohol, envejecer durante al menos 3 años en barricas de roble con capacidad inferior a 700 litros, no contener colorantes ni aditivos excepto caramelo (E150a) para homogeneizar el color. Estas condiciones hacen del Scotch whisky un producto de denominación de origen protegida, reconocido internacionalmente por su autenticidad y calidad. En el siglo XVII, la destilación artesanal se extendió por las Highlands (Tierras Altas), convirtiéndose en parte de la identidad cultural escocesa. En 1823, con el Excise Act, el gobierno legalizó y reguló la producción de whisky, lo que impulsó el crecimiento de destilerías reconocidas. Ya en el siglo XIX, la invención del alambique de columna permitió elaborar whisky de grano, lo que dio origen al blended Scotch. Hoy por hoy, el whisky escocés es uno de los productos más exportados del Reino Unido y símbolo del patrimonio escocés.

Whiskey irlandés. Conocido legalmente como Irish whiskey, es un licor derivado principalmente de cebada, caracterizado por su triple destilación, lo que le confiere

suavidad y elegancia distintivas. Solo puede elaborarse dentro isla Irlanda cumpliendo *Irish Whiskey Regulations* promulgadas inicialmente 1980 luego actualizadas 2014. De ahí surge el nombre de la escritura particular añadiendo 'e', diferenciándolo de la estadounidense. Para ser considerado Irish whiskey, debe cumplir con los siguientes requisitos: producirse en destilerías ubicadas en Irlanda, elaborarse a partir de una mezcla de cereales malteados y de cereales sin maltear, fermentarse con levaduras naturales, destilarse a una graduación no superior a 94,8 % vol. envejecer al menos 3 años en barricas de madera (generalmente de roble) con capacidad inferior a 700 litros, embotellarse con un volumen mínimo del 40% de alcohol. Estas condiciones lo reconocen como producto con denominación geográfica protegida (IGP) en la Unión Europea. La ley reconoce cuatro categorías principales, las cuales son: el single malt Irish whiskey (whiskey irlandés de pura malta) 100 % de cebada malteada, destilado en una sola destilería mediante alambique de cobre. Otro es el single pot still Irish whiskey (whiskey irlandés de alambique único), mezcla de cebada malteada y sin maltear, destilada en pot still. El siguiente es el single grain Irish whiskey (whiskey irlandés de grano único), elaborado con granos distintos de cebada: maíz, trigo y avena. Se destila en columna continua (Coffey still) y es ligero y suave, comúnmente usado en blends. Estilo típicamente irlandés, con cuerpo y notas especiadas. Por último, tenemos el blended Irish whiskey (whiskey irlandés mezclado); este tipo de whiskey mezcla dos o más tipos de whiskey previamente mencionados (malt, pot still, grain). Es el tipo más popular y el más exportado.

En el siglo XVII, Irlanda se consolidó como el principal productor mundial de whiskey; en Dublín existían grandes destilerías como las de Jameson y Powers. Posteriormente, en el siglo XIX se perfeccionó el proceso de triple destilación, lo que otorgó mayor suavidad al producto. Ya en el siglo XX, el sector sufrió una fuerte crisis debido a guerras, impuestos y prohibiciones, lo que dejó pocas destilerías en funcionamiento. Gracias a la demanda internacional y a la innovación artesanal, en el siglo XXI el Irish whiskey vive una etapa de renacimiento, con nuevas destilerías y una identidad moderna basada en la tradición. Este whiskey se caracteriza por su perfil equilibrado y sedoso, ideal para consumidores que prefieren destilados suaves, de color dorado claro a ámbar, con un aroma de frutas frescas, miel, vainilla, malta y madera ligera, además de notas dulces, cremosas y ligeramente especiadas, y un toque poco ahumado (rara vez se usa turba).

Whiskey estadounidense. El whisky estadounidense debe ser producido conforme a la legislación nacional y estandarizado y definido por el U.S. Code of Federal Regulations (27 CFR 5.22). Debe contener maíz en una proporción mínima del 51%, aunque comúnmente se utiliza entre el 70% y el 85%. Además del maíz, se añaden ingredientes como trigo, centeno o cebada malteada, y se envejece en barricas de roble blanco, ya sean nuevas o carbonizadas. Al igual que en el whisky irlandés, se incorpora la letra «e» a la palabra whisky; sin embargo, solo una destilería en Estados Unidos lo denomina whisky (Maker's Mark).

El whiskey estadounidense surge de la fusión de las tradiciones escocesas e irlandesas de destilación, adaptadas a los granos autóctonos de América del Norte. Inmigrantes europeos en el siglo XVIII, especialmente escoceses e irlandeses,

trajeron sus conocimientos sobre destilación al Nuevo Mundo. En regiones como Kentucky y Tennessee, las condiciones agrícolas y el clima cálido favorecieron la producción de whiskey de maíz, dando origen al bourbon. Luego, en el siglo XIX aparecieron distintos estilos regionales (Rye, Tennessee, Corn). La ley seca (Prohibition, 1920-1933): golpeó severamente a la industria, pero algunas destilerías continuaron operando con licencia medicinal. Ya para el siglo XXI la nueva ola de microdestilerías artesanales ha revitalizado el whiskey estadounidense, combinando tradición con innovación. El whisky estadounidense abarca varias categorías con regulaciones específicas; las más comunes son: para que un whisky sea etiquetado como bourbon, debe contener al menos un 51% de maíz y ser destilado y envejecido en Kentucky. Tanto el whiskey bourbon como el Tennessee Whiskey están protegidos por denominaciones geográficas dentro del país. Con características de dulce, suave, con notas de vainilla, caramelo y roble. Otro de los whiskies que destacamos es el rye whiskey (whiskey de centeno), elaborado con puré que contiene al menos un 51% de centeno. Es picante, seco y especiado, con un carácter robusto. Al igual que el corn whiskey (whiskey de maíz) elaborado con puré, que consta de al menos un 80% de maíz, este tipo de whiskey no requiere envejecimiento; es de sabor intenso y joven. Si el envejecimiento de estos tipos de whiskey alcanza los dos años o más, al whiskey se le asignará, adicionalmente, el calificativo «straight». Los whiskies estadounidenses mezclados combinan straight whiskeys con no envejecidos para enriquecer los sabores y los colores.

Whisky canadiense. Es un destilado elaborado principalmente a partir de granos como centeno, maíz, cebada y trigo, producido y envejecido en Canadá bajo

regulaciones específicas establecidas por las Canadian Food and Drug Regulations. El whisky canadiense debe triturarse, destilarse y envejecerse en Canadá, en barriles de madera, durante al menos tres años. A diferencia de otras tradiciones de whisky, la ley canadiense permite hasta un 9,09% de vino o licores (envejecidos al menos 2 años) y color caramelo, lo que ofrece a los destiladores un amplio margen de creatividad. Este entorno regulatorio ha fomentado la innovación y la diversidad en el whisky canadiense, lo que permite a las destilerías crear expresiones únicas que se destacan en la escena mundial del whisky. La historia del whisky canadiense está estrechamente ligada a la inmigración europea y a la expansión agrícola del siglo XIX; colonos escoceses e irlandeses llevaron sus conocimientos de destilación al territorio canadiense. Con el desarrollo de la agricultura, el centeno se convirtió en un cereal clave debido a su resistencia al frío. De ahí surgió el estilo conocido como “Rye Whisky”, famoso por su carácter especiado. Durante la Ley Seca en Estados Unidos. En los años 1920–1933, el whisky canadiense vivió su auge, ya que gran parte del licor introducido de contrabando en Estados Unidos provenía de destilerías canadienses. Actualmente es uno de los whiskies más exportados del mundo, reconocido por su calidad, consistencia y estilo.

El whisky canadiense se caracteriza por su suavidad, cuerpo ligero y notas especiadas, con matices de roble, *toffee* (caramelo) y cereal tostado, gracias a su método de destilación y a la presencia destacada del centeno (*Rye*), aunque hoy en día se elabora con diversas mezclas de granos. Con un color que va de ámbar claro a dorado intenso, aroma a dulces notas de miel, caramelo y vainilla, con ligeros toques de centeno y de frutas secas.

Whisky japonés. Es un destilado elaborado en Japón a partir de granos fermentados (principalmente cebada malteada, maíz y, a veces, trigo), siguiendo los métodos tradicionales escoceses de malteado, destilación y envejecimiento. Se caracteriza por su precisión técnica, equilibrio, pureza aromática y elegancia sensorial, fruto de una meticulosa atención al detalle y de un profundo respeto por la artesanía. Aunque originalmente se inspiró en el whisky escocés, con el tiempo ha desarrollado un perfil propio que combina la tradición occidental con la sensibilidad japonesa.

La elaboración del whisky japonés empezó a fines del siglo XIX, hacia 1870, pero era realizada de manera artesanal; no fue hasta 1924 cuando se fundó la primera destilería japonesa de whisky, Yamazaki (de la empresa Kotobukiya, más tarde renombrada Suntory). Masataka Taketsuru, considerado el padre del whisky japonés, estudió destilación en Escocia (en la Universidad de Glasgow) y trabajó en destilerías escocesas, trayendo consigo el conocimiento del malteado y de la maduración en barricas. De 1950 a 1980, Japón desarrolló un mercado interno sólido; las destilerías perfeccionaron sus procesos de mezcla y envejecimiento. Desde 2000 hasta la actualidad, el whisky japonés ha alcanzado reconocimiento internacional, ganando premios en competiciones globales (por ejemplo, Yamazaki Sherry Cask 2013 fue galardonado como “Mejor Whisky del Mundo” por Jim Murray’s Whisky Bible en 2015).

Hasta hace poco, la industria del whisky en Japón carecía de una regulación estricta sobre el uso del término “*Japanese Whisky*”. La Asociación de Fabricantes de Bebidas Espirituosas y Licores de Japón estableció un nuevo conjunto de

directrices de etiquetado para el whisky japonés, con el objetivo de “facilitar a los consumidores, tanto en Japón como en el extranjero, una adecuada selección de productos, proteger sus intereses, asegurar la competencia leal y elevar la calidad”. Estas normativas entraron en vigor el 1 de abril de 2021 y son aplicables desde 2024 para salvaguardar la autenticidad del producto. según esta norma, un whisky puede denominarse “Japanese Whisky” si cumple los siguientes requisitos:

- Las únicas materias primas permitidas son granos malteados, otros cereales y agua de Japón.
- La fermentación, la destilación y la sacarificación deben llevarse a cabo en una destilería situada en Japón.
- La maduración del destilado debe realizarse en barricas de madera con capacidad máxima de 700 litros durante un mínimo de tres años en Japón
- El embotellado debe efectuarse en territorio japonés y el contenido alcohólico debe ser de al menos el 40%.
- Se permite la adición de colorante caramelizado simple (E150).
- Está prohibido utilizar nombres que remitan directamente a Japón.
- No se pueden emplear nombres de ciudades, regiones o lugares célebres japoneses.

El perfil sensorial del whisky japonés busca el equilibrio y la sutileza sobre la fuerza o el ahumado; de color dorado claro a ámbar, de aroma floral, frutal, con notas de miel, vainilla, té verde, sándalo o incienso. Y con un sabor característico equilibrado y elegante, con presencia de fruta madura, roble y toques ahumados muy suaves.

Según su composición y elaboración

Whisky de Malta. Es aquel elaborado exclusivamente a partir de cebada malteada, agua y levadura, sin la adición de otros cereales. Este se produce mediante destilación discontinua en alambiques de cobre tipo *pot still* (alambique tradicional de cobre con forma de cebolla) y debe envejecer al menos tres años en barricas de roble. Cuando proviene de una sola destilería, se denomina “*Single Malt Whisky*”, una de las categorías más prestigiosas del mundo de los destilados.

Dependiendo del origen geográfico de la malta se clasifica como sigue:

Single Malt. Este destilado se elabora únicamente con cebada malteada en una sola destilería. La denominación “*single*” indica “destilería única”, mientras que “*malt*” hace referencia al uso exclusivo de malta de cebada como cereal. Este whisky tiene sus raíces en Escocia, aunque hoy se produce en varios países (Irlanda, Japón, Estados Unidos, Taiwán); el Scotch Single Malt es el referente histórico y cultural. Se valora por su complejidad aromática, su autenticidad y por ser la base del prestigio del whisky escocés y de otros países productores. Perfiles que varían según la región y el método: en áreas como “*highlands*” (tierras altas) son robustos y con notas frutales/especiadas; en otra área, “*lowlands*” (tierras bajas), son ligeros y suaves; mientras que en las islas son más intensos, ahumados y turbosos.

También se destaca que “speyside” se considera elegante, dulce y afrutado. Adicionalmente, la barrica ejerce una influencia marcada en el color, el sabor y los aromas secundarios (vainilla, miel, frutos secos, especias).

Vatted malt: también conocido como *Blended Malt Whisky*, es un whisky obtenido a partir de la mezcla de diferentes single malts, sin whisky de grano. Representa un equilibrio entre la pureza de las maltas y la complejidad de la mezcla, ofreciendo una alternativa intermedia entre el single malt (expresión individual) y el blended whisky (más comercial y accesible). Este tipo de whisky presenta una mayor complejidad aromática y un mayor equilibrio y permite integrar notas frutales, especiadas, florales, dulces o ahumadas. Un punto en contra es que presenta menor variabilidad de lote a lote que un single malt, ya que la mezcla estandariza el perfil.

El término “*Vatted*” hace referencia al vat o tonel en el que se mezclaban las maltas. Desde 2009, la legislación escocesa sustituyó oficialmente el término por “*Blended Malt Scotch Whisky*”, aunque muchos aficionados y productores aún utilizan el nombre tradicional “vatted malt”. Con el auge de los blended whiskies (maltas + grano), los vatted malts quedaron como un producto más especializado y dirigido a conocedores. Marcas como Johnnie Walker Green Label y Monkey Shoulder son ejemplos reconocidos de blended/vatted malts en el mercado actual. Esta mezcla proviene exclusivamente de whiskies individuales, pero solo de malta; si un whisky lleva la etiqueta “malt”, probablemente sea un vatted malt. A veces también se le conoce como pure malt cuando una misma empresa utiliza productos derivados de distintas destilerías propias para satisfacer la demanda bajo un mismo

nombre comercial. Las características organolépticas que definen el perfil de este estilo de whisky de malta son extremadamente variadas y ricas, según el tipo de cebada, el uso de turba y el tipo de barrica empleada. De color del ámbar claro al dorado profundo, con aroma a malta, miel, frutas secas, turba, humo o madera. El cual tiene un sabor complejo, con capas de dulzura, especias, frutos secos, toques florales o salinos (según la región).

Whisky mezclado (*Blended Whisky*). Es una mezcla de diferentes tipos de whisky, principalmente uno o más whiskies de malta junto con otros whiskies de grano, o bien bebidas neutrales de grano de alto contenido alcohólico, provenientes de distintas destilerías. Este tipo de whisky busca equilibrar los sabores, fusionando la intensidad de la malta con la suavidad del grano, lo que da como resultado un producto más redondo, accesible y consistente. Un tipo de Blended Whisky puede contener un 20–40% de whisky de malta, que aporta cuerpo, carácter, aroma y profundidad, y un 60–80% de whisky de grano, que suaviza la mezcla y mejora la textura. El número de whiskies individuales (maltas y granos) que puede incluir un blend varía, pero los más complejos pueden contener más de 40 whiskies distintos. El concepto de blended whisky se originó en Escocia durante el siglo XIX, como respuesta a la necesidad de crear un whisky más suave y uniforme para el mercado. En la década de 1850, Andrew Usher (considerado el “padre del whisky blended”), un comerciante de vinos y licores escocés comenzó a experimentar con la mezcla de varios whiskies de malta (single malts) de distintas destilerías, dando origen a una nueva categoría. La Revolución Industrial también jugó un papel crucial al introducir avances tecnológicos, como el alambique continuo o el Coffey still, en

1831. Esta técnica permitió producir grandes volúmenes de whisky de grano de forma eficiente, que resultaban más suaves y ligeros que los single malts. A partir de esta evolución, surgieron marcas icónicas como Johnnie Walker, Chivas Regal, Ballantine's, Dewar's y J&B, que popularizaron este estilo a nivel global.

Escocia, Irlanda y Canadá son los principales productores del whisky mezclado. Representa más del 80% de las ventas globales de whisky, especialmente en Escocia, y es la base económica que sostiene a muchas destilerías de Single Malt, ya que gran parte de su producción se destina a los blends. El blended whisky se caracteriza por su versatilidad; se puede disfrutar solo, con hielo o en cócteles. Sus características organolépticas son: color que va del dorado brillante al ámbar profundo (según la mezcla y el envejecimiento), aroma equilibrado con notas de miel, vainilla, caramelo, frutas y roble, y sabor suave y redondo; combina la dulzura del grano con el cuerpo de la malta.

Existen varios tipos de whisky blended; entre ellos, el Blended Scotch Whisky (whisky escocés mezclado) es una mezcla de Single Malt y Single Grain escoceses de distintas destilerías. Otro tipo es el Blended Malt Whisky (whisky de malta mezclado), que es una mezcla de varios Single Malt de diferentes destilerías, sin incluir whisky de grano (antes llamado Vatted Malt). También está el Blended Grain Whisky (whisky de grano mezclado). Este tipo de mezcla está compuesto por varios Single Grain de distintas destilerías, sin malta. Además, está el Blended Irish Whisky (whisky irlandés mezclado), una combinación de maltas, pot still e incluso granos, típicos de Irlanda. Por último, está el American Blended Whisky (whisky americano

mezclado), una mezcla de whiskies de grano neutro y de bourbon o rye (centeno), generalmente más ligeros.

Whisky de Grano (*Single Grain*). Es un tipo de whisky elaborado a partir de cereales como trigo, maíz o centeno, con una pequeña proporción de malta que aporta las enzimas necesarias en la etapa de maceración y, posteriormente, en la de fermentación. Es un estilo legalmente definido en Escocia e Irlanda que se utiliza principalmente como columna vertebral de los whiskies mezclados. En Escocia comenzó a producirse en el siglo XIX.

Tradicionalmente se destila usando un alambique columna —también denominado patente o Coffey— creado por Aeneas Coffey, quien optimizó este sistema en 1831, lo que permitió destilaciones continuas más económicas y voluminosas. Este permite destilaciones más continuas, más económicas y de mayor volumen. Esta innovación permite obtener un whisky más ligero y neutro, con notas delicadas de vainilla, cereales suaves y miel ligera, a diferencia del “single malt”, que es más robusto y artesanal. Esto se debe al mayor contenido de alcohol que se obtiene en este tipo de alambique.

El whisky de grano juega un papel importante en la producción de whisky escocés, ya que se utiliza para elaborar whiskies mezclados, que representan aproximadamente el 90% de las ventas de whisky escocés, pues aportan suavidad y volumen a las mezclas de “single malts”. El whisky de grano tradicional debe envejecerse legalmente durante un mínimo de tres años en barrica de roble antes de mezclarlo o embotellarlo. El carácter de este tipo de whisky se define por los barriles en los que está madurado. Muchos serán mezclados y embotellados

relativamente jóvenes, pero si se les permite envejecer, pueden empezar a adquirir profundidad y complejidad.

La palabra “grano único” en una botella indica que contiene whisky de grano de una destilería, mientras que “grano mezclado” abarca whiskies de grano de múltiples destilerías. Estos estilos son relativamente poco comunes en comparación con las maltas individuales o mezclas, pero algunas empresas en Escocia e Irlanda introducen whiskies de grano tradicionales al mercado. En la actualidad, el término whisky de grano también puede referirse a cualquier whisky que se destila sin que la malta u olla sea única. A medida que los productores se vuelven más experimentales y los consumidores buscan nuevos horizontes en el sabor, estamos encontrando nuevas formas de whisky que se adaptan al grano. Muchos países productores de whisky más recientes se han inspirado en Escocia e Irlanda, pero con tradiciones distintas, y se alejan del enfoque en la cebada que vemos en el Viejo Mundo. En toda la región nórdica, el centeno se utiliza, junto con granos más exóticos como el mijo, el sorgo y el triticale híbrido de trigo-centeno, que se cultiva desde Estados Unidos hasta Namibia. En todo el mundo, las regulaciones no siempre definen el whisky de grano como categoría, pero muchos de estos nuevos whiskies se denominan de grano único si usamos las definiciones del Viejo Mundo. Con base en esta definición, podemos afirmar que el whisky de grano artesanal libre de gluten propuesto para investigación se ajusta a dicho tipo de whisky.

2.2. Sorgo

El sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) es un cereal perteneciente a la familia Poaceae (*gramíneas*). Esta planta herbácea se cultiva principalmente por su grano,

que se utiliza como alimento para los humanos, mientras que la planta se emplea en la alimentación animal y la producción de etanol. El sorgo tiene diferentes nombres según la región: mijo grande y maíz de Guinea en África occidental, kafir en África austral, durro en el Sudán, mtama en África oriental, iowar en la India y kaoliang en China (Duke, 1983). Etimológicamente, el término “sorgo” proviene del latín moderno *sorghum*, del cual se especula que deriva del latín vulgar *syricum*, es decir, que es originario de Siria. En 1794, Conrad Moench, botánico que describió el género *Sorghum* en su obra "*Methodus Plantas Horti Botanici et Agri Marburgensis*", nombró la especie tipo como *Sorghum bicolor* (L.). Moench.

2.2.1. Origen del sorgo

La procedencia del sorgo ha sido objeto de debate durante años; se considera que tiene sus raíces en el noreste de África, específicamente en lo que hoy es Etiopía, aunque su origen inicial es la India. Los vestigios arqueológicos más antiguos de sorgo datan aproximadamente del 8000 a.C. y se han encontrado en Nabta Playa, a lo largo del Alto Nilo; sin embargo, estos son ejemplares silvestres con granos pequeños y un raquis quebradizo. Según los registros botánicos e históricos, el sorgo fue domesticado a partir del sorgo salvaje verticilliforme (*Sorghum arundinaceum*) en el valle del río Níger, tal vez entre 7000 y 5000 a. C. Y que la primera raza adecuada para su cultivo fue la bicolor; se describe que tenía cáscaras compactas que debían retirarse a la fuerza. Hace unos 4000 años, se extendió al subcontinente indio; hace unos 3000 años llegó a África occidental. Entre los siglos XV y XVI, en Europa, el sorgo fue introducido a través de rutas comerciales árabes y, posteriormente, llevado a América alrededor del siglo XVIII durante el

comercio transatlántico, principalmente por colonos y esclavos africanos. En el continente americano, su cultivo se adaptó rápidamente a regiones semiáridas de Estados Unidos, México y América Central. En América del Norte, el sorgo adquirió relevancia en el siglo XIX como cultivo alternativo al maíz, utilizado tanto como forraje como para la producción de jarabes y bebidas alcohólicas.

2.2.2. Descripción botánica del sorgo

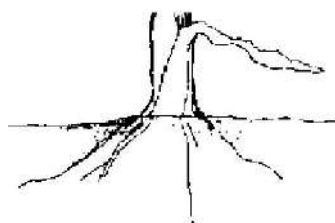
Botánicamente, el sorgo es una planta de crecimiento robusto de 1 a 2 metros de altura, con tallos erectos, hojas alargadas y una inflorescencia terminal en forma de panoja (disposición de las flores en un eje principal que se subdivide en ramas laterales, que a su vez se vuelven a ramificar). Su morfología les confiere alta resistencia a condiciones áridas y les permite adaptarse a diversos tipos de suelo, lo que la convierte en una alternativa sostenible frente a otros cereales tradicionales como el maíz o el trigo. De acuerdo con De Bernardi (2019), esta planta anual o perenne originaria de India puede crecer entre dos y cuatro metros con cañas llenas de tejido blanco ligeramente dulce y peloso en los nudos; sus hojas son lampiñas pero ásperas por los bordes; las flores forman panojas grandes que pueden ser flojas o densamente agrupadas; los granos son más grandes que los cañamones y pueden ser rojizos, blanquecinos o amarillos; estos últimos son utilizados para elaborar pan así como alimento para aves y ganado.

Además, se menciona que el sorgo exhibe características vegetales similares a las del maíz (*Zea mays*), incluido un metabolismo C4 eficiente. El género *Sorghum* cuenta con un sistema radicular extenso que proporciona soporte robusto para acumular reservas vitales; este sistema también mejora su capacidad para

sobrevivir a períodos prolongados sin agua gracias a su tallo grueso con espinas dispuestas por pares; la altura varía entre 1 y 3 metros, mientras que los nudos presentan abundantes pelos finos.

Raíz. El sistema radicular del sorgo es fibroso y profundo, con raíces que pueden alcanzar más de 1,5 metros de profundidad. Esta característica le permite absorber agua y nutrientes en condiciones de sequía, lo que asegura su supervivencia en ambientes áridos. Tiene tres clases de raíces: laterales, adventicias y aéreas.

Figura 1. *Raíz de la planta de sorgo.*



Nota: Imagen adaptada de Godoy, J. (2016). Identificación de las causas de pérdida de competitividad del cultivo de sorgo (*Sorghum*) en Colombia (Dibujo).

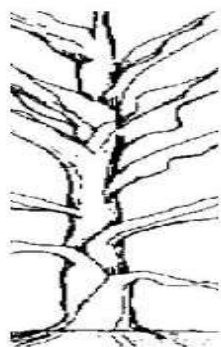
<https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/a91eea60-39a4-49ae-8d07-b8d42edb74f5/content>

Tallo. El sorgo es una planta de un solo tallo, pero puede desarrollar otros tallos según la variedad y el ambiente, compuesta por nudos (de 7 a 24) y entrenudos. Puede alcanzar una altura de 0,5 a 5 metros y un diámetro de 0,5 a 5 centímetros cerca de la base, por lo que se vuelve más angosto en el extremo superior. De medula suave, en su interior contiene azúcares solubles (particularmente en las

variedades de sorgo dulce), lo cual resulta útil para la elaboración de bebidas fermentadas o destiladas. Mientras que la parte exterior es sólida con una corteza o tejido duro.

Figura 2.

Tallo de la planta de sorgo.



Nota: Imagen adaptada de Godoy, J. (2016). Identificación de las causas de pérdida de competitividad del cultivo de sorgo (*Sorghum*) en Colombia (Dibujo).

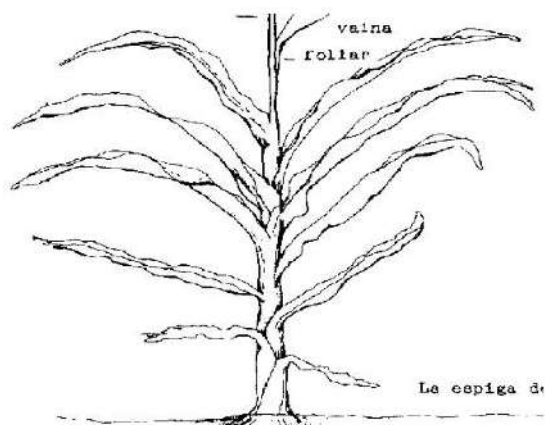
<https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/a91eea60-39a4-49ae-8d07-b8d42edb74f5/content>

Hojas. Con un número de hojas que varía entre 7 y 24 según la variedad y el periodo de crecimiento. Estas hojas son erectas hasta casi horizontales y tienden a curvarse con la edad; son alternas, largas y en forma de lanza, con un limbo de textura áspera y una vena central bien marcada. Son similares a las del maíz, aunque más estrechas; pueden oscilar entre 30 y 135 centímetros y tener un ancho

de entre 1,5 y 15 centímetros. Estas presentan una vaina foliar que abraza parcialmente el tallo.

Figura 3.

Hojas de la planta de sorgo.



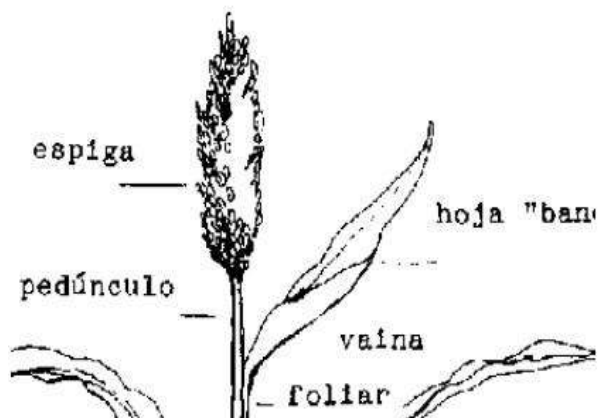
Nota: Imagen adaptada de Godoy, J. (2016). Identificación de las causas de la pérdida de competitividad del cultivo de sorgo (*Sorghum*) en Colombia (Dibujo).

<https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/a91eea60-39a4-49ae-8d07-b8d42edb74f5/content>

Pedúnculo. Lleva las inflorescencias y siempre es el más alto. Un buen pedúnculo hace que los granos queden por fuera de la vaina de la hoja bandera, lo que reduce el daño causado por plagas y enfermedades en la parte inferior de la panícula. La longitud del pedúnculo está controlada genéticamente, los factores ambientales, como un déficit hídrico, pueden ocasionar efectos pronunciados. Las densidades pueden variar la longitud del pedúnculo, ya sea que sean altas o bajas.

Figura 4.

Pedúnculo de la planta del sorgo.

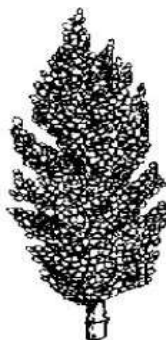


Nota: Imagen adaptada de Godoy, J. (2016). Identificación de las causas de pérdida de competitividad del cultivo de sorgo (*Sorghum*) en Colombia (Dibujo). <https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/a91eea60-39a4-49ae-8d07-b8d42edb74f5/content>

Inflorescencia. Se presenta como una panícula terminal cuya forma y densidad varían según la variedad cultivada. Puede ser compacta o dispersa e incluye numerosas espiguillas que contienen flores tanto fértiles como estériles. Esta estructura es crucial para la formación del grano.

Figura 5.

Inflorescencia de la planta de sorgo.



Nota: Imagen adaptada de Godoy, J. (2016). Identificación de las causas de pérdida de competitividad del cultivo de sorgo (*Sorghum*) en Colombia (Dibujo).

<https://repository.udca.edu.co/server/api/core/bitstreams/a91eea60-39a4-49ae-8d07-b8d42edb74f5/content>

Grano. Por lo general, es esférico u ovalado, con un diámetro aproximado de 3 a 4 milímetros. El grano de sorgo varía en color, desde el blanco hasta tonalidades oscuras de rojo y pardo, pasando por el amarillo pálido hasta el pardo púrpura profundo. Los colores más comunes son el blanco, el bronce y el pardo. El endospermo amarillo, con caroteno y xantófilo, aumenta el valor nutritivo del cereal. El color se debe a la presencia de pigmentos fenólicos y taninos, especialmente abundantes en el sorgo rojo. En general, el grano se compone de tres partes: la cáscara, el germen y el endospermo, que es la parte interna del grano. El grano carece de gluten, lo que lo hace apto para personas celíacas y una excelente materia prima para productos alimenticios y bebidas libres de gluten, como cervezas y destilados. Los botánicos han clasificado el sorgo en cinco variedades principales:

Durra (originaria de la India), Guinea (de África occidental, con alta demanda hídrica), Caudatum (cultivada por comunidades nilo-saharianas entre Chad y Etiopía), Kafir (resistente a las sequías, cultivado en el sur africano) y Bicolor (la variedad más común).

2.2.3. Estructura y composición química y nutricional del grano de sorgo

El sorgo tiene una composición química similar a la del maíz, el trigo y el arroz, aunque tanto el contenido de proteínas crudas como el de almidón pueden ser más altos; no así el de vitaminas y minerales, ya que son similares a los de los cereales antes mencionados.

El grano de sorgo está formado por tres estructuras anatómicas principales: el pericarpio (cubierta externa), el endospermo (almidón y proteínas) y el germen (aceites y minerales). Cada una aporta compuestos distintos que determinan el comportamiento del cereal durante los procesos de malteado, fermentación y destilación. En el pericarpio, la capa externa del grano de sorgo, se encuentra el fruto maduro que envuelve y protege el endospermo y el germen. Representa entre 6% y 8% del peso total del grano y su función principal es proteger el contenido interno contra la pérdida de humedad, el ataque de plagas y microorganismos y la radiación solar. Desde el enfoque químico y nutricional, el pericarpio es una de las partes más ricas en compuestos bioactivos (taninos, antocianinas, fenoles, fibra, minerales), que aportan propiedades antioxidantes, pigmentarias y funcionales al cereal. Este, a su vez, está constituido por varias capas celulares: el epicarpio, que contiene ceras, cutina y pigmentos fenólicos (antocianinas y flavonoides); el mesocarpio, con contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina; y el endocarpio, con

polisacáridos, proteínas y compuestos fenólicos. Y en algunos casos, está presente la capa de aleurona, en contacto con el endospermo.

Se considera una estructura compleja en la que predominan carbohidratos estructurales, compuestos fenólicos y pigmentos naturales, además de una fracción apreciable de minerales y proteínas. También es una fuente excepcional de compuestos fenólicos, especialmente en las variedades rojas, marrones o negras, donde se concentran en la capa externa. Los más destacados son los ácidos fenólicos (Ácido ferúlico, p-cumárico, cafeico, siringílico y vanílico), que actúan como antioxidantes naturales y contribuyen al color, al aroma y a la estabilidad del producto fermentado o destilado. Otro de los componentes son las flavonoides y antocianinas, presentes principalmente en sorgos rojos y oscuros; estos compuestos incluyen compuestos típicos como la apigenina, luteolina, naringenina y cianidina; se destacan porque aportan tonalidades rojas, violáceas o marrones al grano y, en algunos casos, al destilado. Y, por último, están los taninos condensados, presentes principalmente en el sorgo rojo. Los taninos tienen un efecto astringente en el sabor, una capacidad antioxidante e inhiben parcialmente la digestión del almidón, pero mejoran la estabilidad del destilado y su color. En la destilación artesanal, una proporción controlada de taninos puede ser beneficiosa, ya que estos compuestos participan en reacciones de oxidación controlada, generando tonos especiados, terrosos o amaderados similares a los obtenidos durante el añejamiento en barrica. Asimismo, es una fuente importante de minerales, ya que concentra gran parte de las cenizas totales del grano, como hierro (Fe), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y zinc (Zn).

Al igual que en otros cereales, el endospermo es el tejido de almacenamiento y la mayor parte del grano de sorgo constituye entre el 80% y el 85% del peso total seco. Consiste en la capa de aleurona, así como en las zonas periféricas, córneas y harinosas. La aleurona capa externa se encuentra justo debajo de la testa (pericarpio) y consiste en células con paredes celulares gruesas. Esta parte contiene minerales, enzimas hidrolíticas (sintetizadas principalmente durante la imbibición del grano) y lípidos (Waniska y Rooney, cita 2000). La periferia del endospermo (sin incluir la capa de aleurona) está compuesta por varias capas de células densas que contienen gránulos de almidón y proteínas. Las zonas córneas (duro y compacto, con alto contenido de proteínas tipo kafirina) y las harinosas (parte blanda) del endospermo están compuestas por gránulos de almidón, una matriz proteica, cuerpos proteicos y paredes celulares ricas en glucuronoarabinoxilanos (polisacárido, tipo de carbohidrato complejo) (Hoseney, Cita 1994). Los gránulos de almidón y los cuerpos proteicos quedan atrapados en una matriz proteica en las regiones periféricas y córneas del endospermo. El endospermo harinoso se encuentra en el núcleo del grano y presenta una abundancia muy baja de cuerpos proteicos en comparación con las capas córneas y periféricas. La proporción de endospermo harinoso a córneo determina en gran medida la textura del endospermo, una propiedad relacionada con el rendimiento de molienda del grano y la digestibilidad. Podemos resaltar que estas tres zonas influyen directamente en la textura, la molienda, la gelatinización del almidón y la eficiencia de la fermentación durante la producción del whisky.

El endospermo está formado principalmente por almidón (70%: amilosa y amilopectina) y proteínas que sirven de alimento al embrión durante el desarrollo de

la planta. Los carbohidratos totales representan entre el 70 y el 75 % de la materia y constituyen la fuente de azúcares fermentables en la producción de alcohol. Las proteínas representan entre el 8 y el 12 % y son una fuente de nitrógeno y aminoácidos; influyen en el sabor y el cuerpo del destilado. Las kafirinas son las proteínas predominantes (40–60% del total) y se almacenan en los cuerpos proteicos del endospermo córneo. Durante la destilación, las proteínas se degradan parcialmente, liberando aminoácidos precursores de compuestos volátiles, como ésteres, alcoholes superiores y aldehídos, que aportan aromas dulces, frutales o tostados al whisky. Igualmente, encontramos los lípidos que representan entre 1 y 2 %; su presencia es importante por su papel en la formación de compuestos aromáticos (ésteres, aldehídos) durante la fermentación y el envejecimiento. Estos lípidos, al oxidarse o reaccionar con alcoholes, forman ésteres volátiles que influyen directamente en el perfil sensorial del destilado (notas frutales, florales o mantecosas). Los principales ácidos grasos son el ácido linoleico, el ácido oleico y el ácido palmítico. Las cenizas (minerales) , con un porcentaje de 1–1,5 %, son la fuente de fósforo, potasio, magnesio y hierro; también se encuentran pequeñas cantidades de vitaminas del complejo B (B1, B2, B6 y niacina), fundamentales para el metabolismo energético en la germinación y la fermentación. Por último, la humedad, que con 10 a 12 % permite la conservación del grano y facilita la germinación en el malteado. En el sorgo blanco, el almidón es más susceptible a la hidrólisis enzimática, mientras que en el sorgo rojo los taninos del pericarpio pueden limitar parcialmente dicha conversión, aportando mayor cuerpo y color al whisky.

El germen (embrión) del sorgo es la parte reproductiva del grano que contiene la información genética para el desarrollo de una nueva planta. Representa entre el 8 y el 12% del peso total del grano y es la parte biológicamente activa responsable de iniciar la germinación. Aunque es pequeño en proporción, su concentración de nutrientes es muy alta, ya que alberga las reservas necesarias para el crecimiento de la nueva planta. Es de gran interés porque es la principal fuente de lípidos, proteínas, vitaminas y minerales del sorgo, además de aportar enzimas activas esenciales durante el proceso de malteado.

El germen es una fracción altamente proteica, con un contenido de proteínas entre 18 y 22%, superior al del endospermo. Las proteínas del germen son principalmente albúminas y globulinas, que son solubles tanto en agua como en sales neutras. Estas proteínas contienen una mayor proporción de aminoácidos esenciales, como lisina, triptófano y metionina, que suelen ser limitantes en el resto del grano. Durante la germinación y el malteado, las proteínas del germen se degradan y liberan enzimas hidrolíticas (amilasas, proteasas, lipasas) que transforman almidones, lípidos y proteínas del endospermo. Estas enzimas activan el proceso de sacarificación, fundamental para obtener azúcares fermentables y mejorar la eficiencia alcohólica. Durante la fermentación, los aminoácidos derivados contribuyen a la formación de alcoholes superiores, aldehídos y ésteres, que enriquecen el perfil aromático del whisky.

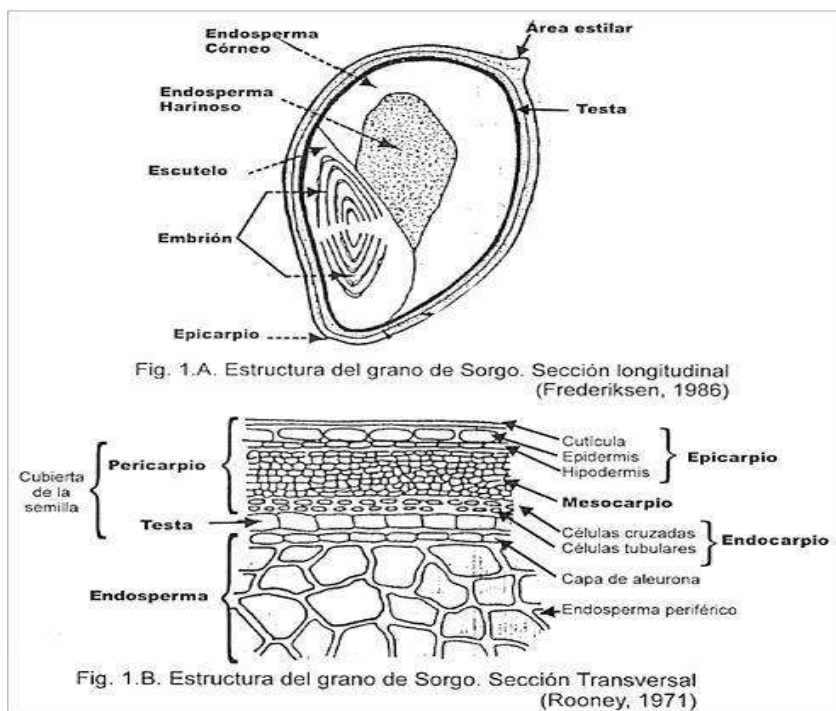
Otro aspecto importante son los lípidos que se encuentran en el germen del grano, que contienen entre el 25% y el 30% de aceite, que está compuesto mayormente por ácidos grasos insaturados los cuales son: ácido linoleico, esencial

precursor de compuestos volátiles aromáticos, el ácido oleico que aporta estabilidad al aceite y suavidad al sabor, al igual que el ácido palmítico que contribuye al cuerpo del destilado y el ácido esteárico que da estabilidad térmica y estructural. Durante la fermentación y el envejecimiento, los lípidos del germen pueden sufrir oxidación y esterificación, generando ésteres y aldehídos que aportan notas frutales, mantecosas o florales al whisky. Además, los aceites naturales del germen contribuyen al cuerpo y a la suavidad del destilado final, de manera similar al efecto de los lípidos en los whiskies de maíz o de cebada. Con respecto a los carbohidratos del germen, se encuentran en menor cantidad (8–10 %), ya que su función principal no es almacenar almidón, sino aportar energía inmediata. Pueden predominar los azúcares simples, como la glucosa, la fructosa y la sacarosa, que se utilizan rápidamente durante la germinación. Es relevante que estos azúcares sean los primeros en metabolizarse durante el malteado, lo que activa las enzimas hidrolíticas que posteriormente convertirán el almidón del endospermo en maltosa. Otros ejemplos de enzimas: (alfa) α -amilasa y (beta) β -amilasa que degradan el almidón en maltosa y glucosa, las proteasas que rompen proteínas en péptidos y aminoácidos, además está la lipasa y lipoxigenasa estas degradan lípidos y generan compuestos volátiles, otra es la fitasa que libera fósforo inorgánico de los fitatos (conocidos como ácido fítico, son compuestos naturales presentes en cereales integrales, legumbres y frutos secos); al igual que la maltasa que convierte maltosa en glucosa. La presencia de estas enzimas favorece la rápida producción de CO_2 e incluso resulta crucial para la conversión de almidones en azúcares fermentables, lo que mejora el rendimiento alcohólico y la calidad sensorial del destilado.

En el germen se observa un contenido de cenizas minerales del 4–5%, lo que indica una alta concentración de micronutrientes esenciales (fosforo, potasio, magnesio, hierro, entre otros). Estos minerales son fundamentales para la actividad enzimática tanto durante el germinado como durante la fermentación y contribuyen al equilibrio iónico del mosto. Se contempla al germen como una fuente de vitaminas liposolubles e hidrosolubles, principalmente del complejo B y de la vitamina E (tocoferoles). Los que ayudan a mantener la estabilidad oxidativa del grano durante el almacenamiento y a mejorar la viabilidad enzimática del malteado. Esta parte importante del grano de sorgo, como lo es el germen, se divide en dos partes principales: el eje embrionario y el escutelo. El eje embrionario forma la nueva planta y se subdivide en la radícula y la plúmula. La radícula forma raíces primarias, mientras que la plúmula forma hojas y tallos. El escutelo es el único cotiledón de la semilla de sorgo. Contiene grandes cantidades de aceite (en esferosomas), proteínas (incluidas enzimas) y minerales y sirve como conexión entre el endospermo y el germen (Rooney, Rooney y Serna-Saldívar Cita 2016; Waniska y Rooney Cita 2000).

Figura 6.

Estructura del grano de sorgo.



Nota: Imagen adaptada de Domanski, C, Giorda, L. M. y Feresin, O. (1997).

Composicion y calidad del grano de sorgo (Dibujo).

https://www.produccionanimal.com.ar/informacion_tecnica/suplementacion/42calidad_y_composicion_del_grano_de_sorgo.pdf

2.2.4. Ventajas del sorgo frente a otros cereales utilizados en la elaboración de whisky

Ausencia natural de gluten. A diferencia de la cebada, el trigo o el centeno, el sorgo no contiene gluten, ya que carece de las proteínas gliadina y glutenina, que, juntas, forman el gluten. La gliadina es una proteína esférica y soluble en alcohol que contribuye a la pegajosidad del gluten y es la principal responsable de desencadenar respuestas inmunes en personas con sensibilidad al gluten. La

glutenina es una proteína fibrosa, insoluble en alcohol, que proporciona elasticidad y resistencia a una masa (por ejemplo, el pan).

Alta adaptabilidad agrícola y sostenibilidad. El sorgo ha despertado un gran interés como precursor de biomasa en diversas tecnologías de desarrollo sostenible debido a su rápido crecimiento, resistencia a la sequía y la salinidad, tolerancia al encamado, alta producción de biomasa y acumulación de azúcar, excelente eficiencia en el uso del nitrógeno, amplia adaptabilidad geográfica, gran potencial de mejoramiento y facilidad para cultivarse a partir de semillas (Eggleston et al., 2013; Nghiem et al., 2016). El sorgo y la biomasa están estrechamente relacionados, ya que, gracias a su rápido crecimiento, resistencia a la sequía y alto rendimiento, constituye una fuente valiosa de biomasa vegetal. Esta biomasa se utiliza para producir una variedad de productos sostenibles, como bioenergía (bioetanol, biogás), biocombustibles y biomateriales. El sorgo puede cultivarse específicamente como "sorgo de biomasa" para este propósito, alcanzando grandes alturas y produciendo volúmenes elevados, o bien se puede aprovechar la biomasa de las variedades de sorgo de grano o de dulce.

Gracias a sus características, el sorgo constituye una alternativa propicia para aquellos sistemas que busquen preservar la buena fertilidad del suelo, siendo ideal, además, para cultivos bajo siembra directa. Posee menor huella hídrica carbono contribuyendo así producción más ecológica alineada prácticas agricultura sostenible.

Alto contenido y calidad del almidón. El sorgo contiene entre 65% y 75% de almidón, lo que lo hace altamente eficiente en la fermentación alcohólica. Este almidón está compuesto por amilosa, un polisacárido lineal (cadena recta) de unidades de glucosa unidas por enlaces α -1,4 glucosídicos, y por la amilopectina, un polisacárido ramificado de unidades de glucosa; ambas están en proporciones adecuadas para una conversión eficaz durante el malteado o la gelatinización. Es decir, esto permite una alta conversión de azúcares fermentables, lo que favorece el rendimiento alcohólico del mosto. En el proceso de malteado, las enzimas naturales del sorgo liberan maltosa y glucosa, esenciales para una fermentación homogénea. Además, su estructura almidonada aporta suavidad y cuerpo al destilado final.

Perfil sensorial único. El sorgo posee compuestos fenólicos, taninos y antocianinas (especialmente en las variedades rojas), que aportan características sensoriales distintivas a los destilados. El sorgo es rico en varios compuestos fenólicos, como ácidos fenólicos, flavonoides (incluidas las antocianinas) y taninos. Se ha demostrado que poseen diversas funciones fisiológicas, como la actividad antioxidante, antiinflamatoria y antidiabética, así como un potencial anticancerígeno. Las variedades de sorgo con pericarpio (capa externa del grano) pigmentado, como el rojo y el negro, presentan niveles más altos de estos compuestos.

Los taninos se encuentran principalmente en la testa pigmentada del sorgo. Estos compuestos pueden tener un doble efecto: por un lado, mejoran la fibra dietética y actúan como antioxidantes; por otro, al condensarse, pueden reducir la disponibilidad de proteínas e inhibir enzimas digestivas en algunas variedades. La

presencia y la concentración de taninos dependen en gran medida de la genética del sorgo. Asimismo, las antocianinas son pigmentos que confieren al sorgo sus colores característicos (rojo, marrón y morado). En el sorgo, las antocianinas predominantes son las 3-desoxiantocianidinas, como la luteolinidina y la apigeninidina. Estos son pigmentos estables y de gran interés como colorantes alimentarios naturales. El sorgo blanco: su perfil es neutro y suave, con notas dulces y cereales. Este tipo de sorgo tiende a producir un destilado más ligero y con sabores más sutiles. Es similar a la cebada malteada, aunque se perciben notas más limpias y menos complejas.

Los destilados de sorgo rojo suelen tener un perfil de sabor más complejo y robusto, con notas terrosas, especiadas y frutales y un toque amargo. Esto se debe a que la cáscara (pericarpio) es más gruesa y contiene compuestos fenólicos más complejos. También la cáscara del sorgo rojo puede aportar un color más oscuro al destilado, mientras que la del sorgo blanco deja un color más claro. El sorgo puede contribuir a una textura más densa y rica en el destilado, especialmente el sorgo rojo. Durante la fermentación y el envejecimiento, los compuestos fenólicos del sorgo interactúan con la madera, lo que genera aromas y colores más intensos y equilibrados.

Composición nutricional y funcional superior. El sorgo no es esencialmente superior a otros cereales en todos los aspectos, pero destaca por ser un cereal sin gluten, rico en antioxidantes y fitoquímicos como polifenoles, taninos y ácidos fítics, que le confieren propiedades beneficiosas para la salud.

En comparación con el trigo o el arroz, su alto contenido de amilosa puede ayudar a regular la glucosa en sangre. Además, es una excelente fuente de fibra dietética, vitaminas del complejo B, magnesio, fósforo, hierro y zinc, aunque algunos aminoácidos esenciales, como la lisina, pueden ser escasos. Su contenido antioxidante contribuye a una mayor estabilidad del mosto y del destilado, reduciendo las oxidaciones no deseadas. Estos compuestos también favorecen la formación de aromas complejos y el color natural del whisky.

Capacidad de malteado y actividad enzimática. Aunque la cebada es reconocida por su alto poder diastásico, el sorgo puede maltearse eficazmente en condiciones controladas, desarrollando amilasas, proteasas y fitasas naturales. El sorgo malteado puede convertir su propio almidón en azúcares fermentables sin necesidad de enzimas industriales. Las enzimas del germen (α -amilasa, β -amilasa, maltasa y proteasas) participan activamente en la sacarificación y en la liberación de aminoácidos, lo que mejora el rendimiento y el perfil sensorial del whisky. Durante la germinación, el grano desarrolla un potencial enzimático comparable al del maíz o del trigo malteado.

2.2.5. Producción y disponibilidad en el mercado panameño e internacional del sorgo bicolor

En Panamá, la producción de sorgo ha permanecido bastante restringida a lo largo del tiempo, según información proporcionada por FAOSTAT, que es la base de datos estadística más exhaustiva a nivel mundial sobre temas de alimentación, agricultura, pesca, silvicultura, nutrición y gestión de recursos naturales,

administrada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Los datos recopilados por Helgi Library, una plataforma abierta que proporciona acceso a datos y reportes de todo el mundo, muestran que en 2022 la producción fue de 5 kilotoneladas (5 000 t) para todo el país, lo que representa un 513% más que el año anterior. A lo largo de la historia, la producción de sorgo en Panamá alcanzó un máximo histórico de 30,4 kt en 1989 y un mínimo histórico de 0,404 kt en 2018. Panamá ha sido clasificado en el 81.º lugar entre 106 países en producción de sorgo.

En el año 2006, productores de sorgo de las provincias de Herrera y Los Santos sostenían que el grano desaparecía del mercado, ya que los industriales insistían en pagar solamente \$7 por quintal. Consideraban que, si esta posición continuaba, esto provocaría que 447 productores de ambas provincias dejaran la actividad, pues alegaban que el precio por quintal no podía estar por debajo de \$9 en ese momento. Un empresario avícola indicó en ese entonces que el sorgo extranjero tenía un precio atractivo, entre \$6 y \$6.50, a diferencia del grano nacional. Luis Fernando Castillero, secretario de Mercadeo de la Asociación de Productores de Maíz y Sorgo en ese año, sostuvo que para el 2007 se sembrarían 10 mil 500 hectáreas. Para el año 2009, el sorgo pierde rentabilidad en Panamá; en ese momento, el costo de producción de una hectárea de sorgo era de aproximadamente mil 100 dólares, mientras que el quintal se pagaba a 12 dólares. Los bajos precios en el mercado local y los altos niveles de importación provocaron que los productores dejaran de cultivar este grano de alto valor, lo que afectó al sector ganadero. La provincia de Los Santos era considerada el principal centro de producción de sorgo del país. En

la década de 1990, en la región se cultivaban 2 mil 250 hectáreas y, en 2009, la cifra alcanzó las 108 hectáreas, lo que indica que la actividad puede desaparecer. Panamá en el año 2020 exportó \$3,400 de sorgo de grano, siendo el exportador número 80 del mundo (de 113). En ese mismo año, el sorgo de grano fue el producto número 2923 más exportado (de un total de 3420). El principal destino de la exportación de sorgo de grano desde Panamá fue Curazao (\$3,400).

Panamá importó en el año 2023 \$247.000 de sorgo de grano, convirtiéndose en el importador número 75 más grande del mundo (de 159). En el mismo año, el sorgo de grano fue el producto número 2275 más importado (de 4083) en Panamá. Asimismo, se importó sorgo de grano principalmente de Estados Unidos (\$230.000) y China (\$16.800). Los orígenes de importación con mayor crecimiento para el sorgo de grano de Panamá entre 2022 y 2023 fueron: Estados Unidos (\$157.000). En contraste, las exportaciones fueron nulas, registrándose un valor de \$0. De acuerdo con informes del director nacional de Agricultura de ese año, Jorge Rivas, se reportó que durante el ciclo agrícola 2022-2023, un total de 2.572 productores sembraron aproximadamente 22.236 hectáreas de maíz. Por su parte, en el caso del sorgo, 17 productores sembraron 473,50 hectáreas de las 1.075 programadas en las provincias de Chiriquí, Herrera, Coclé y Los Santos. Hasta la fecha del informe, 11 productores habían cosechado 217,40 hectáreas, con un rendimiento de 6.860 quintales por hectárea.

En la actualidad, el cultivo de sorgo enfrenta un riesgo de desaparición progresiva, lo que genera un vacío en el mercado a pesar de la reciente aprobación de un subsidio no reembolsable de \$5 por quintal por producido y vendido. A pesar

de los incentivos gubernamentales, solo cerca de 15 productores continúan cultivando sorgo en regiones como Azuero y Chiriquí. El precio de venta del quintal de sorgo es de \$16.50, mientras que el costo de producción se sitúa en torno a \$1,900 por hectárea, con un rendimiento aproximado de 65 quintales por hectárea, según el productor Roberto Cárdenas. Los agricultores atribuyen la baja producción, en parte, a la calidad deficiente de las semillas disponibles, lo que limita el rendimiento de los cultivos. Asimismo, la dependencia de una única empresa para la compra y venta del sorgo ha generado un mercado cautivo que restringe la diversificación y la competitividad del sector. Los productores consultados señalaron que el ministerio agrícola no proporciona datos actualizados sobre la producción real, lo que dificulta comparar la producción local con las importaciones. Aunque en 2023 se sembraron aproximadamente 473 hectáreas de sorgo, las proyecciones para el presente año indican una reducción a 200 hectáreas.

En los últimos años, los países con mayor producción anual incluyen a Estados Unidos, Nigeria, India, Etiopía, México y Sudán, entre otros. En 2021, la producción mundial alcanzó aproximadamente 61 millones de toneladas; Estados Unidos aportó cerca del 19% de ese total (unos 11,4 millones de toneladas), mientras que India, Etiopía y México produjeron cada uno entre 7% y 8% del total.

La producción mundial de sorgo en 2024 ronda los 61,3 millones de toneladas, lo que representa un aumento del 4,3 % respecto al volumen cosechado en 2023 (58,8 millones de toneladas). Con 28,3 millones de toneladas, África sigue siendo el continente que más produce. Entre los principales países africanos se encuentran Nigeria (7 millones), Sudán (5,3 millones) y Etiopía (4,1 millones). Aunque Estados

Unidos mantiene el segundo puesto en la lista de los mayores productores, su cosecha pasó de 8,1 a 7,1 millones de toneladas debido a las difíciles condiciones de cultivo, como las altas temperaturas y el déficit hídrico. También retrocede India: 4,4 millones de toneladas en 2023, frente a 4,2 millones de toneladas estimadas para 2024. Rusia, China y Australia conservan cierta estabilidad, a diferencia de México, Brasil y Argentina, donde aumenta la producción de 4,3 a 4,5 millones de toneladas, de 5 a 5,2 millones de toneladas y de 2,6 a 3 millones de toneladas, respectivamente. También se espera un incremento en Europa, donde el volumen pasará de 0,8 a 1 millón de toneladas.

La mayor proporción de la producción mundial se consume en los propios países productores: cerca de la mitad se destina a la alimentación humana y alrededor del 35% al forraje animal. El comercio internacional es reducido y se concentra en pocos exportadores, con Estados Unidos, Australia y Argentina que dominan cerca del 97% de las exportaciones. El sorgo es un cultivo de amplia distribución geográfica, presente en más de un centenar de países, principalmente en la franja intertropical, aunque también se adapta a climas templados cálidos. África concentra la mayor superficie del mundo dedicada a este cereal, considerado el núcleo histórico y genético del cultivo. Países de África subsahariana como Nigeria, Sudán, Etiopía, Níger y Mali no solo lo siembran a gran escala, sino que también lo integran como ingrediente básico en la dieta diaria. En muchas comunidades rurales se transforma en papillas, panes planos, bebidas fermentadas y otros productos tradicionales. Su relevancia es tal que, en ciertas regiones, sustituye al maíz durante las sequías prolongadas.

En Asia, la India sigue siendo uno de los principales productores por superficie (cerca de siete millones de hectáreas), aunque el área cultivada ha disminuido en las últimas décadas debido a la competencia de cultivos más rentables como el arroz y el trigo. El sorgo indio se destina principalmente al consumo humano, pero también a la alimentación animal y a la producción de etanol. China lo cultiva tanto para forraje como para usos industriales y gastronómicos, con especial protagonismo en la elaboración de bebidas alcohólicas tradicionales como el baijiu. Otros países del sudeste asiático, como Myanmar, Tailandia y Filipinas, mantienen producciones relevantes, en muchos casos vinculadas a pequeños productores. En América, la producción se concentra en Estados Unidos, México y algunos países del Cono Sur. Estados Unidos, líder mundial durante décadas, genera entre 10 y 12 millones de toneladas anuales mediante una agricultura altamente mecanizada y orientada a la exportación, sobre todo a mercados como China y Japón. Su cultivo se localiza principalmente en el cinturón semidesértico de las Grandes Planicies, con mayor presencia en Kansas y en Texas. En América Latina y el Caribe hay una superficie de sorgo cosechada que, según datos recientes, ronda los 3,9 millones de hectáreas. A nivel de rendimiento promedio en 2024, el rendimiento reportado fue de aproximadamente 3,1 toneladas por hectárea. La producción de sorgo en América Latina se concentra principalmente en México, Argentina y Brasil, que juntos representan el 90% del total regional. La disponibilidad es alta en estos países, que también son grandes exportadores e importadores. El sorgo se utiliza para la alimentación animal y humana, así como para la bioenergética, y su cultivo es adaptable a zonas áridas y semiáridas. Aunque en menor escala, Nicaragua es

otro país con una producción importante y el segundo cereal más cultivado después del maíz.

Argentina y México son los mayores productores de la región. Argentina destaca como un gran exportador, mientras que México, además de ser productor, es un importante mercado de importación. Brasil se dirige a convertirse en un gran exportador y, en Centroamérica, países como Cuba también tienen niveles de producción importantes, aunque menores que el potencial.

2.2.6. Tipos de Sorgo (*Sorghum bicolor*)

Según la *Federal Grain Inspection Service (FGIS)*, dependiente del *United States Department of Agriculture (USDA)*, se establecen normas oficiales para la inspección y clasificación de granos (incluido el sorgo) bajo la autoridad de la *United States Grain Standards Act (USGSA)*. Estas normas facilitan el comercio, la calidad uniforme y la toma de decisiones entre compradores y vendedores en mercados domésticos e internacionales. El sorgo ha sido clasificado por la FGIS de USA en cuatro clases, basándose en el color del pericarpio y en la presencia o ausencia de taninos condensados. El sistema de clasificación establece cinco niveles de grado, identificados como U.S. No. 1 a U.S. No. 5. (siendo No. 1 el mejor). Los cuales indican la calidad general, además de categorías especiales como *Smutty* (tizón), utilizando factores como granos quebrados, material extraño, olor y decoloración para determinar su grado, y diferenciando tipos por color (rojo, blanco, naranja, negro, etc.) para fines de la industria. Los criterios establecidos son: en primer lugar, los granos quebrados y el material extraño (Broken Kernels & Foreign Material - BKFM), en los que un porcentaje de granos pasa por cribas específicas y se clasifica

como otros materiales no deseados. Otro criterio es la decoloración del sorgo, que califica como máximo U.S. No. 3 si está muy afectada por el clima o está calentada. También se destacan los olores ácidos, mohosos o extraños, que pueden reducir su grado. Y, por último, el tizón (Smutty), que no es más que un grano cubierto de esporas de tizón (estructuras reproductivas microscópicas de hongos que causan enfermedades graves en plantas). Las primeras variedades de sorgo presentaban una amplia gama de colores. Algunas de ellas, como la Hegari, eran de color “blanco tiza”. Otras, como Martin y Wheatland, tenían un grano de color rojo tenue y algunas presentaban semillas de color marrón oscuro. Con el desarrollo de los híbridos de sorgo, se hizo posible un rango de colores aún más amplio, ya que se cruzaron padres de colores distintos para obtenerlos. El color del grano está determinado por el color y el grosor del pericarpio, el color del endosperma, la presencia o ausencia de la testa (capa protectora fundamental en la anatomía del grano) u otros genes modificadores del color. El color del grano (blanco, crema, amarillo, bronce o rojo) no está asociado con su valor nutritivo en el 98% del sorgo cultivado en los Estados Unidos de Norteamérica (el total de sorgo producido en dicho país con taninos condensados es menor al 2%). Diversos factores, tales como el tipo y textura del endosperma, la digestibilidad del almidón y la proteína, el peso hectolítrico (unidad de volumen o capacidad que equivale a 100 litros) y las condiciones ambientales del medio donde se cultiva el sorgo son importantes y han mostrado que influyen el rendimiento y la capacidad alimenticia de los animales, a través de los ensayos de investigación realizados. Es decir, los tipos de sorgo se clasifican según su uso final, sus características morfológicas, su composición química, la

presencia de taninos, el color del pericarpio y su aptitud tecnológica. A continuación, se describen los principales tipos de sorgo:

2.2.6.1. Sorgo de Grano (Food-grade Sorghum). El sorgo de grano es el grupo de cultivos más relevante para la alimentación humana e industrial. Se caracteriza por producir granos pequeños, duros y altamente energéticos, cuya coloración puede variar entre blanco, rojo, amarillo o café. Este tipo de sorgo se selecciona principalmente por su alto contenido de almidón (60 a 75%), lo que lo hace ideal para la producción de harinas, sémolas, productos sin gluten, jarabes, malta y bebidas fermentadas o destiladas.

Los sorgos blanco y rojo son cereales ricos en almidón, fibra insoluble, proteínas y minerales (fósforo, potasio, hierro y zinc), así como en vitaminas del grupo B y compuestos fenólicos.

Sorgo Blanco (White Sorghum). Se caracteriza por un grano con pericarpio claro y bajo contenido de taninos (o sin taninos). Posee un sabor neutro y un perfil sensorial suave, por lo que se utiliza ampliamente en la elaboración de harinas, bebidas fermentadas, cervezas sin gluten y destilados. Esta característica favorece su uso en la elaboración de destilados, ya que reduce la interferencia enzimática y la formación de sabores amargos. Su perfil químico estable y la ausencia de pigmentos fenólicos permiten un procesamiento más limpio, sin aportes marcados de astringencia.

Sorgo Rojo (Red Sorghum). Presenta mayores concentraciones de taninos condensados (que le confieren color y astringencia), antocianinas y otros

polifenoles, especialmente en el pericarpio. Estos compuestos poseen propiedades antioxidantes, pero también pueden disminuir la digestibilidad proteica y la eficiencia enzimática si no se controlan adecuadamente mediante procesos como el descascarado, el malteado o la cocción. Su sabor es más profundo, con notas a cereal y nuez; se utiliza en harinas, bebidas tradicionales y destilados artesanales que requieren mayor complejidad aromática.

Sorgo con taninos (Tannin Sorghum). Se caracteriza por un alto contenido de taninos, lo que confiere mayor resistencia al ataque de insectos y prolonga la vida útil del grano. Los taninos aumentan la astringencia y reducen la digestibilidad del almidón, por lo que su uso alimentario es limitado. Sin embargo, en sistemas de fermentación puede aportar características de sabor únicas y una capacidad antioxidante. Clasificación según el contenido de taninos: Sorgos de bajo tanino (<0,5 %): ideales para alimentos y bebidas; presentan una mejor digestibilidad y un mejor rendimiento en fermentación. Incluye la mayoría de los sorgos blancos. Sorgos de tanino medio (0,5–1,0 %): más antioxidantes; útiles para productos funcionales. Sorgos de alto tanino (>1,0 %): menor capacidad de fermentación sin procesos previos. Se usa en aves y ganado y es rico en polifenoles.

2.2.6.2. Sorgo Forrajero (Forage Sorghum). Este tipo incluye variedades de porte alto y de elevada biomasa, utilizadas principalmente en la alimentación animal. Sus características: sus tallos son gruesos y tienen hojas largas; es de alta producción de materia verde por hectárea. Su grano es menos denso y presenta una menor proporción de almidón. Este tipo de sorgo no se utiliza en procesos

alimentarios ni en destilación, pero sí resulta relevante a nivel agronómico por su eficiencia en sistemas ganaderos.

2.2.6.3. Sorgo Dulce (Sweet Sorghum). Variedades cuyo tallo contiene elevadas concentraciones de azúcares solubles (12–23 °Brix), principalmente sacarosa, glucosa y fructosa. Sus aplicaciones son: la producción de sirope de sorgo, la elaboración de melazas, la fermentación para obtener alcohol etílico y destilados con perfiles dulces, así como la fabricación de bioetanol. A nivel químico, su valor radica en su capacidad para aportar azúcares fermentables sin requerir procesos complejos de licuefacción.

2.2.6.4. Sorgo Industrial o Bioenergético. Cultivado específicamente para bioetanol, biocombustibles y aplicaciones industriales, sus características principales son: alto rendimiento de biomasa, tolerancia a suelos pobres, no está destinado al consumo humano. Este tipo es fundamental para investigaciones sobre sostenibilidad, energías renovables y la producción masiva de etanol.

2.2.6.5. Sorgo Ceroso (Waxy Sorghum). Posee un grano con predominio de amilopectina, lo que confiere al almidón propiedades más pegajosas y una mayor eficiencia en la fermentación. Sus ventajas tecnológicas son las siguientes: mayor conversión a etanol y mejor comportamiento en procesos de gelatinización; asimismo, presenta un rendimiento superior en bioetanol y en bebidas destiladas.

2.2.6.6. Sorgo Perlado o Pulido (Pearled Sorghum). Se obtiene al eliminar mecánicamente el pericarpio externo. Los efectos del perlado: reducción de la fibra y de los compuestos fenólicos, aumento de la calidad sensorial y mayor

accesibilidad del almidón para enzimas y la fermentación. Se utiliza principalmente en harinas finas, cervezas sin gluten y destilados de perfil limpio.

2.2.6.7. Sorgo sudanés y híbridos Sorghum–Sudan (Sudangrass / Sorgo–Sudán). Este grupo incluye híbridos resultantes del cruce entre Sorghum bicolor y Sorghum sudanense. Se caracterizan por un crecimiento acelerado, capacidad de rebrote tras el corte y excelente tolerancia a la sequía. Su uso principal es la producción de biomasa forrajera y el pastoreo directo. Estos son ampliamente utilizados en sistemas ganaderos intensivos debido a su alta digestibilidad, elevado rendimiento por hectárea y capacidad de adaptación a diferentes suelos.

2.2.6.8.- Sorgo para Escoba (Broomcorn). El sorgo para escoba, también conocido como "*Broomcorn*", es una variedad de sorgo cultivada por su panícula larga y fibrosa, que se utiliza para fabricar escobas. Para obtener fibras de mejor calidad, se cosecha cuando los pedúnculos adquieren un color verde pálido y antes de que las semillas maduren por completo. La calidad de las fibras es fundamental para las escobas de alta calidad, que deben ser rectas, flexibles y de color verde guisante.

2.3. Maíz (Zea mays L.)

El maíz (*Zea mays* L.) es una planta herbácea anual perteneciente a la familia Poaceae o Gramínea, al igual que el trigo, el arroz, la cebada, el centeno y la avena. Es uno de los cereales más importantes a nivel mundial debido a su elevada productividad, adaptabilidad climática y amplio espectro de aplicaciones

alimentarias, industriales y energéticas. Es una hierba alta y robusta que produce granos de cereal. El tallo frondoso de la planta da lugar a inflorescencias masculinas, o borlas, que producen polen, y a inflorescencias femeninas, llamadas mazorcas, elote o choclo, en las que crecen granos comestibles o semillas. En las variedades comerciales modernas, estas suelen ser amarillas o blancas; otras pueden presentar muchos colores.

2.3.1. Origen y domesticación del maíz

Este cultivo se originó mediante el proceso de domesticación llevado a cabo por los antiguos habitantes de Mesoamérica. Hace aproximadamente 9.000 años, a partir de los “teocintles” (*Zea mays ssp. parviglumis*), gramíneas muy similares al maíz, que crecen de manera natural principalmente en México y en parte de Centroamérica. Se considera que las poblaciones de teocintle del centro de México (Kato 1984) o las que crecen en el trópico seco de la Cuenca del Balsas (Matsuoka et al. 2002) pudieron ser los ancestros de los cuales se domesticó el maíz como planta cultivada.

Su domesticación marcó un hito en el desarrollo de las civilizaciones precolombinas, convirtiéndose en la base alimentaria de culturas como las mayas, las aztecas y las incas. Los nativos americanos lo plantaron junto con frijoles y calabazas en el policultivo de las Tres Hermanas. Posteriormente, tras la llegada de los europeos al continente americano, el maíz se difundió rápidamente por Europa,

África y Asia, adaptándose a diversos sistemas agrícolas. Actualmente es el cereal con el mayor volumen de producción a nivel mundial, seguido del trigo y del arroz.

2.3.2. Composición química y nutricional del grano de maíz.

El grano de maíz es una cariopsis (tipo de fruto seco) cuya composición química responde a su función biológica como reserva de energía. La composición química del grano de maíz varía según el genotipo, las condiciones ambientales y las prácticas de cultivo. Desde el punto de vista químico y nutricional, el grano de maíz se caracteriza por una elevada proporción de carbohidratos, principalmente almidón, así como de otros compuestos, como proteínas, lípidos, fibra dietética, minerales y compuestos bioactivos (FAO, 2019).

Como se mencionó anteriormente, el almidón constituye el principal componente del grano de maíz, representando entre el 65 y el 75 % de su peso seco. Este polisacárido se localiza mayoritariamente en el endospermo y está compuesto por amilosa y amilopectina, siendo esta última la fracción predominante. La proporción entre ambos polímeros influye directamente en la gelatinización, la viscosidad del mosto y la eficiencia de la hidrólisis enzimática durante los procesos fermentativos (Serna-Saldívar, 2010). Los azúcares simples, como glucosa, fructosa y sacarosa, se encuentran en bajas concentraciones en el grano maduro (menos del 2 %); sin embargo, su contenido aumenta significativamente durante la germinación, proceso en el cual el almidón es parcialmente hidrolizado por enzimas endógenas, lo que mejora la disponibilidad de azúcares fermentables (USDA, 2023).

Después del almidón, las proteínas constituyen el siguiente componente químico del grano por orden de importancia. El contenido proteico del maíz oscila entre 8 y 11 %, concentrándose principalmente en el endospermo. Las proteínas se clasifican según su solubilidad en prolaminas (zeínas), glutelinas, albúminas y globulinas. Las zeínas constituyen la fracción mayoritaria, aunque presentan un bajo valor biológico debido a su deficiencia de aminoácidos esenciales, como la lisina y el triptófano (Pérez-Carrillo et al., 2018). Desde el punto de vista tecnológico, las proteínas del maíz influyen en la estructura del endospermo y en la liberación del almidón durante la molienda y la cocción, aspectos relevantes para la elaboración de mostos fermentables.

Los lípidos representan entre 3 y 5 % del grano de maíz y se concentran principalmente en el germen. Su fracción lipídica está compuesta mayoritariamente por ácidos grasos insaturados, entre los cuales destacan el ácido linoleico y el ácido oleico, así como por fosfolípidos, esteroides y tocoferoles (vitamina E) (FAO, 2019). En procesos de fermentación alcohólica, el contenido lipídico puede influir tanto en la actividad de las levaduras como en la formación de compuestos aromáticos secundarios, por lo que su control resulta importante en la elaboración de destilados. La fibra dietética del maíz, que representa entre 6 y 9 %, se localiza principalmente en el pericarpio y está compuesta por celulosa, hemicelulosas y lignina. Esta fracción influye en la digestibilidad del grano y puede afectar la extracción del almidón y la claridad del mosto durante la maceración (Serna-Saldívar, 2010). El germen del grano contiene el 78% de los minerales. El contenido mineral del maíz es relativamente bajo (1–2 %), pero es nutricionalmente significativo. Entre los

principales minerales se encuentran el fósforo (en forma de fitatos), el potasio, el magnesio, el calcio, el hierro y el zinc. El contenido de algunos minerales varía considerablemente según el tipo de maíz. Estos minerales actúan como cofactores enzimáticos y contribuyen al metabolismo de las levaduras durante la fermentación alcohólica (FAO, 2019). El maíz aporta vitaminas del complejo B, como tiamina, niacina y piridoxina, además de carotenoides (luteína y zeaxantina) y compuestos fenólicos, especialmente en variedades pigmentadas. Estos compuestos presentan actividad antioxidante y pueden contribuir a la estabilidad oxidativa del producto final (Pérez-Carrillo et al., 2018).

Figura 7.

Estructura del grano del maíz (Zea mays).

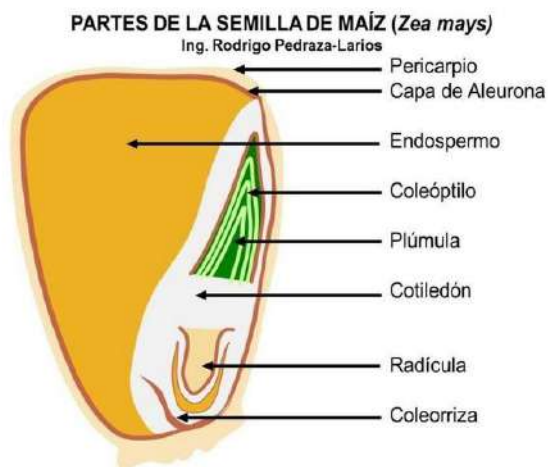


Figura 1: Diagrama de un corte sagital de la semilla de maíz y sus partes.

Nota: Adaptado de Frago de México (2021). Tratamiento a semilla de maíz con bioestimulantes de alta tecnología (Dibujo).

<https://blogdefagro.com/informacion/tratamiento-a-semilla-de-maiz-conbioestimulantes-de-alta-tecnologia/>

2.3.3. Germinación del maíz y cambios bioquímicos

La germinación del maíz no es más que la reanudación de la actividad enzimática bajo condiciones favorables, es decir, es un proceso fisiológico y bioquímico mediante el cual el grano, bajo condiciones adecuadas de humedad, oxígeno y temperatura, activa su metabolismo para dar origen a una nueva plántula. Desde el punto de vista tecnológico e industrial, la germinación reviste especial importancia debido a las transformaciones bioquímicas que incrementan la disponibilidad de compuestos fermentables, en particular de azúcares simples, esenciales para procesos como la fermentación alcohólica. Es un proceso que inicia con la absorción de agua (imbibición), el reblandecimiento del pericarpio y la reactivación del metabolismo celular, mediante la degradación de reservas de almidón para generar energía y nutrientes, y culmina en la hidrólisis de estos en azúcares (glucosa y sacarosa) para su consumo energético. Lo que implica la activación de enzimas hidrolíticas como α -amilasa, β -amilasa y proteasas, y favorece la conversión del almidón en azúcares simples, así como mejora la biodisponibilidad de minerales al reducir los fitatos.

Este proceso incrementa la eficiencia del grano en la producción de mostos fermentables, lo cual resulta especialmente relevante en la elaboración de destilados de grano (Briggs et al., 2004). También es importante la respiración celular para el crecimiento del embrión, con cambios bioquímicos clave, como la movilización de azúcares, la síntesis de nuevas proteínas y la producción de hormonas vegetales (fitohormonas), como las auxinas y las citocininas, que

impulsan el desarrollo de la raíz (radícula) y el brote (coleóptilo). Adicionalmente, la activación de rutas metabólicas para producir ácidos orgánicos (cítrico y málico) y compuestos fenólicos y, por último, la disminución de compuestos indeseables, lo que mejora el valor nutricional.

2.3.4. Uso del maíz germinado como complemento en destilados de grano

En la elaboración de whisky de grano a partir de sorgo blanco y sorgo rojo malteado, el maíz germinado (*Zea mays* L.) se emplea como componente funcional del proceso fermentativo, con el fin de lograr procesos de maceración y fermentación alcohólica más eficientes. Su utilización se fundamenta en las transformaciones bioquímicas inducidas durante la germinación, que incrementan la actividad enzimática, la disponibilidad de azúcares fermentables y el aporte de nutrientes esenciales para la levadura y, además, mantienen la condición de producto libre de gluten (Briggs et al., 2004; Serna-Saldívar, 2010). El sorgo malteado presenta actividad enzimática propia; sin embargo, su poder diastásico suele ser inferior al de la cebada malteada. En este contexto, el maíz germinado actúa como componente funcional del proceso fermentativo, contribuyendo a mejorar la eficiencia de la conversión del almidón presente en el sorgo blanco y rojo durante la maceración (Taylor et al., 2006). Esta estrategia resulta especialmente relevante en la producción artesanal de whisky de grano, donde se prioriza el uso de materias primas naturales frente al empleo de enzimas comerciales.

Como se describió anteriormente, durante la germinación del maíz se activan enzimas hidrolíticas, principalmente α -amilasa y β -amilasa, responsables de la ruptura de las cadenas de almidón en azúcares fermentables como la maltosa y la

glucosa. En el macerado conjunto, estas enzimas complementan la actividad enzimática del sorgo rojo malteado, favoreciendo una sacarificación más completa del almidón del sorgo blanco, que carece de enzimas propias (Briggs et al., 2004; Serna-Saldívar, 2010). Esta sinergia permite obtener un mosto con mayor potencial fermentativo sin alterar significativamente el perfil sensorial característico del sorgo.

El maíz germinado aporta aminoácidos libres, péptidos, vitaminas del complejo B y minerales esenciales, los cuales incrementan el nitrógeno asimilable por la levadura (YAN). Este aporte nutricional, propio de su función como componente funcional del proceso fermentativo, favorece el crecimiento celular de las levaduras, reduce el riesgo de fermentaciones lentas o incompletas y mejora la estabilidad del proceso (Pérez-Carrillo et al., 2018). La incorporación del maíz germinado como componente funcional del proceso fermentativo contribuye a una mayor eficiencia en la conversión de azúcares en etanol, lo que incrementa el rendimiento alcohólico del whisky de grano. Asimismo, una disponibilidad equilibrada de azúcares y compuestos nitrogenados influye positivamente en la síntesis de metabolitos secundarios, como alcoholes superiores y ésteres, que participan en la construcción del perfil aromático del destilado final (Briggs et al., 2004). Tanto el sorgo como el maíz son cereales naturalmente libres de gluten, por lo que su uso combinado permite elaborar un whisky de grano apto para consumidores con intolerancia o sensibilidad al gluten. El empleo del maíz germinado como componente funcional del proceso fermentativo no compromete esta característica, lo que mantiene la integridad del producto y amplía su potencial de aceptación en el mercado (FAO, 2019).

2.4. Malteado y su importancia en la producción de whisky de grano con sorgo

blanco y sorgo rojo, así como con maíz germinado

El malteado es un proceso aplicado a los granos de cereales cuyo objetivo principal es activar y desarrollar el sistema enzimático del cereal, lo que permite la conversión posterior del almidón en azúcares fermentables durante la maceración. Estos pasan por las etapas de remojo, germinación y secado (Molinari et al., 2018), sin descartar la clasificación de los granos (Demuyakor y Ohta, 1992; Agu y Palmer, 1996). La malta se utiliza como materia prima fundamental en la fabricación de cerveza y whisky. Los granos de sorgo, tanto blanco como rojo sin maltear carecen de α y β -amilasa, por tanto, para el logro de estas enzimas es preciso el proceso del malteado (Tokpohozin et al., 2018), es decir que adquiere una relevancia particular debido a las características estructurales y bioquímicas propias de este cereal, especialmente cuando se emplea como alternativa a la cebada en destilados libres de gluten.

Después de la selección de la variedad del cereal —en este caso, para nuestro whisky de grano: el sorgo blanco y rojo— la limpieza de los granos, comienza el proceso de malteado, que consiste en la germinación limitada de los granos bajo condiciones de temperatura y tiempo controladas. Este proceso consiste esencialmente en el remojo, la germinación y el secado. Los autores Agu & Palmer (1996), Demuyakor & Ohta (1992) y Dewar, Taylor & Berjak (1997) coinciden en que el malteado tiene como objetivo generar en los granos enzimas hidrolíticas endógenas que descomponen los compuestos principales, proporcionando

azúcares fermentables, nitrógeno y aminoácidos libres. Además, aporta aroma y otros compuestos esenciales para la fermentación y la calidad sensorial. La ruptura de la pared celular, debida a la degradación de los polisacáridos de dicha pared, es una de las principales etapas del proceso de hidrólisis empleado en el malteado y en la elaboración del whisky. Esto permite el acceso de las enzimas al contenido celular. Aunque Izydorczyk & Dexter (2008) y Jin, Speers, Paulson & Stewart (2004) señalan que los que no son hidrolizados pueden provocar problemas durante las etapas de producción del destilado, como la filtración lenta y la alta viscosidad. Estos problemas dan como resultado costos elevados y tiempos de proceso prolongados. El malteado del sorgo comprende tres etapas principales: remojo (hidratación), germinación y secado o kilning (“cocción en horno”), pero no podemos dejar de lado un proceso importante: la clasificación del grano. Esta etapa es fundamental para evitar que el grano llegue con una carga microbiana elevada, por lo que hay que controlar la humedad y la cantidad de proteínas.

La clasificación del grano de sorgo para malteado se centra en variedades graníferas (alto rendimiento de grano), con preferencia por aquellas sin tanino o con bajo contenido de tanino. Se busca uniformidad en tamaño y calidad; esto facilita el remojo y la germinación homogéneos, así como el secado, similar al de la cebada, con el fin de lograr una alta actividad diastásica para la producción de azúcares en bebidas. Se buscan altos niveles de enzimas (como la alfa-amilasa) y un buen poder germinativo para maximizar la actividad diastásica, esencial para optimizar la extracción y la liberación de azúcares.

Durante el remojo, los granos absorben agua hasta alcanzar un nivel de humedad que activa el metabolismo embrionario en condiciones aeróbicas, por lo que se sumergen en agua con aproximadamente 40–45% de humedad. Esta operación se realiza con agua a una temperatura controlada (15-20 °C) durante 24 horas. El remojo de los granos de cereal en agua es ampliamente reconocido como la etapa más crítica del proceso de malteado (French y McRuer, 1990). El efecto de las condiciones de remojo ha sido ampliamente investigado; las variables que se analizan con mayor frecuencia son el tiempo y la temperatura. En el caso del sorgo, Dewar, Taylor & Berjak (1997) han reportado un tiempo de 24 a 40 horas a una temperatura de 30 °C para alcanzar un poder diastásico máximo de 42,6 SDU/g (que expresa la cantidad de actividad enzimática diastásica presente en cada gramo de malta de sorgo) con la variedad *Sorghum bicolor* (L.) Moench.

Después de la etapa de remojo, viene la de germinación, en la que se inducen procesos fisiológicos y bioquímicos que conducen a la síntesis y activación de enzimas hidrolíticas, principalmente α -amilasas, β -amilasas, proteasas y enzimas degradadoras de la pared celular. Es decir, el objetivo es fomentar el desarrollo y crecimiento del embrión del grano para lograr la modificación requerida del grano y el desarrollo de las enzimas. Los granos son sometidos a la germinación en dispositivos en los que se colocan en capa, se mantienen cubiertos durante días y se rocían con agua para mantener el contenido de humedad inicial.

Se recomienda germinar los granos de sorgo a 25–30 °C para desarrollar un buen poder diastásico (Reyes, 2013). Esta etapa, que dura de 4 a 6 días, según el tipo de malta, se desarrolla en condiciones de humedad y temperatura controladas.

Autores como Agu y Palmer (1997) reportan una variación en el poder germinativo del sorgo a altas temperaturas. Lo que se persigue es que, en más del 98 % de los granos, se observe la vaina de la raíz o el brote de las raicillas de las semillas hasta llegar a las enzimas adecuadas que degradan el almidón; además, se requiere un contenido proteico bajo, entre el 9 % y el 11,5 %. Al igual que en la etapa de remojo, en la germinación las variables evaluadas son el tiempo y la temperatura; sin embargo, el óptimo de estas variables varía según la variedad de sorgo (Demuyakor, 1992; Novellie, 1962; Okafor y Aniche, 1980).

Agu y Palmer (1997) reportaron que el desarrollo de la maltasa o α -glucosidasa en el sorgo está influenciado por la extensión del tiempo y la temperatura durante la germinación. Por otro lado, esta fase también está afectada por la contaminación, que puede producir una malta con bajo poder diastático. Asimismo, Morrall, Boyd, Taylor y Vandrwalt (1986) reportaron que, a 30 °C, tras 3 a 7 días de germinación, se producen buenas modificaciones en la malta, con un alto poder diastático, un alto contenido de azúcar y de nitrógeno amínico libre. Finalmente, Taylor, Schober y Bean (2006) afirmaron que las bajas temperaturas con alto contenido de humedad incrementan la actividad de la amilasa. La etapa de secado, o kilning, constituye la fase final del proceso de malteado y desempeña una función fundamental en la estabilización del grano germinado. Su objetivo principal es detener la germinación, reducir el contenido de humedad del grano a niveles adecuados, desde valores cercanos al 40–45 % hasta aproximadamente 4–6 %, para su almacenamiento y preservar la actividad enzimática hidrolítica, principalmente amilasas y proteasas,

necesaria para la conversión del almidón durante la maceración. Al tiempo que se comienzan a definir características sensoriales relevantes para el destilado final (Briggs et al., 2004; Kunze, 2014).

El secado de la malta se realiza en un horno a temperaturas relativamente altas. El kilning del sorgo se realiza generalmente en fases progresivas, con incrementos graduales de temperatura para evitar la desnaturalización enzimática y asegurar una deshidratación uniforme del grano (Dufour et al., 1992), a diferencia del malteado de la cebada. El autor Novellie (1962) defendió el secado de la malta hasta 50 °C. Igualmente, Aisien y Muts (1987) señalaron que, si bien los períodos de secado a 80 °C pueden mejorar el sabor de la malta, dicha temperatura puede dañar la actividad enzimática y reducir la concentración de compuestos volátiles. De esta manera, Owuama y Asheno (1994) reportaron que el secado en dos fases, pero a diferentes temperaturas que las de Moll (1997), inicialmente a 55 °C y luego a 65 °C, produjo una buena malta, con una reducción considerable de la humedad y un alto contenido de azúcar, en comparación con una sola temperatura a 65 °C. De esta forma, las dos etapas del secado permiten una mayor supervivencia de las enzimas hidrolíticas y favorecen que la malta adquiera su calor característico.

El control adecuado del secado influye directamente en la eficiencia de la maceración, la fermentación del mosto y el perfil sensorial del destilado final. Un kilning suave y controlado favorece whiskies de grano con perfiles más limpios, suaves y equilibrados, lo cual resulta especialmente relevante en formulaciones artesanales y libres de gluten (Piggott et al., 2003). El sorgo blanco contribuye a perfiles más neutros y ligeramente dulces, mientras que el sorgo rojo aporta mayor

complejidad aromática y estructura, siempre que el secado se controle cuidadosamente para evitar notas astringentes (Awika & Rooney, 2004).

En el caso del maíz, aunque no se maltea tradicionalmente en la industria del whisky, la germinación controlada cumple una función equivalente, orientada a aumentar la disponibilidad enzimática y mejorar la accesibilidad del almidón (Taylor & Dewar, 2001). El maíz germinado actúa como un coadyuvante enzimático natural en la elaboración del whisky de grano. La inclusión de maíz germinado resulta especialmente relevante en sistemas basados en sorgo, ya que contribuye a mejorar la eficiencia de conversión del almidón, optimiza el rendimiento fermentativo y favorece una fermentación más estable. Además, el maíz aporta características sensoriales suaves y dulces, que equilibran los perfiles más especiados o terrosos asociados al sorgo rojo (Piggott et al., 2003).

2.5. Maceración en la producción de whisky de grano a partir de sorgo blanco y sorgo rojo con maíz germinado

La maceración es una etapa fundamental en la producción de whisky de grano, ya que en ella se convierte el almidón presente en los cereales en azúcares fermentables, que posteriormente serán transformados en alcohol durante la fermentación. En las formulaciones basadas en sorgo blanco, sorgo rojo y maíz germinado, la maceración adquiere una relevancia particular debido a las características estructurales y enzimáticas propias de estos cereales (Briggs et al., 2004; Piggott, Sharp & Duncan, 2003). Es decir, el objetivo de la maceración es formar y extraer de la solución compuestos necesarios, como azúcares

fermentables, aminoácidos, vitaminas, entre otros, a partir de la malta, para luego ser utilizados por la levadura.

Este proceso consiste en mezclar el cereal molido (sorgo malteado y maíz germinado) con agua a temperaturas controladas, con el propósito de activar las enzimas hidrolíticas desarrolladas durante el malteado y la germinación, principalmente α -amilasa y β -amilasa, responsables de la hidrólisis del almidón en azúcares simples y fermentables (Kunze, 2014). Inicialmente, este proceso implica moler los granos, es decir, triturar los sorgos (blanco y rojo) y el maíz germinado hasta obtener una harina gruesa (*grist*). Esto expone los almidones sin pulverizarlos demasiado para evitar problemas de filtrado. Mezclar (empaste) el *grist* con agua caliente en un tanque (macerador), a una temperatura inicial entre 60 y 80 °C. Inicia el proceso de conversión (acción enzimática), en el que se produce la gelatinización del almidón: se rompe la estructura cristalina del almidón del sorgo para hacerlo accesible a las enzimas (Taylor & Dewar, 2001). Seguidamente, se continúa con el control de temperatura e inicia la sacarificación; se mantiene la mezcla a temperaturas específicas para activar las enzimas de la malta (β -amilasa y α -amilasa). Un macerado escalonado es común: paradas a ~45 °C, luego a ~55 °C y, finalmente, a ~65-78 °C para convertir almidones en azúcares (glucosa y maltosa).

A continuación, se procede al licuado o *Mash-out*, es una técnica que consiste en elevar la temperatura del macerado a unos 75-78 °C durante 10-15 minutos para detener la actividad enzimática que convierte almidones en azúcares, preservando el perfil de dulzor deseado y haciendo el mosto más fluido para facilitar el lavado del grano (*Sparging*) y la extracción de azúcares. Otra etapa es el filtrado (Colado), en

el que se separa el líquido dulce (mosto) de los sólidos (bagazo). Se lava el bagazo con agua caliente a 90 °C para recuperar azúcares adicionales. Por último, el hervido (desinfección) del mosto durante 5-10 minutos para esterilizarlo antes de enfriarlo para la fermentación. A diferencia del malteado, que prepara el grano desde un punto de vista biológico, la maceración es un proceso físico–enzimático de conversión, en el cual se definen, en gran medida, el rendimiento alcohólico y la calidad del mosto fermentable. El impacto de la maceración en la fermentación y en el perfil sensorial se debe a una maceración correctamente diseñada, ya que influye directamente en la composición azucarada del mosto, la eficiencia fermentativa, el rendimiento alcohólico y el perfil sensorial del whisky de grano. El sorgo blanco aporta suavidad y neutralidad; el sorgo rojo, estructura y complejidad; y el maíz germinado, redondez y dulzor, lo que da lugar a un destilado equilibrado y distintivo (Piggott et al., 2003).

2.6. Fermentación y destilación del whisky de grano

2.6.1. Fermentación

Antes de comprender el proceso de fermentación, es importante entender y definir qué es la fermentación y, en particular, la fermentación alcohólica. La fermentación es un proceso de oxidación incompleta que no requiere oxígeno para tener lugar y produce una sustancia orgánica como resultado. Es un proceso de tipo catabólico, es decir, de transformación de moléculas complejas en moléculas sencillas y de generación de energía química en forma de ATP (adenosina trifosfato). Entonces, la fermentación alcohólica es un proceso anaeróbico donde

levaduras transforman azúcares (como glucosa) en etanol y dióxido de carbono (CO_2), liberando energía para los microorganismos; ocurre en dos etapas principales tras la glucólisis: el piruvato se convierte en acetaldehído liberando CO_2 , y luego el acetaldehído se reduce a etanol usando electrones del NADH, regenerando NAD^+ para continuar el ciclo, fundamental en la producción del whisky de grano. Las levaduras y bacterias causantes de este fenómeno son microorganismos muy habituales en frutas y cereales y contribuyen en gran medida al sabor de los productos fermentados. La fermentación es fundamental en la elaboración de destilados de cereales. Este proceso se inicia una vez concluida la maceración, cuando el mosto azucarado se enfría y se acondiciona para la inoculación de levaduras. En la producción de destilados de grano, se emplean principalmente levaduras del género *Saccharomyces*, especialmente *Saccharomyces cerevisiae*, debido a su alta eficiencia fermentativa, tolerancia al alcohol y capacidad para producir compuestos aromáticos deseables.

Durante la fermentación alcohólica, la levadura convierte los azúcares (glucosa, maltosa y otros azúcares simples) del mosto en alcohol (etanol), lo que genera un líquido de baja graduación alcohólica llamado “wash” o “vino de cereal”. La composición del mosto elaborado a partir de sorgo blanco, sorgo rojo y maíz germinado condiciona la actividad metabólica de las levaduras. El sorgo blanco proporciona un entorno más estable y predecible para la fermentación, mientras que el sorgo rojo, debido a la presencia de taninos y compuestos fenólicos, puede ejercer un efecto modulador sobre el crecimiento microbiano, aportando mayor

estructura y complejidad al destilado. El maíz germinado, por su parte, favorece una fermentación más vigorosa y aporta notas dulces y redondeadas al perfil final.

Además del alcohol etílico, la fermentación produce metabolitos secundarios como ésteres, alcoholes superiores, aldehídos y ácidos orgánicos, que aportan complejidad aromática al whisky de grano. En el caso del sorgo blanco y del sorgo rojo malteado, la hidrólisis del almidón se debe a la acción de enzimas amilolíticas (α -amilasa y β -amilasa) producidas durante el proceso de germinación. El sorgo blanco se caracteriza por un perfil de almidón más neutro y de fácil fermentación, mientras que el sorgo rojo aporta un mayor contenido de compuestos fenólicos, lo que puede influir en la cinética fermentativa y en la complejidad aromática del mosto. El maíz germinado aporta azúcares fermentables y enzimas adicionales, lo que favorece una mayor eficiencia en la conversión del almidón residual del sorgo. Su alto contenido de almidón y la activación enzimática producida durante la germinación contribuyen a una fermentación más completa y a un incremento del rendimiento alcohólico.

2.6.2. Factores que influyen en la fermentación alcohólica.

Entre los principales factores que regulan la fermentación alcohólica se encuentran la temperatura, el pH, la concentración de azúcares, la disponibilidad de nutrientes y la cepa de levadura empleada. En las fermentaciones de mostos elaborados con sorgo y maíz, el control de la temperatura es fundamental para evitar inhibiciones metabólicas o fermentaciones incompletas. Asimismo, un pH ligeramente ácido favorece la actividad de las levaduras y reduce el riesgo de contaminación microbiana (Bamforth, 2005).

La determinación de los factores que limitan la glucólisis fermentativa alcohólica es compleja debido a la interrelación entre ellos y a la naturaleza de los parámetros que intervienen en el proceso de fermentación. Los factores que surgen durante el proceso se pueden enumerar algunos de los más importantes como son:

Concentración de etanol resultante. Una de las principales limitaciones del proceso es la resistencia de las levaduras a las concentraciones de etanol (alcohol) que se alcanzan durante la fermentación; algunos microorganismos, como *Saccharomyces cerevisiae*, pueden soportar hasta el 20% en volumen (Riegel y Kent, 2003).

Acidez del sustrato. El pH es un factor limitante en el proceso de fermentación, ya que las levaduras se ven claramente afectadas por el ambiente, ya sea alcalino o ácido. Por regla general, el pH de las levaduras se sitúa entre 3.5 y 5.5.

Concentración de azúcares. La concentración excesiva de hidratos de carbono, en forma de monosacáridos y disacáridos, puede frenar la actividad bacteriana. De la misma forma, la baja concentración puede frenar el proceso. Las concentraciones límite dependen del tipo de azúcar y de la levadura responsable de la fermentación (Riegel y Kent, 2003). Las concentraciones de azúcares afectan los procesos de ósmosis en la membrana celular.

Contacto con el aire. Una intervención con oxígeno (por mínima que sea) detiene por completo el proceso (lo denominado Efecto Pasteur). Lo anterior explica la necesidad de que los recipientes destinados a la fermentación permanezcan herméticamente sellados.

La temperatura. El proceso de fermentación es exotérmico y las levaduras operan en rangos de temperatura óptimos; además, es importante entender que son seres mesófilos (organismos que prosperan en temperaturas moderadas, entre 20 y 45 °C). Si se expone cualquier levadura a una temperatura cercana o superior a 55 °C durante 5 minutos, muere. La mayoría cumple su misión a 20 °C.

Ritmo de crecimiento de las cepas. Durante la fermentación, las cepas crecen en número debido a las condiciones favorables del medio, lo que incrementa la concentración de levaduras.

La adecuada gestión de estos parámetros permite maximizar la conversión de azúcares en alcohol, asegurar la estabilidad del proceso fermentativo y obtener un mosto fermentado óptimo para la destilación posterior.

2.6.2. Destilación

La destilación es el proceso que consiste en separar las sustancias volátiles de una mezcla líquida o sólida mediante su evaporación y su condensación posterior. La destilación constituye una etapa crítica en la producción del whisky de grano, ya que permite concentrar el alcohol etílico obtenido durante la fermentación y seleccionar los compuestos volátiles responsables del perfil sensorial del destilado final. En el caso del whisky de grano sin gluten elaborado a partir de sorgo blanco, sorgo rojo y maíz germinado, la destilación cumple, además, la función de preservar las características propias de estos cereales alternativos, diferenciándolo de los whiskies tradicionales basados en cebada (Piggott, Sharp & Duncan, 2003).

En la producción de whisky de grano, la destilación se realiza generalmente en alambiques de cobre o en sistemas de columna, según el estilo buscado, aunque en la producción artesanal se privilegia el uso del cobre por su capacidad para eliminar compuestos sulfurosos indeseables y mejorar la calidad sensorial del destilado (Bamforth, 2017). El cobre actúa como catalizador químico, favoreciendo la eliminación de compuestos sulfurados indeseables y contribuyendo a un perfil aromático más limpio y equilibrado. Este efecto resulta especialmente relevante en destilados elaborados a partir de sorgo, debido a la posible formación de precursores sulfurados durante la fermentación (Russell, Stewart & Anstruther, 2013). La destilación de whisky es un proceso clave para concentrar el alcohol y purificar el sabor. Este proceso suele llevarse a cabo en dos etapas, que describimos mediante la destilación en un alambique de olla (pot still): una primera destilación en la olla (Caldera), que es el recipiente principal donde se calienta el líquido fermentado (wash o mosto), al que se le aplica calor (directo o a través de vapor) en la propia olla. Ocurre la vaporización, en la que los compuestos con puntos de ebullición más bajos (alcohol, aromas) se evaporan primero. El ascenso del vapor: este sube por el "cuello de cisne" o "cebolla", lo que permite una condensación parcial y un primer "reflujo" (vapor que se condensa y vuelve a la olla), concentrando los sabores. Pasamos por el enfriamiento (condensador); el vapor llega a un serpentín refrigerado (tubo largo en forma de espiral o zigzag) que pasa por agua fría, lo que lo enfría y da como resultado un líquido más concentrado llamado "vino bajo" (low wine), con unos 25-30 % de alcohol. Recolección (cortes): el destilado se recoge en fracciones (cabezas, corazones, colas). El destilador

selecciona el "corazón" de la bebida final, desechando las "cabezas" (más volátiles y desagradables) y las "colas" (más pesadas).

En la segunda destilación, el "vino bajo" se destila nuevamente. Se calienta lentamente y se realiza un fraccionamiento más preciso, separando el destilado en "cabezas" (metanol, desechadas), "corazón" (etanol) y "colas" (compuestos pesados). Las cabezas contienen compuestos de bajo punto de ebullición, como aldehídos y alcoholes ligeros, que pueden resultar sensorialmente agresivos; las colas, por el contrario, concentran alcoholes superiores y compuestos pesados. El corazón representa la fracción más valiosa, ya que alberga el equilibrio óptimo entre el alcohol y los compuestos aromáticos favorables; es el licor puro y de alta calidad. Este destilado final, el New Make Spirit, tiene una graduación alcohólica de 60-70 %. Cabe resaltar que el pot still es un método tradicional que prioriza el sabor y la complejidad por encima de la eficiencia, lo que da como resultado licores con una identidad distintiva. En el whisky de grano elaborado con sorgo blanco y sorgo rojo malteado con maíz germinado, la selección del corazón adquiere especial importancia para lograr un perfil sensorial armónico. El sorgo blanco aporta una base alcohólica suave y neutra; el sorgo rojo aporta mayor estructura, cuerpo y complejidad; y el maíz germinado favorece la aparición de notas dulces y redondeadas. La destilación debe realizarse sin una rectificación excesiva, ya que parte del carácter del whisky proviene de los congéneres que se conservan en el destilado (Stewart et al., 2013). La fermentación y la destilación constituyen etapas interdependientes del proceso de elaboración del whisky de grano. Una fermentación bien controlada asegura un mosto con una carga aromática adecuada

y un buen rendimiento alcohólico, mientras que una destilación precisa permite concentrar y preservar los compuestos deseables y eliminar los que afectan negativamente la calidad del producto final. En conjunto, ambos procesos definen la estructura alcohólica, el perfil sensorial y el potencial de maduración del destilado y resultan especialmente relevantes en la producción de whiskies de grano artesanales elaborados con cereales alternativos como el sorgo y el maíz.

2.6.3. Métodos artesanales vs. industriales de la destilación

La destilación artesanal se caracteriza por el uso de alambiques tradicionales de cobre y por una producción a pequeña escala. En este método, el destilador ejerce un control directo sobre variables clave como la temperatura, la velocidad de destilación y la realización de los cortes de cabeza, corazón y cola, combinando criterios técnicos y sensoriales (Bamforth, 2017). En el whisky de grano, la destilación artesanal busca preservar y resaltar las características propias del cereal empleado. Asimismo, la destilación artesanal ofrece una mayor flexibilidad operativa, lo que permite ajustes en función de la composición del mosto fermentado y del estilo de whisky deseado. No obstante, presenta limitaciones en cuanto a la eficiencia energética, el volumen de producción y la consistencia entre lotes, lo que exige un alto nivel de conocimientos técnicos por parte del destilador (Bamforth, 2017).

La destilación industrial se desarrolla a gran escala y emplea principalmente columnas de destilación continua, como las del tipo Coffey. Estos sistemas permiten una separación más eficiente del alcohol etílico y un control preciso de las variables del proceso, lo que se traduce en altos rendimientos alcohólicos y una producción

estandarizada (Russell, Stewart & Anstruther, 2013). En la producción industrial de whisky de grano, la destilación continua tiende a producir destilados más ligeros y neutros, con menor concentración de compuestos aromáticos secundarios. Por esta razón, el whisky de grano obtenido mediante este método se utiliza con frecuencia como base para whiskies mezclados (blended whiskies), aportando suavidad y equilibrio al producto final (Piggott et al., 2003). La automatización del proceso reduce la intervención directa del destilador, lo que favorece la reproducibilidad del producto y disminuye los costos operativos. Sin embargo, esta estandarización puede limitar la expresión sensorial del cereal utilizado, especialmente cuando se emplean granos con perfiles aromáticos particulares (Russell et al., 2013).

Desde una perspectiva técnica y sensorial, la destilación artesanal y la industrial constituyen enfoques complementarios. Mientras que la destilación artesanal prioriza la expresión del grano, la complejidad aromática y la singularidad del destilado, la destilación industrial enfatiza la eficiencia, la consistencia y el volumen de producción. En el contexto del whisky de grano, la elección del método de destilación influye directamente en el estilo del producto final y en su aplicación comercial (Bamforth, 2017).

2.7. Maduración del destilado de whisky de grano a base de sorgo blanco y sorgo rojo malteado con maíz germinado

La maduración es el proceso mediante el cual el whisky envejece en barricas de roble tras la destilación, desarrollando gradualmente su carácter, color, aroma y sabor. Es una etapa fundamental en la producción del whisky de grano, ya que

durante este proceso el destilado joven (llamado "new make spirit") experimenta transformaciones químicas, físicas y sensoriales que determinan su perfil final de calidad. Durante la maduración, ocurren tres fenómenos clave: la extracción de compuestos de la madera (como vainillina, taninos y lactonas), la oxidación progresiva del destilado por el oxígeno que penetra a través de los poros de la barrica, y la concentración del whisky debido a la evaporación (la famosa Cuota del Ángel). Cada uno de estos factores contribuye a moldear el perfil final del whisky. Durante la maduración, el destilado se almacena en barricas de madera, tradicionalmente de roble (a menudo carbonizadas y porosas, que permiten el intercambio de aire y líquido), donde se produce una interacción continua entre el líquido, la madera y el oxígeno ambiental. Este contacto favorece la extracción de compuestos estructurales de la madera, como lignina, taninos y hemicelulosas, que se transforman en compuestos aromáticos responsables de notas de vainilla, caramelo, coco y especias (Bamforth, 2005). El perfil inicial más suave del sorgo blanco facilita una integración progresiva de estos compuestos sin que se produzca una dominancia excesiva de notas amaderadas. Por su parte, el sorgo rojo malteado, debido a su mayor contenido de compuestos fenólicos y precursores aromáticos generados durante el malteado, aporta mayor estructura y complejidad al interactuar con la madera durante el añejamiento (Taylor & Duodu, 2015). Desde el punto de vista químico, la maduración del whisky implica una serie de reacciones, como la oxidación, la esterificación, la hidrólisis y la evaporación. La microoxigenación a través de los poros de la barrica favorece la oxidación gradual de alcoholes superiores y ácidos grasos, dando lugar a la formación de ésteres

aromáticos que aportan notas frutales y florales al destilado (Walker, 2010). El maíz germinado influye indirectamente en esta evolución química, ya que durante la fermentación aporta una mayor cantidad de azúcares fermentables y compuestos precursores que, tras la destilación, participan activamente en las reacciones de esterificación durante la maduración. Esto contribuye a una mayor redondez sensorial y a la suavización de la percepción alcohólica, especialmente en whiskies de grano joven (Bamforth, 2005). Las fluctuaciones de temperatura en el almacén hacen que la madera se expanda y contraiga, lo que permite que el whisky penetre y luego se libere de ella, intensificando el sabor y el color. El tiempo de maduración es un factor determinante en el desarrollo sensorial del whisky. En destilados elaborados con sorgo, períodos de maduración cortos a intermedios pueden bastar para lograr un perfil equilibrado, debido a la suavidad inherente al cereal. No obstante, maduraciones más prolongadas permiten una mayor integración de los compuestos del sorgo rojo malteado y de la madera, lo que da lugar a whiskies con mayor complejidad y profundidad aromática (Piggott et al., 2003). Parte del alcohol se evapora anualmente a través de la madera aproximadamente un 2%, un proceso natural conocido como la "parte de los ángeles" (término poético para el whisky que se evapora de las barricas durante el añejamiento). El tiempo mínimo legal de maduración para un whisky de grano (y cualquier whisky) es de tres años en barricas de roble, especialmente en Escocia, para poder llamarse legalmente "whisky", aunque la duración real varía mucho y suele ser más larga (8, 12, 18+ años) para desarrollar sabores complejos, especialmente en whiskies mezclados o de malta. La ley obliga a que la edad indicada en la etiqueta corresponda a la del whisky más joven de la mezcla. El tipo de barrica también influye significativamente en el perfil

final del destilado. Las barricas de roble americano suelen aportar notas dulces y avainilladas, que armonizan con el dulzor del maíz germinado, mientras que las barricas de roble europeo aportan notas más especiadas y tánicas, complementando la estructura del sorgo rojo malteado (Conner, Paterson & Piggott, 1993). Las barricas que antes contuvieron jerez, ron, entre otras, aportan diferentes perfiles de sabor. Desde el punto de vista sensorial, la maduración del whisky de grano elaborado con sorgo blanco, sorgo rojo malteado y maíz germinado se traduce en mejoras significativas en el aroma, el sabor, el cuerpo y el retrogusto. El destilado adquiere mayor complejidad aromática, con notas de vainilla, caramelo, frutos secos y especias, mientras que en boca se percibe mayor suavidad, redondez y persistencia (Taylor et al., 2006). La integración de los compuestos del sorgo y del maíz con los derivados de la madera permite desarrollar un whisky de grano con identidad sensorial propia, diferenciado de los elaborados exclusivamente con cebada o con maíz, y con un perfil adecuado para el mercado de destilados artesanales y libres de gluten.

2.8. Whisky artesanal libre de gluten

2.8.1. Bebida alcohólica artesanal

Algo artesanal es un producto o proceso elaborado principalmente a mano por una persona experta (artesano), utilizando técnicas tradicionales y herramientas manuales, que da como resultado piezas únicas, con detalles distintivos y un fuerte valor cultural. Es decir, una bebida alcohólica artesanal es un producto elaborado con técnicas rudimentarias o métodos tradicionales, sin procesos industriales automatizados, en volúmenes reducidos, a menudo por destilerías independientes

o por productores pequeños, priorizando ingredientes naturales como frutas, granos o hierbas frescas y locales, sin químicos ni conservantes artificiales y locales, cuyo proceso, a menudo transmitido de forma generacional, resalta el sabor de la materia prima para crear un perfil único y distintivo, diferenciándose de las bebidas producidas en masa.

Desde un enfoque técnico, las bebidas alcohólicas artesanales se caracterizan por la utilización de procesos de fermentación y/o destilación controlados, en los que el conocimiento empírico y científico del productor desempeña un papel central. A diferencia de los sistemas industriales altamente automatizados, la producción artesanal permite realizar ajustes específicos en función de la materia prima, las condiciones ambientales y el perfil sensorial deseado, lo que da lugar a productos con características diferenciadas y únicas (Piggott, Sharp & Duncan, 2003).

En el ámbito de los destilados, una bebida alcohólica artesanal suele elaborarse a partir de ingredientes naturales, con un uso limitado o nulo de aditivos químicos y una clara trazabilidad del origen de las materias primas. El productor artesanal interviene activamente en etapas clave como la selección del insumo principal, la fermentación, la destilación y, cuando corresponde, la maduración, tomando decisiones basadas tanto en parámetros técnicos como sensoriales (Russell, Stewart & Anstruther, 2013). Otro rasgo distintivo de las bebidas alcohólicas artesanales es la preservación del carácter del ingrediente principal. En el caso de bebidas elaboradas a partir de cereales, la producción artesanal busca resaltar las particularidades varietales y composicionales del grano, conservando compuestos aromáticos y estructurales que suelen eliminarse en procesos industriales de alta

rectificación. Esta menor estandarización contribuye a una mayor complejidad sensorial y a una identidad del producto final más marcada (Bamforth, 2017).

2.8.2. Regulaciones y normativas sobre bebidas alcohólicas “libres de gluten”

Las regulaciones sobre bebidas alcohólicas “libres de gluten” tienen como objetivo principal proteger la salud del consumidor, garantizar la veracidad del etiquetado y establecer criterios claros para el uso de declaraciones sobre la ausencia de gluten. Estas normativas adquieren especial relevancia porque muchas bebidas alcohólicas se elaboran a partir de cereales tradicionalmente asociados al gluten, como el trigo, la cebada y el centeno. El gluten es un conjunto de proteínas presentes en determinados cereales, cuya ingesta resulta perjudicial para las personas con enfermedad celíaca o sensibilidad al gluten. Por ello, los organismos reguladores internacionales han establecido límites cuantitativos y lineamientos específicos para permitir el uso de la denominación “libre de gluten” en alimentos y bebidas, incluidas las bebidas alcohólicas. La destilación elimina el gluten porque separa el alcohol de las proteínas (como el gluten) presentes en los granos originales (trigo, cebada, centeno), lo que hace que licores puros como whisky, vodka o ron sean generalmente aptos para celíacos, aunque siempre hay que tener cuidado con sabores añadidos o contaminación cruzada. Sabores añadidos: las bebidas con sabor pueden contener gluten añadido tras la destilación. En plantas que procesan productos con gluten, existe contaminación cruzada, aunque es baja en el producto final puro.

El Codex Alimentarius, establecido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la OMS (Organización Mundial de la Salud), establece que un producto puede considerarse “libre de gluten” cuando su contenido de gluten no supera las 20 partes por millón (ppm) en el producto final. Este umbral se basa en evidencia científica que demuestra que los niveles inferiores a dicho valor son seguros para la mayoría de las personas con intolerancia al gluten (Codex Alimentarius Commission, 2008). Este criterio ha sido adoptado de forma generalizada por numerosos países y constituye la base para la armonización internacional de las normativas sobre productos sin gluten, incluidas las bebidas alcohólicas.

Dentro del marco regulatorio de Estados Unidos, la responsabilidad sobre el etiquetado “libre de gluten” en bebidas alcohólicas recae conjuntamente en la Food and Drug Administration (FDA) y en la Alcohol and Tobacco Tax and Trade Bureau (TTB). La FDA establece que un producto puede declararse “libre de gluten” si contiene menos de 20 ppm de gluten; sin embargo, su competencia directa se limita a bebidas con un contenido alcohólico igual o inferior al 7 % (FDA, 2013). Las bebidas alcohólicas destiladas con mayor graduación alcohólica, como el whisky, están reguladas por la TTB. La Oficina de Impuestos y Comercio de Alcohol y Tabaco (TTB), que regula la mayoría de las bebidas alcohólicas en los Estados Unidos, recientemente dictaminó que el alcohol destilado, incluso cuando se elabora a partir de un grano que contiene gluten, puede etiquetarse como sin gluten. Los ejemplos incluyen whisky elaborado a partir de trigo o centeno y whisky escocés elaborado a partir de cebada. Este hecho se desencadenó cuando la Administración

de Alimentos y Medicamentos, que regula la mayoría de los alimentos, aclaró sus requisitos de etiquetado para productos hidrolizados, fermentados y destilados. En el caso de destilados elaborados a partir de cereales con gluten, la TTB exige advertencias adicionales, ya que aunque la destilación elimina las proteínas del gluten, el origen del cereal podría inducir confusión en el consumidor (TTB, 2020).

En la Unión Europea, el Reglamento (UE) N.º 828/2014 establece las condiciones para el uso de las declaraciones “sin gluten” y “muy bajo en gluten” en alimentos y bebidas. Según esta normativa, una bebida alcohólica puede etiquetarse como “sin gluten” si su contenido de gluten no excede 20 ppm, siempre que dicha información sea clara, verificable y respaldada por controles analíticos adecuados (European Commission, 2014). En el caso de bebidas alcohólicas destiladas, la normativa reconoce que el proceso de destilación elimina el gluten; sin embargo, el uso del término “sin gluten” debe basarse en análisis que confirmen el cumplimiento del límite establecido y en prácticas que eviten la contaminación cruzada.

El whisky de grano elaborado a partir de sorgo blanco y sorgo rojo, malteado con maíz germinado, presenta características intrínsecas que favorecen su cumplimiento de las regulaciones y normativas internacionales sobre bebidas alcohólicas “libres de gluten”. Este cumplimiento se fundamenta tanto en la naturaleza de las materias primas empleadas como en los procesos tecnológicos empleados en su elaboración. Desde el punto de vista botánico y nutricional, el sorgo (*Sorghum bicolor*) y el maíz (*Zea mays*) son cereales naturalmente libres de gluten, ya que no contienen las prolaminas tóxicas asociadas al trigo, la cebada y el

centeno. En consecuencia, el uso exclusivo de estos cereales como materias primas elimina el principal riesgo de presencia de gluten en el producto final (Taylor et al., 2016). No obstante, las regulaciones enfatizan la necesidad de aplicar buenas prácticas de manufactura para evitar la contaminación cruzada con cereales que sí contienen gluten durante la recepción, el almacenamiento, la molienda y la maceración (European Commission, 2014).

Las bebidas alcohólicas destiladas libres de gluten constituyen un componente relevante de las estrategias de salud pública orientadas a la protección de las personas con enfermedad celíaca, sensibilidad al gluten no celíaca e intolerancias alimentarias relacionadas con el consumo de cereales que contienen gluten. Dado que el consumo de bebidas destiladas forma parte de prácticas sociales ampliamente extendidas, garantizar su seguridad alimentaria y su compatibilidad con dietas terapéuticas constituye una medida preventiva de impacto poblacional.

La enfermedad celíaca es un trastorno autoinmune crónico desencadenado por la ingestión de gluten, una fracción proteica presente principalmente en trigo, cebada y centeno. En individuos genéticamente predispuestos, incluso cantidades mínimas de gluten pueden inducir una respuesta inmunológica que ocasiona daño estructural en la mucosa del intestino delgado, con consecuencias nutricionales y sistémicas relevantes (Lebwohl et al., 2018). Desde la perspectiva de la salud pública, el consumo de bebidas alcohólicas destiladas elaboradas a partir de cereales con gluten puede generar incertidumbre y riesgo sanitario, especialmente en casos de contaminación cruzada o de la adición de ingredientes posteriores a la destilación.

Además de la enfermedad celíaca, existe un grupo creciente de individuos que presentan sensibilidad al gluten no celíaca, caracterizada por síntomas gastrointestinales y extraintestinales tras la ingestión de gluten, sin evidencia diagnóstica de enfermedad celíaca ni de alergia al trigo (Sapone et al., 2012). En estos casos, la exposición a trazas de gluten, incluso a través de bebidas alcohólicas, puede desencadenar un malestar significativo y afectar la calidad de vida. Desde un enfoque de salud pública, las bebidas alcohólicas destiladas libres de gluten elaboradas con cereales como el sorgo o el maíz representan una alternativa segura que minimiza la exposición a compuestos problemáticos y favorece decisiones de consumo informadas y compatibles con la salud digestiva. La regulación y el etiquetado adecuado de las bebidas alcohólicas destiladas libres de gluten constituyen herramientas esenciales para la protección del consumidor. El cumplimiento de estos estándares contribuye a reducir el riesgo de exposición involuntaria al gluten, fortalece la confianza del consumidor y promueve prácticas responsables en la industria de bebidas alcohólicas destiladas, en concordancia con los principios de seguridad alimentaria y de salud pública. El acceso a bebidas alcohólicas destiladas libres de gluten representa un beneficio significativo para las personas con enfermedad celíaca e intolerancias, ya que les permite participar socialmente sin comprometer su salud.

En los últimos años, los consumidores han mostrado una clara preferencia por productos alcohólicos percibidos como más saludables o funcionales. Esto incluye bebidas con menos aditivos, menor contenido calórico, ingredientes naturales y perfiles de alérgenos claros, como el gluten. Estudios de mercado han demostrado

que la salud y el bienestar influyen cada vez más en las decisiones de compra, incluso en el consumo de bebidas alcohólicas (Euromonitor International, 2023). Dentro de esta tendencia, las bebidas libres de gluten han experimentado una fuerte acogida, no solo entre consumidores con intolerancias o con enfermedad celíaca, sino también entre quienes perciben los productos sin gluten como más “puros” o menos procesados. Esto ha impulsado la categoría de bebidas alcohólicas alternativas a base de ingredientes naturalmente libres de gluten como sorgo, maíz y otros granos singulares.

Los consumidores actuales buscan experiencias personalizadas y diferenciadas en sus bebidas alcohólicas. Las marcas que ofrecen narrativas auténticas, métodos artesanales, perfiles sensoriales complejos y orígenes distintivos están captando mayor atención y lealtad de los consumidores (Mintel, 2024). Esta tendencia favorece a productos como el whisky artesanal de grano, especialmente si está asociado a ingredientes alternativos como sorgo blanco y rojo y maíz germinado, que pueden aportar atributos diferenciadores frente a los whiskies tradicionales basados en cebada o en maíz industrial.

Se espera que el mercado global de bebidas alcohólicas sin gluten alcance los \$12,700 millones para 2033, lo que refleja una creciente demanda de alternativas sin cereales. Sin embargo, los consumidores deben considerar tanto los ingredientes como los procesos de producción para determinar qué califica como libre de gluten. El mercado global de bebidas alcohólicas sin gluten, valorado en \$5.600 millones en 2023, se espera que crezca a una tasa anual compuesta del 8,5 % entre 2024 y 2033. Este crecimiento refleja un cambio importante en el

comportamiento del consumidor, impulsado en parte por el aumento de los diagnósticos de enfermedad celíaca e intolerancia al gluten. Solo en Estados Unidos, se han diagnosticado unos 2,5 millones de personas. A medida que crece la conciencia, la demanda del consumidor está transformando las opciones sin gluten de un nicho en una corriente dominante, influyendo en los menús de bares, las estanterías de supermercados y otros establecimientos. El alcohol no es la excepción, ya que los productores no solo están ampliando sus portafolios para incluir etiquetas sin gluten, sino que también están invirtiendo en una mejor trazabilidad de los ingredientes y en prácticas de etiquetado más estrictas. Esta evolución ofrece a los consumidores sensibles al gluten más libertad para disfrutar de una amplia gama de bebidas sin tener que cuestionar lo que hay en su copa.

La sostenibilidad ambiental y social se ha convertido en un factor decisivo en el comportamiento de compra, especialmente entre los millennials y la Generación Z. Los consumidores valoran las prácticas de producción sustentables, los ingredientes de origen responsable y las marcas con compromiso ecológico (Nielsen, 2022). Este contexto favorece el interés por bebidas alcohólicas elaboradas con ingredientes locales o resilientes (como el sorgo, que requiere menos agua y es más tolerante a climas secos), así como por procesos artesanales que minimizan el impacto ambiental y favorecen las economías locales.

2.9. Estudios previos o investigaciones similares sobre bebidas a base de

sorgo

El sorgo (*Sorghum bicolor*), cereal tradicional en regiones tropicales y subtropicales, ha sido objeto de numerosas investigaciones debido a su potencial para la elaboración de bebidas alcohólicas y no alcohólicas. Estas investigaciones abarcan desde el desarrollo de cervezas y fermentados funcionales hasta el de destilados y bebidas innovadoras libres de gluten.

Presentamos el primer artículo titulado “Obtención de bebidas y otros productos alimenticios a partir de dos variedades de sorgo”, de la Revista Centro Azúcar de Cuba, en el que participan los autores Claudia Nieblas Morfa, Irenia Gallardo Aguilar, Leyanis Rodríguez Rodríguez, Nailín Carvajal Mena, José F. González Chávez y Margarita Pérez Pentón (2016). En este estudio se describe cómo perfeccionar las etapas del malteado de sorgo UDG-110 y, a su vez, optimizar dicho proceso mediante el estudio de las variables que más influyen en él, tales como la concentración de NaOH (Hidróxido de sodio) y los tiempos de remojo y de germinación. Igualmente, se aplicó el mismo estudio al malteado del sorgo rojo, utilizando las mismas variables. Mencionan que los resultados obtenidos en el malteado para el sorgo blanco y sorgo rojo son similares, especifican que las variables con mayor influencia en la respuesta de calidad de las maltas son la concentración de Hidróxido de Sodio, con resultado negativo, seguidamente la variable del tiempo de germinación, estos sostienen que los valores óptimos fueron 0,1 % la concentración de Hidróxido de sodio, 12 horas y 72 horas los tiempos de remojo y germinación. Para estos autores, el almidón, un carbohidrato complejo, es el principal componente del sorgo, ya que su proporción representa entre 79 y 81%

del peso del grano seco. Basándose en el autor Carter (2009): “El almidón es el compuesto por el cual se valora este cereal para su posible uso en la industria alimenticia y de las bebidas; al ser este degradado, se transforma en azúcares que posteriormente pueden ser fermentables. Aunque también tienen algunas variedades de fenoles y taninos, que son sustancias que previenen la formación de radicales libres y la aparición del cáncer, así como su elevado contenido de fibras”.

En este segundo artículo, los autores realizaron un estudio para perfeccionar el proceso de malteado aplicado al sorgo udg-110 para la elaboración de bebidas ideales para enfermos celíacos. Investigación publicada en la revista Centro Azúcar en Cuba. Los autores Irenia Gallardo Aguilar, Yanet Boffill Rodríguez, Lisyaulén Rega López, Mario S. Pino Hurtado, Yedier Rodríguez Padrón y Margarita Pérez Pentón (2018) proponen, en este estudio, agregar compuestos químicos con el fin de mejorar el poder diastásico de la malta. En otras palabras, representa el grado de eficiencia de la malta en la transformación del almidón en azúcares fermentables durante la etapa de maceración en la producción de bebidas alcohólicas. Este poder diastásico es esencial para la fermentación, ya que las levaduras necesitan estos azúcares para producir alcohol y dióxido de carbono. Hacen referencia a Molianari et al. (2018), definiendo el malteado como un proceso aplicado a los granos de cereales que comprende las etapas de remojo, germinación y secado. La malta, producto obtenido del grano de un cereal, es la materia prima esencial en la fabricación de la maltina (bebida de malta sin alcohol), la cerveza y el whisky. Los autores subrayan cómo influyen variables como el tiempo de remojo y de germinación, así como la utilización de agentes que potencien las condiciones de

transformación del cereal en la etapa de germinación, por ejemplo, el hidróxido de sodio. Recomiendan, además, que en este proceso de malteado el grano de sorgo sea de buena calidad y tenga poco tiempo de almacenamiento, lo que permite lograr un mayor poder enzimático.

La investigación de Arnulfo Taron, Carmen Espitia, Lorenzo Fuentes, Benjamín Ruiz y David Martínez, realizada en Colombia, titulada “Elaboración de una bebida alcohólica destilada a partir de sorgo (*Sorghum saccharatum*) con las características congenéricas del cereal” (2012). Plantean que se puede producir una bebida alcohólica destila a base de sorgo (*Sorghum saccharatum*) mediante la hidrolisis enzimática del almidón empleando alfa y beta amilasas comerciales, El extracto obtenido es una bebida de 43,37% de volumen de alcohol con características del aroma del cereal; Este se encuentra libre de metales pesados y se encuentra en el rango para ser catalogado como un vodka 30 – 45% v/v de alcohol.

Rodríguez (2004–2005), estudiante de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, realizó un estudio titulado “Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo”. Donde se hace un repaso sobre el proceso de obtención de alcohol por fermentación y las materias primas utilizadas, haciendo énfasis en los cereales y a los métodos de sacarificación de estos. En las destilerías, el proceso de sacarificación se realiza en el sacarificador, un tanque dotado de dispositivos que favorecen el calentamiento, el enfriamiento y la agitación de la materia prima. Explica que, para realizar la sacarificación, las masas pueden prepararse con o sin ácidos, enzimas y vapor a presión; describe los métodos empleados tanto en la industria como en el laboratorio. Se realizaron experimentos en los cuales se

utilizaron dos variedades de sorgo: UDG-110 y CIAP-74V-04; el primero fue malteado para usarse en las muestras donde se combinaban la sacarificación ácida y enzimática, con presión; mientras que el CIAP-74V-04 se utilizó en los experimentos con sacarificación ácida donde se tuvieron en cuenta diferentes variables como son: relación sólida / líquido, concentración del ácido y tiempo de cocción. Los experimentos de sacarificación ácida reportaron resultados inferiores a los de los sacarificados con la combinación de ácido y malta tratados a presión. De las tres variables estudiadas para la obtención de alcohol a partir de sorgo mediante el tratamiento ácido como vía de sacarificación, la concentración de ácido es la de mayor influencia, seguida del tiempo de cocción. Asimismo, le arrojaron mejores resultados que los obtenidos en las etapas de sacarificación y fermentación, tanto con las masas sacarificadas con ácido como con malta. En conclusión, la obtención de alcohol a partir de sorgo de doble propósito ya sea a partir del jugo de su caña como de los granos puede constituir una fuente de sustrato no convencional para diversificar la industria de las bebidas alcohólicas tanto por los resultados que este ofrece en cuanto a la calidad del producto como por la resistencia de su cultivo

Para la estudiante Guzmán (2021) de la Universidad Agraria del Ecuador, propone en su investigación “Estudio de Factibilidad para la elaboración de Licor Blanco de Sorgo en la comuna Tugaduaja, provincia de Santa Elena”, expone que la elaboración de licor blanco de sorgo tiene como fin, proporcionar un producto con textura, olor y sabor de calidad, también explica que el sorgo cultivado en Santa Elena es utilizado por la agroindustria como materia prima para la elaboración de

alimentos concentrados para animales, una vez cosechado en el campo, el forraje de las plantas es aprovechado para el ganado vacuno. Describe qué ventajas ofrece trabajar con este tipo de grano, ya que es un cultivo rústico que puede adaptarse a diferentes tipos de suelo y no requiere mucha humedad. Taylor, Schober & Bean (2006) evaluaron el uso del sorgo en la elaboración de cervezas sin cebada tradicional, analizando su composición, la calidad del mosto y la eficiencia fermentativa. Los autores concluyeron que el sorgo puede producir cervezas de aceptable calidad, siempre y cuando se optimicen procesos como la gelatinización y la acción enzimática, dada la menor actividad diastásica del sorgo en comparación con la de la cebada.

Chandra et al. (2015) estudiaron fermentaciones de *Sorghum bicolor* en combinación con otros granos, evaluando parámetros como la producción de alcohol, la densidad del mosto y el perfil sensorial. Los resultados mostraron que el sorgo, aun sin cebada, puede generar bebidas fermentadas con perfiles organolépticos aceptables y niveles adecuados de etanol, siempre que se controle la temperatura y la composición de azúcares. Otros autores, como Agu & Palmer (1998), realizaron evaluaciones sobre el malteado y la fermentación del sorgo para bebidas alcohólicas y concluyeron que la principal limitación tecnológica radica en la conversión del almidón sin la asistencia de enzimas comerciales. Sin embargo, su investigación demostraba que, con procesos adecuados de malteado y maceración, el sorgo podía producir alcohol de calidad comparable al de los cereales convencionales. En otra investigación de Awika & Rooney (2004), aunque su foco fue más amplio sobre compuestos fenólicos y calidad nutricional, aportaron

evidencia de que los granos de sorgo rojo —muy ricos en polifenoles— pueden influir en las características aromáticas y de textura de bebidas fermentadas y destiladas, algo que se traduce en perfiles sensoriales más complejos cuando se usan variedades pigmentadas. Una investigación de Mlambo et al. (2018), aunque enfocada en productos africanos tradicionales, demostró que métodos de fermentación adaptados permiten obtener bebidas alcohólicas a base de sorgo con perfiles sensoriales agradables y aceptables para los consumidores locales, lo que evidencia la viabilidad de estos procesos en ámbitos artesanales.

Desde el enfoque de innovaciones tecnológicas y funcionales del sorgo, más allá de bebidas tradicionales, se han explorado fermentados funcionales a base de sorgo con potencial probiótico o con la adición de cepas específicas de levadura. Adeboye et al. (2020) realizaron fermentaciones mixtas (levaduras y bacterias lácticas) utilizando sorgo como sustrato, observando un incremento de compuestos bioactivos y de características organolépticas diferenciadas, lo que abre posibilidades para bebidas fermentadas tipo “craft” con beneficios nutracéuticos. También Obadina et al. (2021) evaluaron fermentaciones de sorgo con cepas seleccionadas de *Saccharomyces cerevisiae* y concluyeron que la selección de levaduras con alta tolerancia al alcohol mejora la calidad y el rendimiento de bebidas fermentadas a base de sorgo sin comprometer las propiedades nutricionales.

Las experiencias tradicionales y contemporáneas del uso del sorgo en bebidas alcohólicas, con enfoque en las regiones de África, Asia y Latinoamérica. El sorgo (*Sorghum bicolor*) es uno de los cereales más antiguos y versátiles del mundo, utilizado no solo como alimento básico en regiones semiáridas, sino también como

materia prima para la elaboración de bebidas alcohólicas tradicionales y comerciales. Su uso en fermentaciones y destilaciones refleja adaptaciones culturales, la disponibilidad de recursos locales y técnicas ancestrales que han perdurado hasta la actualidad. En África, donde el sorgo ha sido un cultivo fundamental durante milenios, su uso en bebidas alcohólicas es una práctica bien documentada. Existen múltiples ejemplos tradicionales en países de África occidental, como Burkina Faso y Ghana; el sorgo se destina a la producción de bebidas fermentadas populares, como el dolo y el pito, consumidas tanto en contextos cotidianos como en ceremoniales y festivos. Estas bebidas se elaboran mediante la fermentación del grano de sorgo malteado o parcialmente germinado, lo que produce bebidas de bajo contenido alcohólico empleadas en rituales sociales y comunitarios. En Zimbabwe y otras regiones africanas se elaboran cervezas opacas tradicionales (chibuku, umqombothi), en las que el sorgo figura como ingrediente principal o complementario, junto con otros granos. Estas cervezas, ricas en levaduras y sólidos, aunque no destiladas, constituyen un antecedente etnográfico crucial para la comprensión de las técnicas de fermentación locales de sorgo. La prohibición de la importación de cebada en Nigeria impulsó el mercado de la cerveza opaca y de la cebada en polvo de sorgo. También se produce cerveza clara, especialmente en Nigeria y Ruanda. En Camerún y en la República Centroafricana, la bebida Amgba (fermento opaco de sorgo y maíz) es clave para la economía de las mujeres y se bebe en ocasiones especiales. En Asia, y más específicamente en China, representa uno de los casos más sofisticados y de larga data en el uso de sorgo para bebidas alcohólicas destiladas. El sorgo es el ingrediente principal del baijiu, uno de los destilados más consumidos del mundo,

cuya historia se remonta a hace más de 750 años. En la provincia de Guizhou se producen destilados icónicos como el Moutai, elaborado predominantemente con sorgo (junto a otros granos en algunas variantes), que combina técnicas tradicionales de fermentación y destilación con procesos industrializados. La cultura china considera al baijiu una bebida ceremonial, festiva y de identidad nacional, con múltiples estilos locales elaborados a partir del sorgo fermentado y destilado. El Kaoliang es un licor claro de sorgo, un tipo de Baijiu suave, con raíces históricas en la región. En China, incluso desde las dinastías Tang y Song, se tiene registro de técnicas para producir alcohol destilado a partir de cereales, con el sorgo como ingrediente clave en muchas de ellas.

Aunque no existen bebidas destiladas tradicionales ampliamente documentadas en toda la región, exclusivamente a base de sorgo (como un baijiu latinoamericano), se sabe que el sorgo ha sido utilizado históricamente en varios países como ingrediente en fermentaciones locales, adaptándose a las prácticas alimentarias y de elaboración de bebidas artesanales. Por ejemplo, en zonas rurales de México y Centroamérica se ha incorporado el sorgo en fermentaciones caseras de bebidas tradicionales, en muchos casos, como reemplazo o complemento del maíz, debido a su resistencia climática y a su disponibilidad local.

Estos trabajos de investigaciones proporcionan un enfoque importante y pertinente al desarrollo de este proyecto que plantea la elaboración de un whisky artesanal libre de gluten, donde se centra en un cereal como el sorgo blanco y sorgo rojo los cuales requieren del proceso del malteado, que va a permitir la explotación de las propiedades de este cereal y lo convierta en el componente principal del

destilado, sin dejar a un lado que este se complementa con el maíz germinado , melaza o sirope de sorgo . Recalcan las propiedades de este cereal, su gran utilidad en diversos ámbitos y la factibilidad de su producción.

III. MARCO METODOLOGICO

3.1. Diseño y Tipo de Investigación

La presente investigación se enmarca en un diseño de investigación aplicada experimental, ya que se manipularán diversas variables, como el sabor, el olor y el color, mediante la recolección de datos. Con un enfoque cuantitativo se recopilan y analizan datos fisicoquímicos y sensoriales para determinar los resultados del producto obtenido. Buscando responder al cómo, en dicha investigación.

3.2. Delimitación del estudio

La presente investigación se delimita al corregimiento de Alcalde Díaz, en el sector de la calle H, ubicado en la provincia de Panamá. La población objeto de estudio está conformada por los habitantes de dicho sector, mayores de 18 años, seleccionados al azar. El estudio se desarrollará durante el periodo

comprendido entre julio y diciembre del año 2025. Desde el punto de vista temático, la investigación se enfoca en la elaboración de un whisky de grano, limitándose a las variables planteadas y excluyendo otros factores que no forman parte del alcance del estudio.

3.3. Variables del estudio

3.3.1 Variable dependiente

- Rendimiento alcohólico:

Cantidad de alcohol etílico obtenido a partir del mosto fermentado, expresada en porcentaje de alcohol (% v/v) o en grados alcohólicos.

- Proceso fermentativo:

Grado de conversión de los azúcares fermentables en alcohol durante la fermentación.

- Composición fisicoquímica del destilado:

Parámetros como la concentración alcohólica, la claridad y la estabilidad del destilado obtenido.

- Perfil sensorial:

Conjunto de atributos organolépticos que incluyen el aroma, el sabor, la suavidad, el cuerpo, el equilibrio y la aceptación general del destilado.

- Viabilidad técnica:

Capacidad del proceso para ser ejecutado de manera estable y reproducible utilizando sorgo blanco, sorgo rojo malteado y maíz germinado.

3.3.2. Variable independiente

- Cereales para la elaboración del whisky de grano sin gluten. Tipo de cereal empleado: sorgo blanco y sorgo rojo (*Sorghum bicolor*), malteado y maíz germinado (*Zea mays*).
- Parámetros de Hidrólisis/Sacarificación: convertir el almidón en azúcares fermentables: condiciones de fermentación.
- Temperatura: generalmente controlada para favorecer la actividad de la levadura.
- Tiempo: Duración del proceso (7 días después del malteado).
- pH inicial: nivel de acidez ajustado para prevenir contaminaciones y optimizar la actividad de la levadura.
- Concentración de levadura: cantidad de levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) añadida al mosto.

- Relación Sólido/Líquido: Proporción de sorgo respecto al agua en la mezcla inicial.

3.4. Población y Muestra

3.4.1. Población

La población encuestada en esta investigación fue de 25 personas adultas de 20 a 55 años, pertenecientes a la comunidad de alcalde Díaz, barriada calle H, consumidoras potenciales de destilados artesanales, interesadas en productos sin gluten y en valores de producción sostenible. Se seleccionó una muestra no probabilística intencional para la fase de evaluación sensorial.

3.4.2. Muestra

La muestra se les brindará a 25 sujetos transeúntes de la barriada calle H no entrenados en el campo sensorial. La cantidad de muestras establecida responde exclusivamente a la necesidad de determinar el grado de aceptabilidad del producto y considerar eventuales ajustes para su optimización posterior.

Probabilísticamente, las pruebas se aplican a un público con características específicas, elegido a juicio, y se es consciente de que no es posible generalizar las preferencias de toda la población.

La unidad de análisis estuvo constituida por cada lote experimental de whisky de grano elaborado y evaluado a lo largo de las distintas etapas del proceso productivo.

La muestra establecida se fijó en función de las limitaciones de recursos, tiempo y materias primas, lo que permitió evaluar de manera efectiva el comportamiento tecnológico de los cereales utilizados y satisfacer los objetivos de la investigación

IV. RECOLECCIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Con el propósito de alcanzar los objetivos establecidos al inicio de esta investigación, se elaboró un whisky libre de gluten de manera artesanal, siguiendo los procesos de malteado, fermentación y destilación. Se evaluaron las características organolépticas del whisky terminado, se realizaron pruebas para obtener resultados veraces y dichos datos recabados se analizaron bajo diferentes parámetros.

El tipo de encuesta aplicada fue de carácter sensorial estructurada, de tipo descriptivo-evaluativo, ampliamente aceptada en estudios sobre alimentos y bebidas.

4.1. Población encuestada

- Número de participantes: 25
- Rango de edad: 20 a 55 años
- Criterio de selección: personas adultas consumidoras ocasionales y habituales de bebidas destiladas.

- Tipo de muestreo: no probabilístico, por conveniencia.

4.2. Condiciones de aplicación

- Degustación controlada de muestras codificadas (Prueba 1, Prueba 2 y Prueba 3).
- Muestras evaluadas (con envejecimiento de 2, 4, 6 meses). ○ Evaluación individual y anónima.
- Limpieza del paladar entre muestras (con agua).

4.3. Instrumento de recolección de datos (encuesta)

Escala hedónica utilizada:

1= Me disgusta extremadamente

5= Ni me gusta ni me disgusta

9 =Me gusta extremadamente

4.4 . Preguntas de la encuesta sensorial

Datos generales:

1. Edad: ____ años

2. ¿Consume bebidas destiladas?

☐ Sí ☐ No

- Evaluación sensorial (por muestra):

3. ¿Qué tan agradable le resulta el aroma del destilado?

4. ¿Qué tan agradable le resulta el sabor del destilado?
5. ¿Cómo evalúa la suavidad en la boca?
6. ¿Cómo percibe el equilibrio general del destilado?
7. ¿Qué tan aceptable considera el producto en general?

4.5 Datos obtenidos de las encuestas realizadas

Cuadro #1

Distribución de los encuestados según edad

Criterio	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
18 – 25	6	24%
26 – 35	9	36%
36 – 45	7	28%
46 – 55	3	12%
Total	25	100%

En la encuesta realizada, a los 25 participantes establece un rango de edad, y podemos observar que la mayor proporción de los encuestados se concentra en el rango de 26 a 35 años que representa un (36 %), seguida del grupo de 36 a 45 años que representa el (28 %), seguido en escala entre los 18 a 25 que representa un (24%) y un menor grupo entre 46 a 55 años que representa un (12%) lo que indica que la muestra está compuesta principalmente por adultos

jóvenes y adultos en edad productiva, un segmento relevante para el consumo de bebidas destiladas artesanales.

Cuadro #2

Consumo de bebidas destiladas

Criterio	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Sí	21	84%
No	4	16%
Total	25	100%

Los 25 participantes de la encuesta son residentes de la barriada de Calle H y forman parte de la comunidad seleccionada para evaluar el whisky artesanal sin gluten. La selección de esta población permitió obtener percepciones reales de consumidores locales, lo que aportó validez social y contextual a los resultados del estudio.

En la encuesta realizada al grupo de 25 personas indica que 21 de 25 personas que representa el (84 %) de los encuestados manifestó consumir bebidas destiladas, lo que demuestra una alta familiaridad y aceptación hacia este tipo de productos, y el resto de los encuestados 4 de 25 que representa un (16%) no consumían a menudo un destilado, Este resultado respalda la pertinencia del estudio, ya que la mayoría de los participantes pertenece al público objetivo del whisky artesanal sin gluten.

Cuadro #3

¿Qué tan agradable le resulta el aroma del destilado?
Evaluación del aroma del destilado

Criterio	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Muy desagradable	1	4%
Desagradable	2	8%
Ni agradable ni desagradable	5	20%
Agradable	10	40%
Muy agradable	7	28%
Total	25	100%

Los resultados de la experiencia personal de los 25 encuestados indican que 10, que representan el 40 % de los encuestados, consideraron el aroma del destilado agradable, mientras que 7, que representan el 28 %, lo calificaron como muy agradable, lo que suma un 68 % de aceptación positiva. Este grupo mayoritario refleja que los compuestos aromáticos generados durante la fermentación y la destilación artesanal fueron percibidos positivamente por los residentes de la barriada de Calle H.

Por otro lado, (5), que representa el 20 % de los participantes, manifestó una percepción neutra, y (2), que representa el 8 %, indica que el aroma no resultó ni agradable ni desagradable. Finalmente, un 4 % lo considero muy desagradable, posiblemente asociado a preferencias personales o a la sensibilidad individual frente a los destilados artesanales.

Cuadro #4

¿Qué tan agradable le resulta el sabor del destilado?

Evaluación del sabor del destilado

Criterio	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Muy desagradable	1	4%
Desagradable	1	4%
Ni agradable ni desagradable	4	16%
Agradable	11	44%
Muy agradable	8	32%
Total	25	100%

En cuanto al sabor, la experiencia personal de los 25 encuestados (11) que representa el 44 % de los encuestados lo calificó como agradable y (8), que representa el 32 %, como muy agradable, lo que representa un 76 % de aceptación positiva y evidencia que el perfil gustativo del whisky artesanal fue bien recibido por la mayoría de los participantes de la barriada Calle H. Un (4), que representa el 16 % de los encuestados, expresó una valoración neutra, lo que indica que el sabor no generó una impresión destacada, lo cual puede relacionarse con la ausencia de maduración prolongada o con la intensidad alcohólica propia de un destilado joven.

En contraste, (1) que representa el 4 % consideró el sabor desagradable y otro 4 % lo calificó como muy desagradable, porcentajes bajos que no afectan significativamente la aceptación general del producto.

Cuadro #5

¿Cómo evalúa la suavidad en la boca?

Evaluación de la suavidad en boca

Criterio	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Muy baja	1	4%
Baja	3	12%
Media	6	24%
Alta	9	36%
Muy alta	6	24%
Total	25	100%

Respecto a la suavidad en boca, la experiencia personal de los 25 encuestados (9), que representa el 36 % de los encuestados, la calificó como alta, mientras que (6), que representa el 24 %, la calificó como muy alta, lo que suma un 60 % de valoración positiva y sugiere que el destilado presenta una textura aceptable y una sensación alcohólica moderada para la mayoría de los consumidores.

Un (6), que representa el 24 % de los participantes, evaluó la suavidad como media, lo que indica que, si bien el producto no resultó agresivo, aún podría optimizarse mediante ajustes en el proceso de destilación o reposo.

Por otro lado, (3), que representa un 12 %, indicó una suavidad baja y (1), que representa un 4 %, la calificó como muy baja, negativa, posiblemente asociada a la graduación alcohólica o a la falta de envejecimiento del producto.

Cuadro # 6

¿Cómo percibe el equilibrio general del destilado?

Evaluación del equilibrio general del destilado

Criterio	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Muy desequilibrado	1	4%
Desequilibrado	2	8%
Medianamente equilibrado	6	24%
Equilibrado	10	40%
Muy equilibrado	6	24%
Total	25	100%

En relación con el equilibrio general del destilado, la experiencia personal de los 25 encuestados (10), que representa el 40 % de los encuestados, lo consideró equilibrado y el 24 % muy equilibrado, sumando un 64 % de aceptación positiva, lo que evidencia una adecuada relación entre aroma, sabor, cuerpo y nivel alcohólico.

Un 24 % manifestó que el producto es medianamente equilibrado, lo cual sugiere que, aunque el destilado cumple con parámetros aceptables, existen aspectos que podrían mejorarse para lograr una mayor armonía sensorial.

Finalmente, un 8 % percibió el destilado como desequilibrado y un 4 % como muy desequilibrado, lo que alcanzó un 12 % de percepción negativa, atribuible a diferencias individuales en la tolerancia al alcohol o a preferencias de sabor.

Cuadro #7

¿Qué tan aceptable considera el producto en general?

Nivel de aceptación general del destilado

Criterio	Frecuencia (n)	Porcentaje (%)
Nada aceptable	1	4%
Poco aceptable	2	8%
Medianamente aceptable	4	16%
Aceptable	10	40%
Muy aceptable	8	32%
Total	25	100%

La aceptación general del producto en la experiencia personal de los 25 encuestados mostró que (10), que representa el 40 %, lo calificó como aceptable y (8), que representa el 32 % como muy aceptable, lo que representa un 72 % de aceptación positiva dentro de la comunidad de la barriada Calle H, confirmando el potencial del whisky artesanal sin gluten como un producto viable y atractivo.

Un 16 % de los participantes lo consideró medianamente aceptable, lo que indica que el producto cumple con las expectativas básicas, aunque podría optimizarse en futuras formulaciones.

Por otro lado, (2) que representa un 8 % lo calificó como poco aceptable y (1) que representa un 4 % como nada aceptable, el porcentaje que se mantiene bajo no compromete la viabilidad general del destilado.

CONCLUSIÓN

La investigación permitió evaluar el uso del sorgo blanco y del sorgo rojo malteado como materia prima principal en la elaboración de un whisky de grano artesanal libre de gluten, incorporando el maíz germinado como cereal complementario en el proceso de destilación. Los resultados confirman que estos cereales representan una alternativa técnicamente viable frente a la cebada, el trigo o el centeno, debido a su alta adaptabilidad agronómica, lo que permite obtener un destilado con características fisicoquímicas y sensoriales aceptables. Se evidenció que el sorgo blanco contribuye a un perfil sensorial más suave y limpio, mientras que el sorgo rojo malteado aporta mayor complejidad aromática, estructura y cuerpo al destilado. El maíz germinado favoreció la disponibilidad de azúcares fermentables, mejoró la eficiencia fermentativa y aportó notas dulces que armonizan el perfil sensorial final del whisky de grano. El proceso de malteado, maceración, fermentación y destilación, aplicado bajo condiciones controladas de tiempo, temperatura y molienda, permitió obtener mostos adecuados para la fermentación alcohólica, logrando un rendimiento satisfactorio y un destilado con características fisicoquímicas y organolépticas aceptables. Es decir, se comprobó que la variación de estos parámetros influye directamente en la calidad sensorial del producto final, lo que confirma la importancia del control técnico en cada etapa del proceso. La variación de tiempos, temperaturas y proporciones de materia prima evidenció cambios significativos en las características finales del whisky, lo que confirma la sensibilidad del proceso a dichas variables.

Desde el punto de vista técnico y agroindustrial, la elaboración de un whisky de grano sin gluten a base de sorgo y maíz germinado representa una alternativa

innovadora, alineada con las tendencias actuales del mercado, orientadas al consumo de productos diferenciados, artesanales y aptos para personas con intolerancia al gluten.

No obstante, si bien el sorgo es un cereal ampliamente producido y utilizado a nivel internacional, especialmente en países de África, Asia y América, se constató que en Panamá su producción es limitada y no está orientada de manera significativa a usos agroindustriales. Esta situación puede representar una limitación en la disponibilidad de materia prima, afectando la continuidad del proceso productivo, la estandarización del producto y los costos asociados a la elaboración del whisky de grano sin gluten, especialmente en iniciativas artesanales o de pequeña escala. En definitiva, la investigación confirma que el sorgo blanco y el sorgo rojo malteado, complementados con maíz germinado, pueden utilizarse de manera eficiente en la producción de un whisky de grano artesanal libre de gluten. Este estudio sienta las bases para futuras investigaciones orientadas al envejecimiento, a la optimización de formulaciones y al escalamiento productivo de destilados alternativos a partir de cereales no tradicionales.

RECOMENDACIONES

- Es aconsejable realizar investigaciones adicionales sobre la influencia del proceso de envejecimiento, evaluando diferentes tipos de barricas (roble americano, roble francés u otras maderas alternativas), los tiempos de maduración y las condiciones ambientales, con el propósito de mejorar el perfil aromático, el color y la complejidad del destilado obtenido a partir de sorgo y maíz germinado.

- Se sugiere analizar con mayor profundidad las variables fisicoquímicas del destilado, tales como pH, contenido alcohólico, compuestos volátiles y la presencia de congéneres, para establecer parámetros técnicos que permitan estandarizar el proceso productivo y garantizar la calidad del whisky de grano sin gluten tanto a nivel artesanal como industrial.

- Se recomienda promover estudios y proyectos orientados al fomento del cultivo de sorgo en Panamá, para evaluar su adaptación agronómica, rendimiento y calidad como materia prima para la elaboración de destilados, con el fin de reducir la dependencia de las importaciones y fortalecer la disponibilidad local del cereal.

- Se recomienda evaluar el impacto económico y logístico de la producción local limitada de sorgo, analizando los costos de importación, almacenamiento y estandarización de la materia prima, con el propósito de

determinar la viabilidad comercial del whisky de grano sin gluten elaborado en Panamá.

- Finalmente, se recomienda fomentar la investigación aplicada y la transferencia tecnológica en el uso del sorgo como cereal alternativo, promoviendo su valorización en la agroindustria panameña y fortaleciendo el desarrollo de destilados innovadores y diferenciados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✦ Azzi, M. (2016). Brewing Science and

Practice. *www.academia.edu*. Recuperado de

https://www.academia.edu/28754093/Brewing_Science_and_practice

- ✦ Awika, J. M., & Rooney, L. W. (2004). Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. *Phytochemistry*, 65(9), 1199–1221.

Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2004.04.001>

- ✦ Balat, M., Balat, H., & Öz, C. (2008). Progress in bioethanol processing. *Progress In Energy And Combustion Science*, 34(5), 551–573. Recuperado de

<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.11.001>

- ✦ Barrel Global. (s. f.). Recuperado de <https://www.barrelglobal.com/blogposts-es/como-se-hace-el-whisky-una-guia-del-proceso-de-destilacin>

- ✦ Beef Central. (2016, 26 octubre). USQ research shows sorghum in diet can improve liver health. Grain Central. Recuperado de

<https://www.graincentral.com/news/usq-research-shows-sorghum-in-dietcan-improve-liver-health/>

✦

Client challenge. (s. f.-b). Recuperado de
<https://es.scribd.com/document/621114886/Composicion-quimica-del-maiz>

✦ Client challenge. (s. f.).
<https://es.scribd.com/document/478678070/CerealGrains-Properties-Processing-and-Nutritional-Attributes-2010-pdf> Client
 challenge. (s. f.). Recuperado
 de <https://es.scribd.com/document/478678070/Cereal-Grains-Properties-Processing-and-Nutritional-Attributes-2010-pdf>

✦ Colaboradores de Wikipedia. (2025, 10 diciembre). *Whisky*. Wikipedia, la
 Enciclopedia Libre. Recuperado
 de <https://es.wikipedia.org/wiki/Whisky#:~:text=El%20proceso%20de%20destilaci%C3%B3n%20se,que%20se%20le%20llama%20wort>.

✦ Colaboradores de Wikipedia. (2025a, agosto 31). *Destilación*. Wikipedia, la
 Enciclopedia Libre. Recuperado de
<https://es.wikipedia.org/wiki/Destilaci%C3%B3n>

✦

✦ Conabio. (s. f.). *Maíces | Biodiversidad mexicana*. Biodiversidad Mexicana.

Recuperado

de

<https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices>

Constanza, L. o. N., Tique, M. M., & Del Socorro, P. L. L. (s. f.).

*Contribución al estudio del sorgo (Sorghum bicolor (L.) Moench) para nutrición**humana*. Recuperado

de

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-41082011000100004

✦ Daute, M., Jack, F., Harrison, B., & Walker, G. (2021). Experimental Whisky

Fermentations: Influence of Wort Pretreatments. *Foods*, 10(11), 2755.Recuperado de <https://doi.org/10.3390/foods10112755>✦ De México, F. (2021, 22 julio). *Tratamiento a semilla de Maíz con**Bioestimulantes de Alta Tecnología*. El Blog de Fagro. Artículos y Noticias

Sobre

Agricultura.

Recuperado

- ✦ de <https://blogdefagro.com/informacion/tratamiento-a-semilla-de-maiz-conbioestimulantes-de-alta-tecnologia/>

- ✦ Feyera, M. (2021). Overview of Malting and Fermentation Role in Sorghum Flour, Primarily for Antinutrient Reduction. [www-jscimedcentralcom.translate.goog](http://www.jscimedcentral.com.translate.googleusercontent.com/Recuperado%20de%20https://doi.org/10.47739/2333-6706/1138). Recuperado de <https://doi.org/10.47739/2333-6706/1138>

- Gallardo, I., Boffill, Y., Ozuna, Y., Gómez, O., Pérez, M., Saucedo, O. (2011). Producción de bebidas usando sorgo malteado como materia prima para enfermos celíacos. Recuperado de <https://www.executivebs.org/publishing.cl/aci/2013/Vol1/Nro1/6-ACI1138-11-full.pdf>

- ✦ Liesch, S. (2024, 11 marzo). La bioquímica del malteado: una descripción completa. [Bräu Supply](https://brausupply.com/es/blogs/learn-to-brew/the-biochemistry-of-malting-a-comprehensiveoverview#:~:text=Este%20proceso%20no%20solo%20activ). Recuperado de <https://brausupply.com/es/blogs/learn-to-brew/the-biochemistry-of-malting-a-comprehensiveoverview#:~:text=Este%20proceso%20no%20solo%20activ>



a%20las%20en

zimas%2C,el%20proceso%20de%20elaboraci%C3%B3n%20de%20la%20

cerveza



Life, Z. P. F. D. (2025, 7 junio). *Mercado de bebidas alcohólicas sin gluten superará los \$12,000 millones para 2033*. El Vocero de Puerto Rico. Recuperado de https://www.elvocero.com/actualidad/mercado-debebidas-alcoh-licas-sin-gluten-superar-los-12-000-millones-para-2033/article_4f26cebb-03be-4a19-803bca7aed91f7e6.html#:~:text=Se%20espera%20que%20el%20mercado%20g

[lobal%20de,los%20procesos%20de%20producci%C3%B3n%20para%20determinar%20qu%C3%A9](#)

- ✦ Los Procesos de Germinación y Emergencia en el Cultivo de Maíz | Intagri S.C. (s. f.). Recuperado de <https://www.intagri.com/articulos/cereales/procesos-de-germinacion-yemergencia-en-el-cultivo-de-maiz>

- ✦ O'Rourke, T. (2020, 14 de diciembre). ConEspuma | Elaboración casera de cerveza de sorgo - Cerveza Africana. ConEspuma. Recuperado de <https://conespuma.com/blog/2020/12/10/elaboracin-casera-de-cerveza-desorgo-cerveza-africana>

- ✦ Pérez-Sánchez, A., Alfonso-Fernández, H. M., Aragón-Fontes, J. C., BaltáGarcía, J. G., & Benítez-Cortés, I. (2019). *Estudio preliminar del proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132 a escala de laboratorio.* Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/674/67459697004/html/>

- ✦ Ramos, V. (2025, 5 de junio). Glosario de whisky: Maduración. *Whisky México*. Recuperado de <https://www.whiskymx.com/post/glosario->

[dewhiskymaduracion#:~:text=La%20maduraci%C3%B3n%20es%20el%20proceso%20mediante%20el,la%20interacci%C3%B3n%20entre%20el%20l%C3%ADquido%20y%20la](#)

- ✦ Rodríguez, L. (2005). Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo. Recuperado de <https://dspace.uclv.edu.cu/server/api/core/bitstreams/dfa110c5-cabd-4267a8bc-1c5b3b43c84d/content>

- ✦ Ruiz, M., Bernal, G., & Giraldo, P. (2018). An update of low molecular weight glutenin subunits in durum wheat relevant to breeding for quality. *Journal Of Cereal Science*, 83, 236–244. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.09.00>

- ✦ Ruiz-Medina, A., & Córdova, M. L. F. (2014). Aflatoxin B1 in Beer at Different Stages of Production. In Elsevier eBooks (pp. 517–523). Recuperado de <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-404699-3.00062-7>

- ✦ Sorghum and millets in human nutrition. (s. f.). Recuperado de <https://www.fao.org/4/t0818e/t0818e01.htm>

- ✦ Taylor, J. R., Schober, T. J., & Bean, S. R. (2006). Novel food and non-food uses for sorghum and millets. *Journal Of Cereal Science*, 44(3), 252– 271.
Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.06.009>

- ✦ Xubuli. (2024, 20 mayo). Guía paso a paso para elaborar whisky. *ACE STILLS*. Recuperado de <https://es.cestills.com/blog/guia-paso-a-pasopara-elaborarwhisky/#:~:text=Control%20de%20la%20fermentaci%C3%B3n%20La%20fermentaci%C3%B3n%20debe,el%20aguardiente%20est%C3%A1%20listo%20para%20la%20destilaci%C3%B3n.>

ANEXOS

Anexo A. Desarrollo de las pruebas experimentales del destilado

Prueba experimental 1

Se trabaja con un volumen base de 10 litros de mosto, dividiendo el experimento en tres pruebas experimentales a escala piloto,

La primera prueba experimental se desarrolló manteniendo una proporción constante y estable de sorgo blanco, sorgo rojo malteado y maíz germinado, con el objetivo de establecer una línea base del proceso y evaluar el comportamiento inicial del sistema fermentativo y de destilación. El proceso de malteado se realizó durante 2 a 3 días, tiempo suficiente para activar las enzimas amilolíticas necesarias para convertir el almidón en azúcares fermentables, sin provocar un desarrollo excesivo del brote. Posteriormente, los granos fueron sometidos a una molienda gruesa, con el fin de preservar la integridad parcial del endospermo y facilitar una correcta filtración durante la maceración.

La fermentación alcohólica se llevó a cabo durante 5 días en condiciones controladas, con el fin de lograr un equilibrio entre el rendimiento alcohólico y la estabilidad microbiológica del mosto. Finalmente, la destilación se efectuó durante aproximadamente 3 horas mediante destilación fraccionada, priorizando la obtención de un destilado limpio y estable. Esta prueba permitió obtener un perfil sensorial base, caracterizado por una expresión primaria de cereal y una integración

alcohólica moderada, que sirvió como punto de comparación para las pruebas posteriores.

Tabla 1. Prueba experimental 1

Etapa del proceso	Materia prima / Insumo	Cantidad	Tiempo	Temperatura	Descripción del proceso
Selección y limpieza	Sorgo blanco	1 kg	30 min	Ambiente	Limpieza manual y eliminación de impurezas
Malteado	Sorgo rojo	1 kg	2-3 días	18–22 °C	Remojo, germinación y secado
Germinación	Maíz	1.5 kg	3 días	20–25 °C	Activación enzimática
Molienda	Cereales tratados	Total 3.5 kg	20 min	Ambiente	Molienda gruesa
Maceración	Mezcla de cereales + agua	13.5 L	90 min	62–68 °C	Conversión de almidones en azúcares
Enfriado	Mosto	—	100 min	20–25 °C	Preparación para fermentación
Fermentación	Mosto + levadura	—	5 días	22–28 °C	Producción de alcohol
Destilación	Wash fermentado	—	3 h	78–95 °C	Alcohol bruto
Destilado final	Corazón	—			Whisky Estructurado

Fuente: Elaboración Propia. Datos recopilados en Excel.

Prueba experimental 2

La segunda prueba experimental se diseñó modificando la cantidad total de materia prima, reduciendo de manera equilibrada las proporciones de sorgo rojo, sorgo blanco y maíz germinado, con el propósito de diferenciar los perfiles sensoriales y técnicos obtenidos en la primera prueba y evaluar el impacto de una menor carga de sólidos sobre el proceso de fermentación y destilación. En esta prueba, el tiempo de malteado se extendió hasta 5 días, lo que favoreció un mayor desarrollo enzimático y una mayor disponibilidad de azúcares fermentables. La molienda aplicada fue de granulometría media, lo que permitió una mayor exposición del almidón durante la maceración e incrementó la eficiencia de extracción. La fermentación se prolongó durante 7 días, lo que permitió una conversión más completa de los azúcares en alcohol, así como una mayor formación de compuestos secundarios responsables del aroma y del sabor del destilado. La destilación se mantuvo durante aproximadamente 3 horas, siguiendo el mismo esquema de separación de fracciones. Como resultado, esta prueba mostró un destilado con mayor complejidad aromática y una estructura más definida, lo que evidencia la influencia del tiempo de fermentación y del grado de malteado sobre el perfil final del whisky de grano.

Tabla 2. *Prueba experimental 2*

Etapas del proceso	Materia prima Insumo	Cantidad	Tiempo	Temperatura	Descripción del proceso
Selección y limpieza	Sorgo blanco	1.5 kg	30 min	Ambiente	Preparación del cereal
Malteado	Sorgo rojo	0.500 kg	7 días	18–22 °C	Mayor desarrollo enzimático
Germinación	Maíz	1.5 kg	7 días	22–25 °C	Incremento de azúcares
Molienda	Cereales tratados	Total 3 kg	20 min	Ambiente	Molienda media
Maceración	Mezcla agua +	13 L	100 min	64–70 °C	Mayor extracción
Enfriado	Mosto	—	100 min	20–25 °C	Estabilización
Fermentación	Mosto levadura +	—	5-7 días	22–26 °C	Perfil aromático más complejo
Destilación	Wash fermentado	—	3 h	78–95 °C	Alcohol bruto
Destilado final	Corazón	—			Whisky Estructurado

Fuente: Elaboración Propia. Datos recopilados en Excel.

Prueba experimental 3

La tercera prueba experimental se realizó manteniendo la misma proporción de materias primas que en las pruebas anteriores, pero variando de manera controlada las condiciones de temperatura, tiempo de malteado y duración de la fermentación, con el objetivo de evaluar la influencia directa de estas variables de proceso en la elaboración del whisky de grano sin gluten y en las características fisicoquímicas y sensoriales del destilado final. El malteado se ajustó a las condiciones térmicas para optimizar la actividad enzimática sin generar compuestos indeseables. La fermentación se mantuvo durante 7 días, lo que favoreció el desarrollo de un perfil fermentativo más complejo y una mejor integración alcohólica. Esta prueba permitió analizar cómo las variaciones en las condiciones operativas afectan la eficiencia del proceso, el rendimiento alcohólico y la expresión sensorial del destilado, lo que constituyó una evaluación integral del comportamiento del sistema productivo.

Durante la destilación artesanal, se realizó un control cuidadoso de los cortes de cabeza, corazón y cola, priorizando la obtención de un destilado más limpio y equilibrado. Este control influyó directamente en la reducción de compuestos volátiles indeseables, lo que se reflejó en una mejor percepción de suavidad en boca y una menor sensación de ardor alcohólico en comparación con las pruebas anteriores.

Tabla 3. Prueba experimental 3

Etapas del proceso	Materia prima / Insumo	Cantidad	Tiempo	Temperatura	Descripción del proceso
---------------------------	-------------------------------	-----------------	---------------	--------------------	--------------------------------

Selección y limpieza	Sorgo blanco	1.5 kg	30 min	Ambiente	Limpieza y selección
Malteado	Sorgo rojo	0.500 kg	5 días	18–22 °C	Malteado estándar
Germinación	Maíz	1.5 kg	4–5 días	22–25 °C	Mayor dulzor
Molienda	Cereales tratados	Total 3 kg	20 min	Ambiente	Molienda media
Maceración	Mezcla + agua	13 L	90 min	62–66 °C	Favorece dulzor
Enfriado	Mosto	—	100 min	20–25 °C	Preparación
Fermentación	Mosto + levadura	—	5–7 días	24–28 °C	Fermentación activa
Destilación	Wash fermentado	—	2 h	78–95 °C	Alcohol bruto
Destilado final	Corazón	—			Whisky Estructurado

Fuente: Elaboración Propia. Datos recopilados en Excel.

Anexo B. Procedimiento metodológico de la elaboración del destilado

El procedimiento metodológico de la presente investigación se desarrolló de manera secuencial y controlada, con el fin de garantizar la validez técnica y la

confiabilidad de los resultados obtenidos durante la elaboración y la evaluación del whisky de grano sin gluten a base de sorgo blanco, sorgo rojo malteado y maíz germinado.

Anexo C. Selección y acondicionamiento de las materias primas

En primera instancia, se seleccionaron las materias primas, verificando su calidad física, su estado sanitario y su ausencia de gluten. Se utilizaron granos de sorgo blanco y sorgo rojo (*Sorghum bicolor*), así como de maíz (*Zea mays*), que se limpiaron para eliminar impurezas, polvo y cuerpos extraños. Posteriormente, los granos fueron acondicionados mediante lavado y secado previos, preparándolos para los procesos de malteado y germinación.

Figura 8.

Materia prima seleccionada. Granos de maíz, sorgo blanco y sorgo rojo.



Nota: Fotografía tomada por el autor.

Figura 9.

Materia prima limpia, sin impurezas, polvos ni cuerpos extraños. Granos de sorgo rojo, sorgo blanco y maíz.



Nota: Fotografía tomada por el autor.

Anexo D. Proceso de malteado del sorgo

El malteado del sorgo blanco y del sorgo rojo se llevó a cabo mediante las etapas de remojo, germinación y secado (kilning):

- El remojo se realizó hasta alcanzar el nivel de humedad adecuado para iniciar la germinación.
- La germinación se mantuvo durante períodos variables según cada prueba experimental (entre 2 y 5 días), controlando la temperatura y la humedad.
- El secado se efectuó a temperaturas controladas para detener la germinación y preservar la actividad enzimática.

Una vez finalizado el malteado, los granos se enfriaron y se almacenaron temporalmente para su uso.

Figura 10.

Ejemplo de remojo (maíz).



Nota: Fotografía tomada por el autor.

Anexo E. Germinación del maíz

El maíz fue sometido a un proceso de germinación controlada, iniciado con remojo y posterior incubación en condiciones adecuadas de humedad y temperatura. El proceso se mantuvo durante el tiempo establecido para cada prueba experimental hasta observar el desarrollo del brote, momento en el que se procedió al secado para detener la actividad germinativa. Este proceso permitió activar enzimas endógenas, lo que favoreció la disponibilidad de azúcares fermentables.

Figura 11.

Ejemplo de germinación (maíz).



Nota: Fotografía tomada por el autor.

Anexo F. Molienda de los cereales

Los cereales malteados y el maíz germinado fueron sometidos a molienda, variando la granulometría (gruesa y media) según el diseño experimental de cada prueba. La molienda se realizó con el objetivo de facilitar la liberación del almidón durante la maceración, sin generar harinas excesivamente finas que dificultaran la filtración del mosto.

Figura 12.

Secado de los granos (sorgo blanco y sorgo rojo).



Nota: Fotografía tomada por el autor.

Figura 13.

Molienda de cereales (sorgo blanco).



Nota: Fotografía tomada por el autor.

Maceración

La maceración se llevó a cabo mezclando los cereales molidos con agua potable, según las proporciones previamente establecidas. El proceso se realizó bajo control de temperatura y tiempo, lo que permitió que las enzimas amilolíticas convirtieran el almidón en azúcares fermentables. Una vez finalizada la maceración, el mosto obtenido se filtró y se enfrió hasta alcanzar la temperatura adecuada para la fermentación.

Figura 14.

Maceración de los granos (sorgo blanco y sorgo rojo con maíz).



Nota: Fotografía tomada por el autor.

Anexo F. Fermentación alcohólica

El mosto fue transferido a recipientes de fermentación previamente sanitizados. Se adicionó la levadura seleccionada e inició la fermentación alcohólica, la cual se desarrolló durante 5 a 7 días, según la prueba experimental. Durante esta etapa se controlaron parámetros como la temperatura, el tiempo y la actividad fermentativa y se registraron observaciones relevantes para el análisis del proceso.

Figura 15.

Proceso de fermentación.



Nota: Fotografía tomada por el autor.

Anexo G. Destilación

Finalizada la fermentación, el mosto fermentado fue sometido a destilación en un alambique de acero inoxidable. La destilación se realizó durante aproximadamente 3 horas, separando las fracciones de cabeza, corazón y cola, priorizando la obtención del corazón del destilado. El destilado obtenido fue recolectado, medido y almacenado en recipientes adecuados para su posterior evaluación.

Figura 16.

Proceso de destilación.



Nota: Fotografía tomada por el autor.

Anexo F. Evaluación fisicoquímica básica

El destilado final fue sometido a una evaluación fisicoquímica básica, registrándose parámetros como la graduación alcohólica, la claridad y la estabilidad visual, con el fin de verificar la calidad del producto obtenido.

Anexo G. Evaluación sensorial

Se aplicó una evaluación sensorial mediante una encuesta estructurada, utilizando una escala hedónica de 9 puntos. La evaluación fue realizada por un panel de 25 personas, con edades entre 20 y 55 años, seleccionadas mediante muestreo no probabilístico. Cada participante evaluó tres muestras codificadas, correspondientes a las pruebas experimentales, y calificó atributos como aroma, sabor, suavidad, equilibrio y aceptación general.

Anexo F. Registro y análisis de datos

Los datos obtenidos durante el proceso de elaboración y evaluación sensorial se registraron en fichas técnicas y tablas comparativas. Posteriormente, se realizó un análisis descriptivo de los resultados, lo que permitió comparar las diferentes pruebas experimentales.

Anexo G. Consideraciones éticas y técnicas

La investigación se desarrolló con fines exclusivamente académicos, garantizando la confidencialidad de los participantes y el uso responsable de los resultados. El destilado elaborado se utilizó únicamente para la evaluación técnica y sensorial.

ANEXO H. Resultados de la elaboración del whisky de grano artesanal sin gluten

Limpieza y pureza del destilado

En las tres pruebas experimentales, el proceso de destilación permitió obtener un destilado con adecuada limpieza alcohólica, evidenciada por la reducción de compuestos indeseables como alcoholes superiores y notas solventes, especialmente tras la correcta separación de las fracciones de cabezas, corazones y colas:

Prueba 1. Destilado limpio, con ligera presencia de notas cerealosas crudas al inicio.

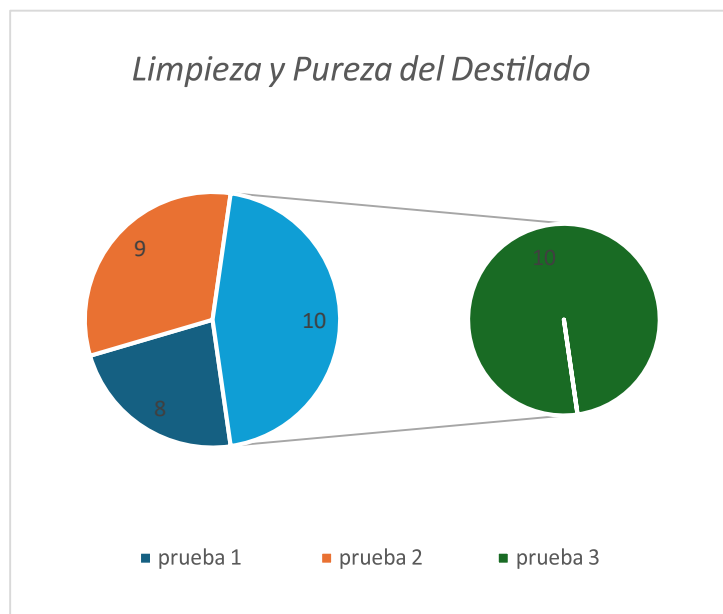
Prueba 2. Mayor limpieza sensorial, atribuida al incremento del sorgo malteado, lo que favoreció una mejor fermentación y un perfil alcohólico más estable.

Prueba 3. Destilado suave y redondeado, con mínima percepción de aspereza, resultado del mayor aporte de limpieza mediante una maceración orientada al dulzor.

Resultado general. La combinación de sorgo blanco, sorgo rojo malteado y maíz germinado favoreció un destilado transparente, estable y libre de turbidez, lo que indica un proceso controlado y eficiente.

En la escala de control de limpieza y pureza del destilado, manejamos valores del 1 al 10, lo cual se refleja en el siguiente gráfico.

Grafica 1. *Limpieza y pureza del destilado*



Fuente: Elaboración Propia. Datos recopilados en Excel.

Color del destilado

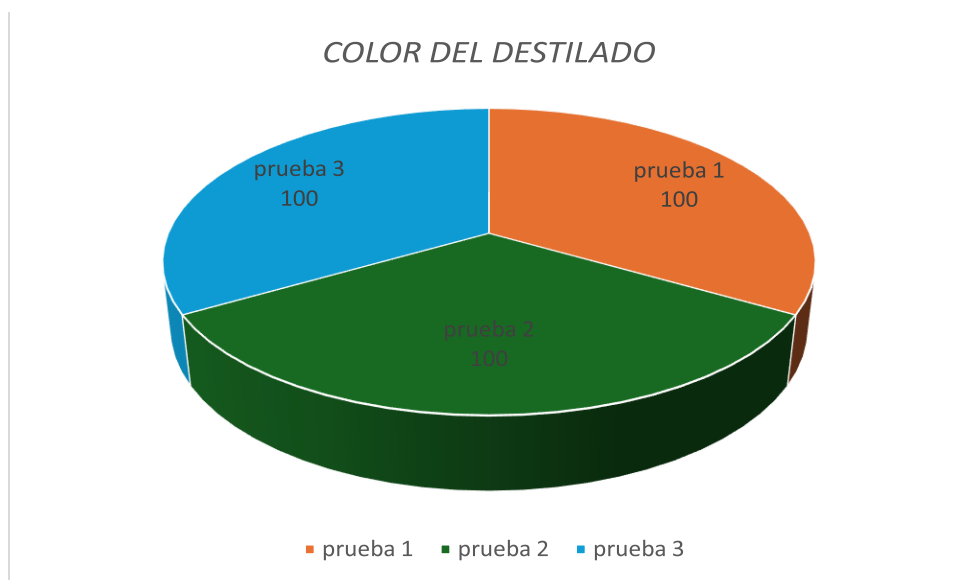
Dado que el destilado obtenido corresponde a un whisky joven (new make spirit) sin envejecimiento en barrica, el color observado en las tres pruebas fue:

- Transparente y cristalino, sin partículas en suspensión.
- Ausencia de tonalidades amarillas o ámbar, lo que confirma que el color no proviene de procesos de oxidación ni de residuos sólidos.

Este resultado es consistente con los destilados de grano recién obtenidos y permite evaluar con mayor precisión las características aromáticas y gustativas, sin interferencias cromáticas.

Tomando en cuenta los resultados del destilado del whisky, se evaluó un 100% de cristalinidad, sin impurezas detectables, en las 3 pruebas realizadas.

Grafica 2. *Color del destilado*



Fuente: Elaboración Propia. Datos recopilados en Excel.

Olor (perfil aromático)

Prueba 1. Aromas primarios a cereal fresco, con notas suaves de sorgo. Presencia leve de alcohol joven y baja complejidad aromática.

Prueba 2. Aromas más definidos y complejos. Notas de grano tostado, panificación ligera y frutos secos. Mejor integración alcohólica.

Prueba 3. Aromas dulces y redondeados. Notas de maíz dulce, miel ligera y vainilla tenue. Perfil aromático más accesible y equilibrado.

Resultado comparativo. El sorgo rojo malteado aportó estructura aromática, mientras que el maíz germinado suavizó y armonizó el perfil olfativo del destilado.

Sabor (perfil gustativo)

Prueba 1. Entrada seca y neutra. Dominancia de las notas de cereal. Final corto

Prueba 2. Mayor cuerpo en boca. Notas de grano tostado y de leve especiado. Final medio, más persistente.

Prueba 3. Entrada dulce y suave. Sensación cremosa. Final largo, redondeado y equilibrado.

Resultado general. El equilibrio entre sorgo blanco (neutralidad), sorgo rojo malteado (estructura) y maíz germinado (dulzor) generó un whisky de grano con un perfil sensorial armónico y distintivo.

Sensación en boca (textura y cuerpo)

Prueba 1. Cuerpo ligero, alcohol perceptible.

Prueba 2. Cuerpo medio, mejor integración.

Prueba 3. Cuerpo medio-alto, de textura suave y sedosa.

La mayor concentración de azúcares fermentables provenientes del maíz germinado y del sorgo malteado influyó positivamente en la sensación de redondez y suavidad.

Características físicas del destilado en general

Tabla 4. *Características físicas del destilado en general*

Parámetro	Resultado
Apariencia	Transparente, brillante
Turbidez	No observable
Volatilidad alcohólica	Alta, acorde a destilado joven
Estabilidad	Adecuada a temperatura ambiente

Densidad aparente	Típica destilado alcohólico	de
----------------------	-----------------------------------	----

Evaluación global de las características organolépticas del destilado

Tabla 5. *Características organolépticas del destilado*

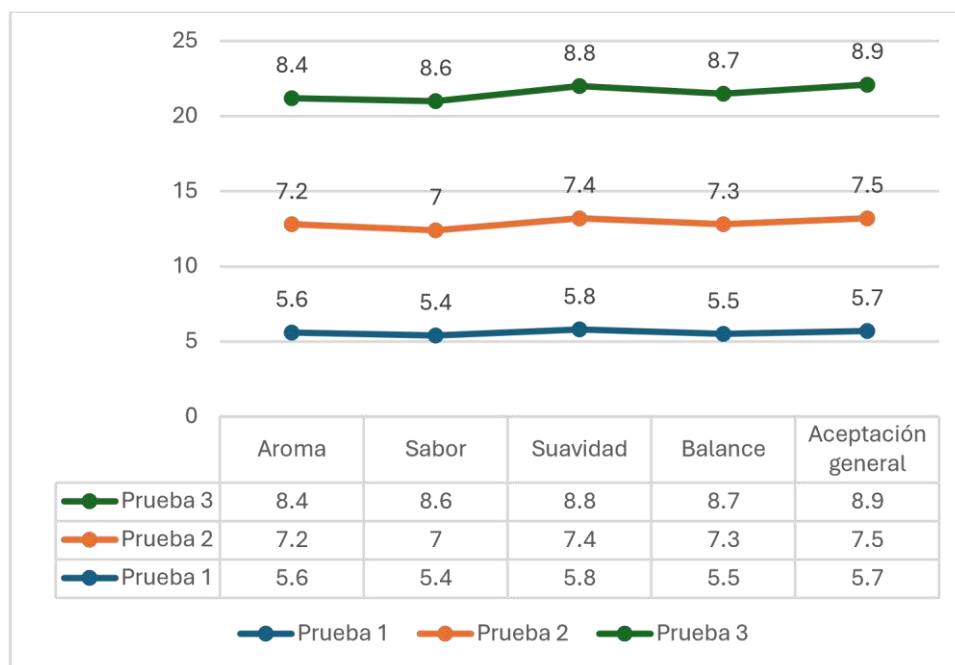
Atributo	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Limpieza	Buena	Muy buena	Excelente
Complejidad	Baja	Media	Media-alta
Dulzor	Bajo	Medio	Alto
Suavidad	Media	Alta	Muy alta
Balance	Aceptable	Bueno	Excelente

Fuente: Elaboración Propia. Datos recopilados en Excel.

Diseño de la encuesta sensorial

El tipo de encuesta aplicada es una encuesta sensorial estructurada, de tipo descriptivo-evaluativo, que utiliza una escala hedónica de 9 puntos, ampliamente aceptada en estudios sobre alimentos y bebidas.

Grafica 3. *Evaluación sensorial promedio (escala 1–9)*

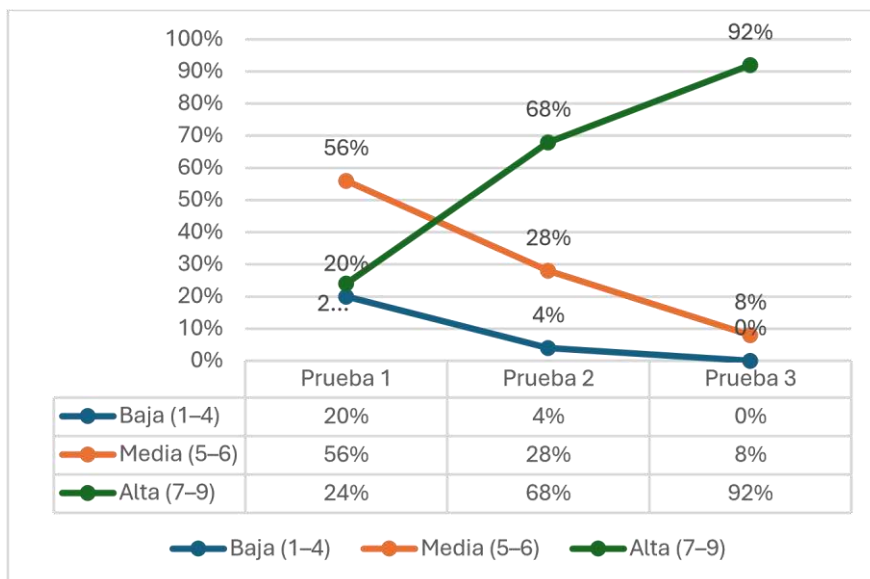


Fuente: Elaboración Propia. Datos recopilados en Excel.

La gráfica presenta los resultados de la evaluación sensorial y refleja una mejora progresiva en todos los parámetros sensoriales desde la Prueba 1 hasta la Prueba 3. Estos resultados evidencian la influencia positiva de los ajustes realizados en las condiciones de proceso y en la formulación de las materias primas sobre la calidad sensorial del destilado final.

Distribución de aceptación global

Grafica 4. Nivel de aceptación (% de participantes)

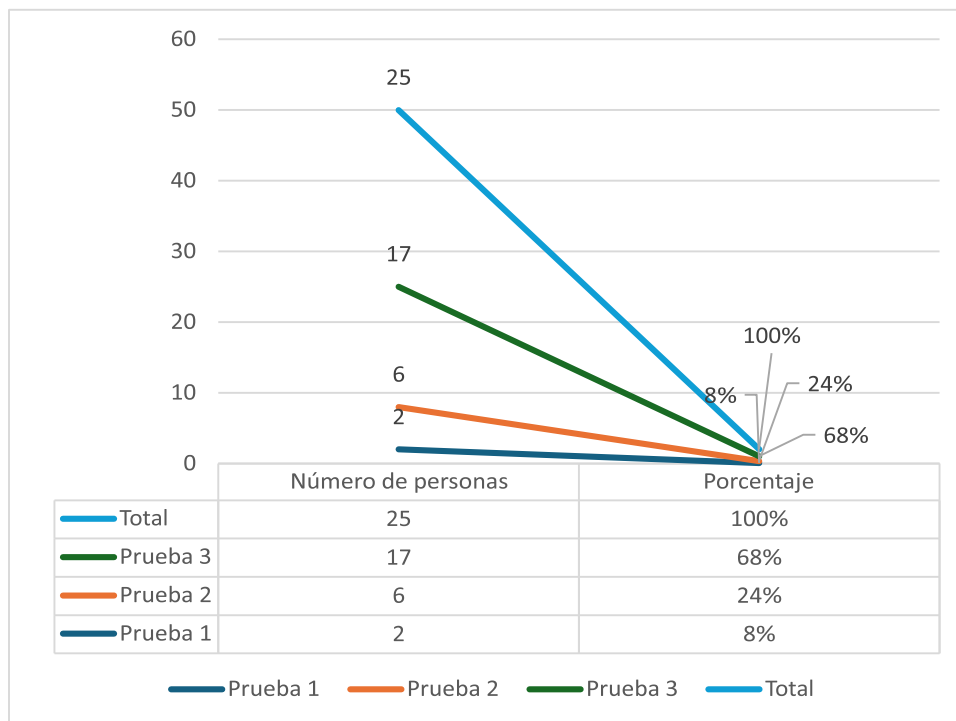


Fuente: Elaboración Propia. Datos recopilados en Excel.

La gráfica muestra el nivel de aceptación de los participantes en la evaluación sensorial de las tres pruebas, clasificadas en rangos de valoración en %. En la Prueba 1, predominó una aceptación media (56 %). En la Prueba 2, se observa un incremento significativo en la aceptación alta (68 %). Finalmente, la Prueba 3 alcanzó el mayor nivel de aceptación, con un 92 % de valoraciones positivas, lo que refleja una respuesta muy favorable por parte de los participantes. Estos resultados confirman que los ajustes realizados en la formulación y en las condiciones del proceso productivo influyeron de manera directa y favorable en la aceptación general del whisky de grano elaborado.

Preferencia general del destilado

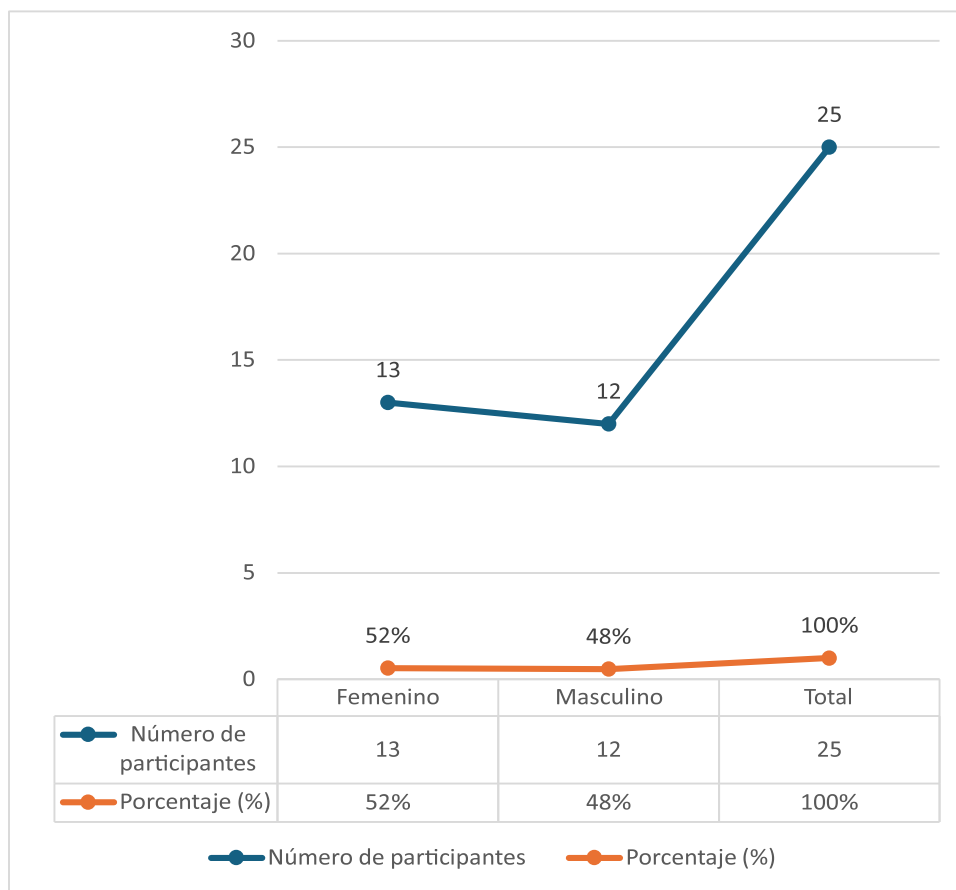
Grafica 5. Preferencia del consumidor



Fuente: Elaboración Propia. Datos recopilados en Excel.

La gráfica muestra la preferencia del consumidor entre las tres pruebas evaluadas. Del total de 25 participantes (100 %), la Prueba 3 fue la más preferida, con 17 personas (68 %), lo que evidencia una clara inclinación por esta formulación. En segundo lugar, la Prueba 2 obtuvo 6 preferencias (24 %), mientras que la Prueba 1 presentó la menor aceptación, con solo 2 preferencias (8 %). Estos resultados confirman que la Prueba 3 reúne las características sensoriales más valoradas por los consumidores, lo que la consolida como la opción con mayor potencial de aceptación en el mercado.

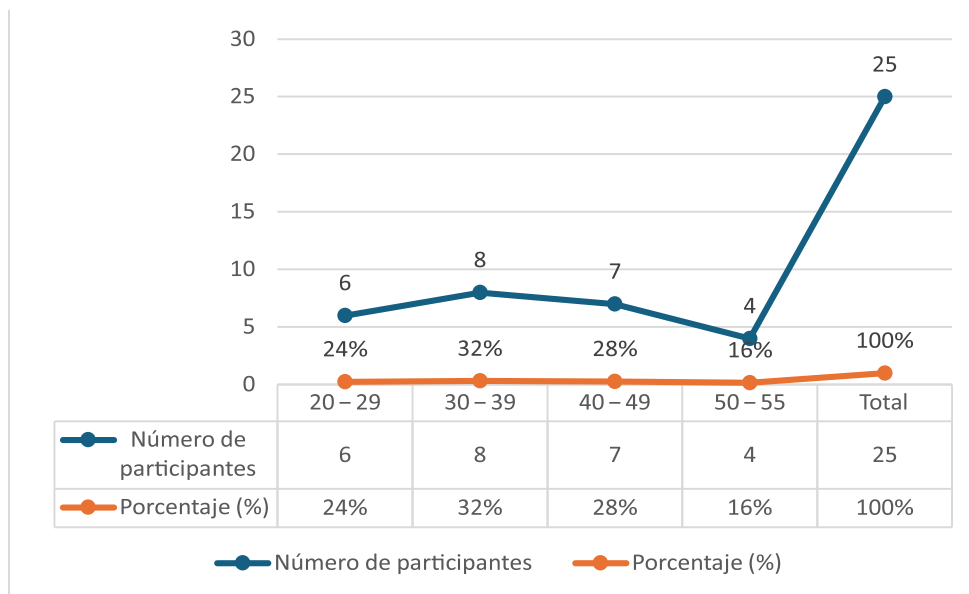
Caracterización demográfica de los encuestados

Grafica 6. *Distribución de los encuestados por sexo*

Fuente: Elaboración Propia. Datos recopilados en Excel.

La muestra presentó una distribución equilibrada por sexo, lo que permitió obtener percepciones sensoriales diversas y reducir los sesgos de género en la evaluación del destilado.

Grafica 7. *Distribución de los encuestados según el rango de edad*



Fuente: Elaboración Propia. Datos recopilados en Excel. La mayor concentración de participantes se ubicó entre los 30 y 49 años, rango etario que corresponde a consumidores con mayor experiencia y criterio en la evaluación de bebidas destiladas, lo que aporta mayor validez sensorial a los resultados obtenidos.

ANEXO

I. **Alambique de Olla.** El alambique de olla es un equipo tradicional de destilación ampliamente utilizado en la producción artesanal de destilados, incluido el whisky de grano. Su función principal es separar y concentrar el alcohol y los compuestos aromáticos presentes en el mosto fermentado, mediante la aplicación controlada de calor.



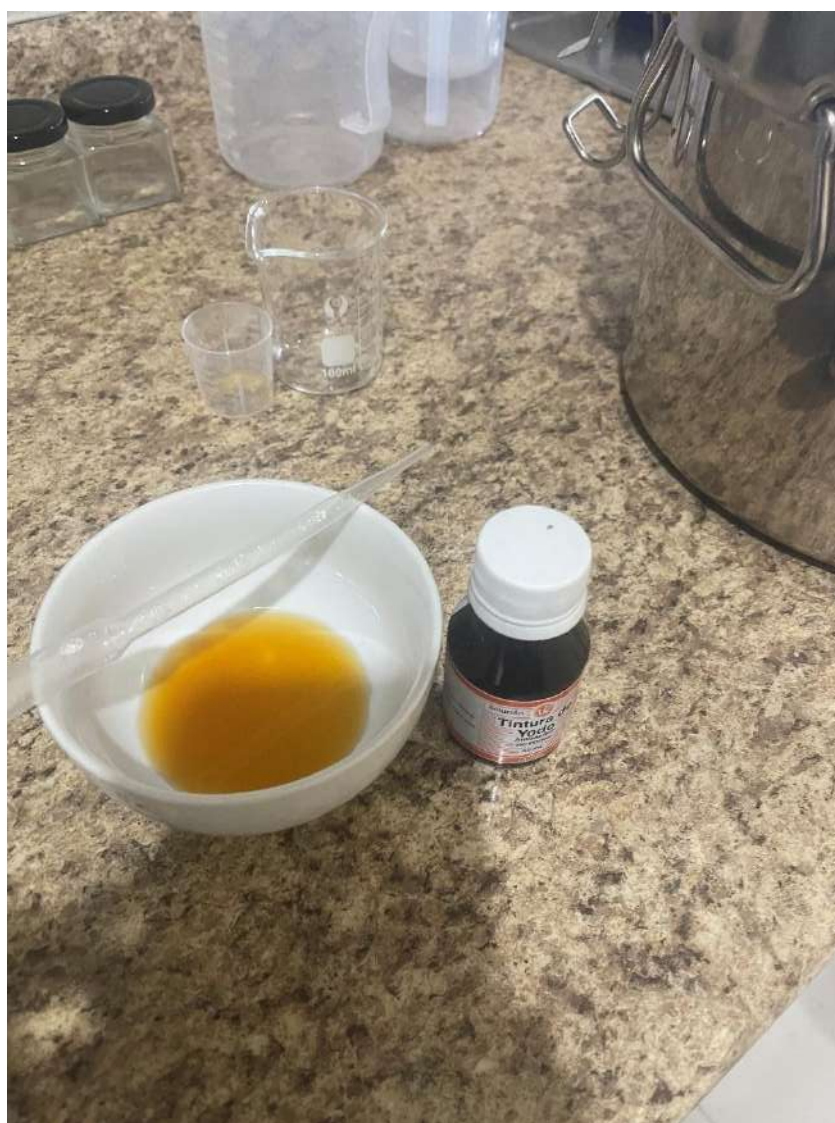
ANEXO

J. Fermentador. Recipiente destinado a la fermentación alcohólica, en el que los azúcares fermentables del mosto son transformados en alcohol etílico y dióxido de carbono por la acción de las levaduras.



ANEXO

K. Prueba de yodo. El yodo reacciona con el almidón formando un complejo de color azul oscuro o negro. Cuando el almidón ha sido correctamente hidrolizado por la acción de enzimas (principalmente α - y β -amilasa), el yodo no produce cambio de color, manteniéndose amarillo o marrón claro.



ANEXO

L. Balanza. Instrumento de medición utilizado para determinar el peso de las materias primas y de los aditivos empleados en el proceso de elaboración del whisky de grano.



ANEXO

M. Gramera. Instrumento de pesaje de alta precisión, utilizado principalmente para medir pequeñas cantidades de insumos. Medir con exactitud la dosificación de levaduras, enzimas o nutrientes.



ANEXO

N. Alcoholímetro. Instrumento utilizado para medir la graduación alcohólica de líquidos que contienen alcohol etílico. Determinar el porcentaje de alcohol del destilado obtenido. Controlar el grado alcohólico durante los cortes de destilación y verificar la uniformidad del producto final antes de su posible envejecimiento.



ANEXO

Ñ. Refractómetro. Instrumento óptico utilizado para medir el índice de refracción de un líquido, que se relaciona directamente con la concentración de sólidos solubles, principalmente azúcares fermentables, expresada en grados Brix ($^{\circ}\text{Bx}$).



ANEXO O. Molino. Equipo mecánico destinado a la reducción de tamaño de los granos utilizados como materia prima.



ANEXO P. Densímetro. Instrumento utilizado para medir la densidad o la gravedad específica de un líquido. Determinar el contenido inicial de azúcares fermentables del mosto. Monitorear la disminución de la densidad durante la fermentación.



ANEXO Q. pH metro. Equipo analítico que permite medir el potencial de hidrógeno (pH) del mosto y del fermentado, garantizando condiciones óptimas para la actividad enzimática y fermentativa. Y prevenir contaminaciones microbiológicas indeseables.



ANEXO R. Termómetro. Instrumento de medición utilizado para controlar la temperatura en las distintas etapas del proceso. Monitorear la temperatura de maceración para asegurar una actividad enzimática adecuada. Controlar la temperatura durante la fermentación para evitar el estrés de la levadura.

