



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS CÓRDOBA**

**Postgrado en innovación agroalimentaria sustentable**

**ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ATERRONAMIENTO DE AZÚCAR  
REFINADO A TRAVÉS DEL MODELO CAUSAL**

**ING. MARÍA DE LOURDES HERNÁNDEZ REYES**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRA EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN AGROALIMENTARIA SUSTENTABLE**

**AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ, MÉXICO**

**2021**


ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ATERRONAMIENTO DE AZÚCAR  
REFINADO A TRAVÉS DEL MODELO CAUSAL

La presente tesis, titulada: **ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ATERRONAMIENTO DE AZÚCAR REFINADO A TRAVÉS DEL MODELO CAUSAL**, realizada por la alumna: **MARÍA DE LOURDES HERNÁNDEZ REYES**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA(O) EN CIENCIAS

INNOVACIÓN AGROALIMENTARIA SUSTENTABLE

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:   
Dr. Juan Valente Hidalgo Contreras

ASESOR:   
Dra. Aleida Selene Hernández Cázares

ASESOR:   
Dr. Juan Pascual Ramírez

Amatlán de los Reyes, Veracruz, México, **abril de 2021.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, quiero dar gracias a Dios por permitirme culminar esta etapa, por la vida y por aquellas personas que me acompañaron a lo largo de estos dos años.

A mis padres Beatriz, Carmen y Manuel por su incondicional apoyo, por confiar en mi cada día y motivarme cuando no me sentía capaz de seguir. A mis hermanos Luis y Erika por su apoyo, mis sobrinos Alexander, Megget y Camila y a mi abuela Amanda.

Quiero agradecer de manera muy especial al Dr. Juan Valente Hidalgo a quien, con su experiencia, paciencia, motivación me oriento en esta investigación, por aceptar ser mi guía durante este tiempo, por la confianza depositada en mí, le agradezco infinitamente sus consejos y el tiempo dedicado.

De igual forma a los miembros del consejo Dra. Aleida Selene Hernández Cazares, Dr. Juan Pascual Ramírez y sinodal el Dr. Héctor Debernardi de la Vequia, por el tiempo que dedicaron a la revisión de este trabajo y sus aportaciones.

A los doctores que en cada clase me compartieron de sus conocimientos.

No podía falta mi mejor amigo el Ing. Martin Clemente Rodríguez, gracias por ayudarme a la distancia, por esos momentos en que me superaba el estrés, pero estabas ahí para sacarme una risa y olvidaba un poco mis responsabilidades. De igual forma a la Lic. Margarita Isabel Ordoñez Giles por su ayuda y consejos. Al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACyT) por el apoyo económico durante mi formación.

En el Colegio de postgraduados conocí a muchas personas, quiero agradecer de forma muy especial a: Edgar, Saira, Lalo, Ale y Ruth. No solo conté con ustedes dentro del colegio, apoyándonos en las clases, también estuvieron en las dificultades personales y cuando más se necesita de los amigos.

Gracias a Meche y Mary por sus platicas amenas al momento de tomar un descanso.

Agradezco al Ing. Francisco Javier Espinoza Déctor por su compañía durante este tiempo, su apoyo moral y afecto.

Y a los miembros de mi familia que siempre confiaron en mí.

## **DEDICATORIA**

A la memoria del señor José Luis Hernández Espinoza, que donde quiera que se encuentre estoy convencida que se encuentra muy feliz de este logro. Sus consejos, valores y enseñanzas siempre están presentes.

# ESTUDIO DEL FENÓMENO DE ATERRONAMIENTO DE AZÚCAR REFINADO A TRAVÉS DEL MODELO CAUSAL

María de Lourdes Hernández Reyes, M.C.

Colegio de postgraduados. 2021

La presente investigación tiene como propósito el estudio del fenómeno de aterronamiento de azúcar refinado de caña a través de un modelo causal. La importancia de esta investigación radica en la importancia del azúcar de caña para la región de las Altas Montañas de Veracruz. La industria azucarera de acuerdo con la secretaria de agricultura y desarrollo rural (SADER) genera en México alrededor de 440 mil empleos directos y 2.2 millones de empleos indirectos además de que se considera al azúcar un producto de la canasta básica.

El fenómeno de aterronamiento del azúcar de caña es una problemática que se presenta principalmente durante el almacenamiento y distribución, ocasionando que el producto sea rechazado debido a la dificultad de su manejo, ya sea para su uso por la industria de alimentos o para su empaque para el consumidor final; la falta de fluidez por los conglomerados que se forman entre los cristales, hace que tenga que ser sometida el azúcar a fuerzas mecánicas para poder recobrar la fluidez o en casos extremos reprocesar el producto, generando con ello costos por maniobras de descompactación o reproceso, respectivamente.

Cabe resaltar que el aterronamiento es un fenómeno que se puede presentar en cualquier alimento o producto en polvo (Leche en polvo, Jabón, cemento, etc.). Lo que ha desencadenado diversas investigaciones en las cuales se observan las causas de una forma individual, es por eso por lo que se recurrió a los modelos causales de forma particular al análisis de sendero con el fin de poder identificar cuáles son las variables que tienen mayor efecto en el aterronamiento y la interacción que hay entre estas y el fenómeno causal.

De acuerdo con el análisis de sendero realizado se recomienda que para prevenir el fenómeno de aterronamiento se sugiere mantener la humedad interna del azúcar almacenado por debajo del 0.024 % y que el porcentaje de finos no supere el 3.48%, por lo que un aumento combinado de ambos factores propiciaría la formación de terrones en el azúcar.

**Palabras clave:** Aterronamiento, azúcar, diagramas de sendero, causalidad.

# STUDY THE PHENOMENON OF LUMPING OF REFINED CANE SUGAR THROUGH A CAUSAL MODEL

María de Lourdes Hernández Reyes, M.C.

Colegio de postgraduados. 2021

The present research aims to study the phenomenon of lumping of refined cane sugar through a causal model. The importance of this research lies in the importance of cane sugar for the region of "Altas Montañas", Veracruz, Mexico. The sugar industry, according to the Secretary of Agriculture and Rural Development (SADER) generates in Mexico around 440,000 direct jobs and 2.2 million indirect jobs, in addition to the fact that sugar is considered a product of the market basket.

The phenomenon of lumping of cane sugar is a problem that occurs mainly during storage and distribution, causing the product to be rejected due to the difficulty of handling, either for use by the food industry or for packaging for the final consumer; the lack of fluidity due to the conglomerates that form between the crystals, means that the sugar has to be subjected to mechanical forces in order to make fluidity or in extreme cases reprocess the product, thereby generating costs for unpacking or reprocessing, respectively.

It should be noted that lumping is a phenomenon that can occur in any powdered product (powdered milk, soap, cement, etc.). What has triggered various investigations in which the causes are observed in an individual way, that is why causal models were used in a particular way to the path analysis in order to be able to identify results are the variables that have the greatest effect on lumping and the interaction between them and the causal phenomenon.

According to the trail analysis carried out, it is recommended that to prevent the caking phenomenon, it is suggested to keep the internal humidity of the stored sugar below 0.024% and that the percentage of fines does not exceed 3.48%, so that a combined increase of both factors would promote the formation of lumps in the sugar.

**Keywords:** Lumpiness, sugar, path diagrams, causality.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1. Planteamiento del problema.....	1
2. Objetivos.....	2
3. Hipótesis.....	2
4. Revisión de literatura.....	2
4.1 Agroindustria azucarera.....	2
4.2 Cadena de valor.....	4
4.3 Clasificación del azúcar.....	5
4.4 Proceso de obtención de azúcar en fábrica.....	6
4.5 Calidad de azúcar.....	8
4.7 Análisis de Senderos.....	10
5. Literatura citada.....	18
CAPITULO I. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ATERRONAMIENTO DEL AZÚCAR DE CAÑA.....	23
1.1. Introducción.....	23
1.2. Materiales y Métodos.....	24
1.3. Resultados y Discusión.....	25
1.4. Conclusiones.....	29
1.5. Literatura citada.....	30
CAPITULO II. EVALUACIÓN DE MODELO CAUSAL DEL FENÓMENO DE ATERRONAMIENTO DE CAÑA DE AZÚCAR A TRAVÉS DE LOS MODELOS DE ECUACIONES ESTRUCTURALES.....	32
2.1. Introducción.....	32
2.2. Materiales y métodos.....	33
2.3. Resultados y discusión.....	37
2.4. Conclusiones.....	47
2.5. Literatura citada.....	48
CONCLUSIONES FINALES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	49
1. Conclusiones.....	49
2. Recomendaciones.....	50

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción mundial de azúcar (ton) durante el ciclo 2018/2019.....	3
Figura 2. Mapa las regiones cañeras en México.....	4
Figura 3. Producción nacional de azúcar durante la zafra 2018-2019.....	4
Figura 4. Diagrama de bloques del proceso de extracción del azúcar.....	7
Figura 5. Diagrama de metodología para el análisis de los Modelos de Ecuaciones Estructurales (SEM). Fuente: Modificado de Cupani, (2012).....	14
Figura 6. Diagrama de análisis de senderos del fenómeno causa-efecto del aterronamiento del azúcar de caña. Fuente: elaboración propia producto del análisis.....	28
Figura 7. Diagrama de senderos del aterronamiento de azúcar refinada. Fuente: elaboración propia. ....	34
Figura 8. Diagramas de sendero de efectos directos de las variables independientes sobre la variable de respuesta “aterronamiento” .....	39
Figura 9 Diagramas de sendero de efectos indirectos de las variables dependientes e independientes sobre la variable respuesta “aterronamiento” Fuente: Elaboración propia. ....	41
Figura 10. Diagrama de sendero 2 de efectos directos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterronamiento Fuente: Elaboración propia.....	43
Figura 11. Diagrama de sendero 3 de efectos directos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterronamiento Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 12. Diagrama de sendero 6 de efectos directos e indirectos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterronamiento Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 13. Diagrama de sendero 7 de efectos directos e indirectos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterronamiento Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 14. Diagrama de sendero 3 de efectos directos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterronamiento Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 15. Diagrama de sendero 6 de efectos directos e indirectos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterronamiento Fuente: Elaboración propia.....	47

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Parámetros de calidad de la azúcar refinada de acuerdo a la NMX-F-003-SCFI-2004 .....	8
Cuadro 2. Interacción entre variables que se pueden presentar en un diagrama de senderos.....	13
Cuadro 3. Niveles de evaluación de ajuste para un Modelo Ecuaciones Estructurales..	17
Cuadro 4. Variables de importancia en el aterronamiento de azúcar. ....	26
Cuadro 5. Valores de referencia para la evaluación de la identificación de un modelo de ecuaciones estructurales. ....	35
Cuadro 6. Valores de referencia de los indicadores de ajuste de un modelo de ecuaciones estructurales .....	36
Cuadro 7. Estadísticas descriptivas de las variables incluidas en el diagrama de senderos .....	38



Cuadro 8. Índices de bondad de ajuste de los modelos. Elaboración propia a partir de la base de datos.....	42
--	----

## INTRODUCCIÓN GENERAL

### 1. Planteamiento del problema

El proceso para la elaboración de azúcar comienza con la extracción del jugo de caña, para posteriormente pasar a las etapas de clarificación, evaporación, cocción, centrifugado, refinado, enfriamiento, envase y almacenamiento. Durante las etapas de almacenamiento y distribución, se observa el fenómeno de aterronamiento, debido principalmente a la unión entre los cristales de azúcar. Castrillon *et al.* (2011) indica que es una característica que se debe principalmente a la sensibilidad del azúcar a las condiciones ambientales y al tamaño de los cristales.

Cabe mencionar que el azúcar es utilizado principalmente para el consumo doméstico y como materia prima para la industria alimentaria, cuando se presenta el fenómeno de aterronamiento, suele dificultar su utilización, y como consecuencia de esto se rechaza el producto. Situación que impacta en el costo de producción derivado del rechazo del producto aterronado, se adicionan costos por maniobras de descompactación y lograr separar parte de los conglomerados, por el reenvase y el reproceso (Castrillon *et al.*, 2011). Además, se debe considerar el impacto en las ventas e imagen ante el cliente debido a la no conformidad del producto.

Se han realizado diversos estudios respecto al proceso de aterronamiento desde diferentes enfoques en varios países, tales como Colombia, Tailandia y México (Christakis *et al.*, 2006, Castrillon *et al.*, 2011, Pascual *et al.*, 2016). Estas investigaciones coinciden en que los factores como la temperatura, tamaño de partícula y humedad) dan pauta a la formación del fenómeno; además consideran que estos factores actúan de forma independiente. Incluso, los trabajos consultados proponen técnicas de manejo con el fin de evitar el aterronamiento. Entre ellas indican dar un tiempo de acondicionamiento al azúcar; es decir, dejar el azúcar en un silo de almacenamiento donde se pueda liberar la humedad del azúcar (Tait *et al.*, 2010). Chiprasert *et al.* (2006) recomiendan tener una humedad relativa menor al 67% en los almacenes y Pascual *et al.* (2016) recomiendan evitar cambios bruscos en la humedad relativa y la temperatura de almacenamiento.

Sin embargo, este problema aún persiste en la mayoría de los ingenios azucareros mexicanos, teniendo mayor recurrencia en los meses de diciembre a febrero. En el presente estudio se propone estudiar el fenómeno de aterronamiento, considerando que los factores determinantes de la ocurrencia de este fenómeno presentan una estructura de asociación; la

cual puede ser vista como un fenómeno de causa – efecto, a través del análisis con modelos de ecuaciones estructurales. Es decir, para que un fenómeno sea considerado causal, debe de cumplir con la siguiente condición; la variable **X** es la causante de una variable **Y**; por lo tanto, al ocurrir **X** se presenta **Y**. La variable **Y** no puede presentarse sin la previa aparición de **X**. La causalidad permitirá reconocer la interacción directa o indirecta entre las variables (Caballero, 2006).

## **2. Objetivos**

### **Objetivo general**

Modelar el fenómeno de aterronamiento de azúcar refinada de caña, como un fenómeno causa-efecto a través del uso de los modelos de ecuaciones estructurales.

### **Objetivos específicos**

1. Proponer el diagrama de senderos del fenómeno de aterronamiento a través de la identificación de las variables que influyen en el proceso de aterronamiento
2. Evaluar el diagrama de senderos como un modelo causal a través de la metodología de los modelos de ecuaciones estructurales.

## **3. Hipótesis**

1. El proceso de aterronamiento en azúcar refinada de caña se puede explicar cómo un fenómeno causa-efecto.
2. El tamaño del grano y la humedad interna del azúcar envasado son los factores que mayor efecto tienen en el aterronamiento.

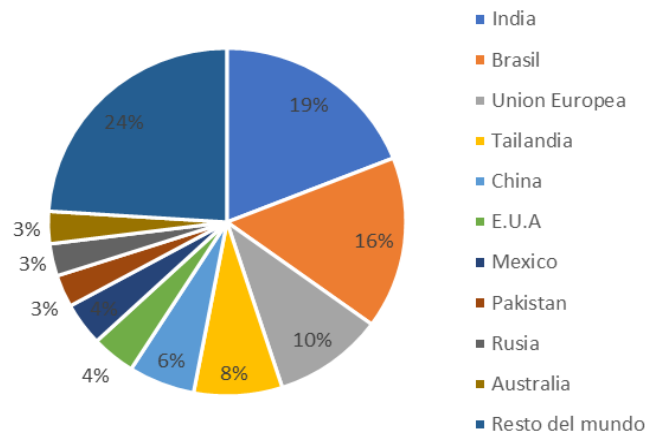
## **4. Revisión de literatura**

### **4.1 Agroindustria azucarera**

La caña de azúcar (*Saccharum spp.*) se considera que es originaria de Nueva Guinea llegó a las islas Canarias, y gracias a Cristóbal Colón su cultivo se extendió por Centroamérica y Sudamérica (Hernández *et al.*, 2013). El uso principal de la caña de azúcar es para obtener azúcar, y subproductos y coproductos, como el bagazo, melaza, alcohol, vinaza, entre otros. La industria azucarera es considerada una de las más antiguas en el mundo. Los trapiches son de las primeras tecnologías que dieron paso a la transformación de la caña de azúcar, en panela y utilizaban la fuerza de animales para la molienda de la caña. Más tarde, surgieron los ingenios

azucareros, cuya energía de molienda provenía de la fuerza del agua, para la obtención de azúcar (Von Wobeser 1988).

El Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA) reporta que los principales productores de azúcar a nivel mundial durante el ciclo 2018/2019, fue India (18.5%), Brasil (16.3%), Tailandia (8.1%), China (6.0%), E.U.A (4.2%), México (3.6%), Pakistan (3.4%), Rusia (3.3%), Australia (2.7%) y el resto del mundo con el 24.5% con una producción preliminar total de 176.1 millones de ton, como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Producción mundial de azúcar (ton) durante el ciclo 2018/2019.

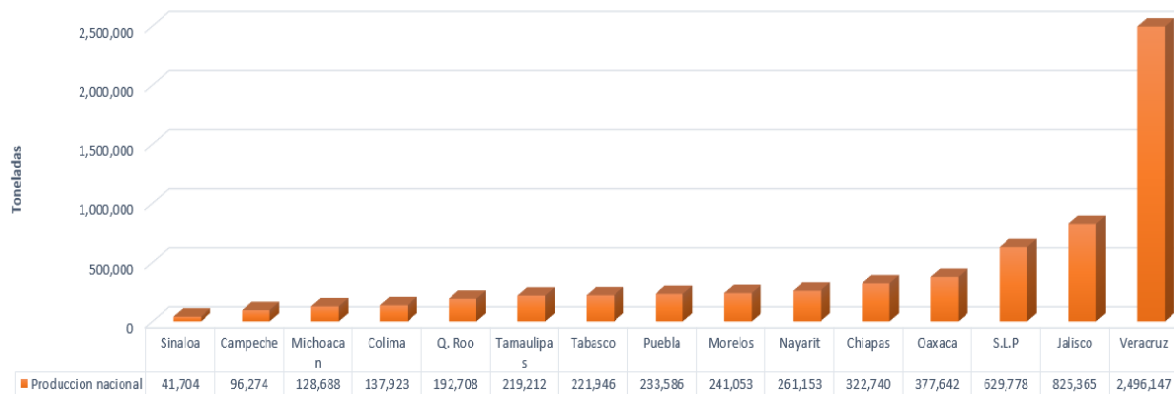
**Fuente:** Elaboración propia modificada de estadísticas de CONADESUCA (2019).

México cuenta con 51 ingenios azucareros, distribuidos en 7 regiones y en 15 estados, como se muestra en la Figura 2. La región centro cuenta con 5 ingenios distribuidos en los estados de Puebla, Morelos y parte del estado de Veracruz; la región Córdoba-Golfo tiene 10 ingenios ubicados en los estados de Oaxaca, Veracruz y Puebla, en el noreste se tienen 3 ingenios distribuidos en los estados de San Luís Potosí, Tamaulipas y Veracruz. La región noroeste tiene 3 ingenios, los cuales están en Sinaloa y Nayarit. El pacífico cuenta con 10 ingenios ubicados en los estados de Jalisco, Colima y Michoacán. La región del Papaloapan- Golfo, la cual abarca la mayor parte del territorio veracruzano, cuenta con 10 ingenios. Por último, la región sureste en los estados de Tabasco, Campeche, Quintana Roo y Chiapas, se tiene el registro de 7 ingenios (CONADESUCA, 2019).



**Figura 2.** Mapa las regiones cañeras en México.  
Fuente: CONADESUCA 2019

La producción de azúcar en México durante la zafra 2018-2019 fue de 6,436,314 ton de azúcar, de las cuales 1,487,107 fue azúcar refinada, con la operación 50 de los 51 ingenios. Se industrializaron un total de 804,060 ha de caña, con una molienda 57 millones de ton de caña. Veracruz fue el principal productor seguido de Jalisco, San Luis Potosí, Chiapas, Nayarit, Morelos, Puebla, Tabasco, Tamaulipas, Quintana Roo, Colima, Michoacán, Campeche y Sinaloa. De la producción total de azúcar del estado de Veracruz, se molieron 21,597,846 ton de caña y se produjeron 2,496,147 ton de azúcar, como se muestra en la Figura 3. (CONADESUCA, 2019).



**Figura 3.** Producción nacional de azúcar durante la zafra 2018-2019.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos estadísticos de CONADESUCA, (2019)

#### 4.2 Cadena de valor

Cabe mencionar que la agroindustria azucarera en México tiene un peso social muy importante, al proveer al menos de 3 millones de empleos de forma directa o indirecta a personas que se dedican a las actividades dentro de la cadena productiva (Aguilar- Rivera, 2014)

Ante este panorama es de suma importancia realizar investigación pertinente que puedan beneficiar a cada uno de los siete eslabones de la cadena de valor; los cuales, de acuerdo con Aguilar *et al* (2017), abarcan desde el sector primario hasta el producto final y se describen a continuación:

Cosecha de la caña de azúcar. Actividad que debe ser planificada y organizada con el objetivo de que la caña que llegue a los ingenios azucareros sea de calidad. La cosecha se realiza durante los meses de noviembre hasta mayo y lleva por nombre zafra, donde el corte deber ser hasta el suelo. Con esto se pueden cosechar los entrenudos ricos en azúcar, para realizar posteriormente el despunte. Esto evitará la recolección de los entrenudos superiores, que usualmente son inmaduros (SAGARPA, 2015).

Transporte de caña hacia el ingenio. Esto tiene como objetivo recolectar la materia prima, garantizando el suministro oportuno. El tiempo de espera entre la cosecha y la molienda debe ser mínimo, para evitar pérdidas de calidad. El transporte necesario para esta actividad se realiza a través de remolques, trailers, tortons y rabones, en este segundo eslabón de la cadena es donde se lleva a cabo el proceso transformación de la caña de azúcar donde el producto principal es el azúcar, seguido de esto se presentan los servicios de almacenamiento de acuerdo con Este servicio está incluido dentro de la cadena de valor debido a su relación con las ventas, este almacenamiento puede ocurrir dentro del ingenio o en bodegas externas. Posteriormente se encuentra la comercialización del producto. Que se puede realizar a través de canales cortos o largos, los canales cortos corresponde a los ingenios que tiene marcas propias y venden a sus clientes preferenciales, la cadena larga incluye a la a los mayoristas, minoristas y finalmente a los supermercados que abastecen al consumidor (Rios & Delgado C., 2008)

### **4.3 Clasificación del azúcar**

De acuerdo con Mazon, (2011) algunos de los tipos más comunes de azúcar que se producen en la industria se denominan como:

- Mascaba, azúcar granulada que contiene una capa de melaza; la cual le proporciona aroma y sabor característico, es considerada azúcar natural al no pasar por ningún proceso de refinación.
- Estándar o morena, formada por granos finos y que aún contiene una ligera capa de miel. Es durante la etapa de cristalización que forma su sabor y color característico. De acuerdo con la NMX-F-084-SCFI-2004 es el producto derivado de la caña de azúcar,

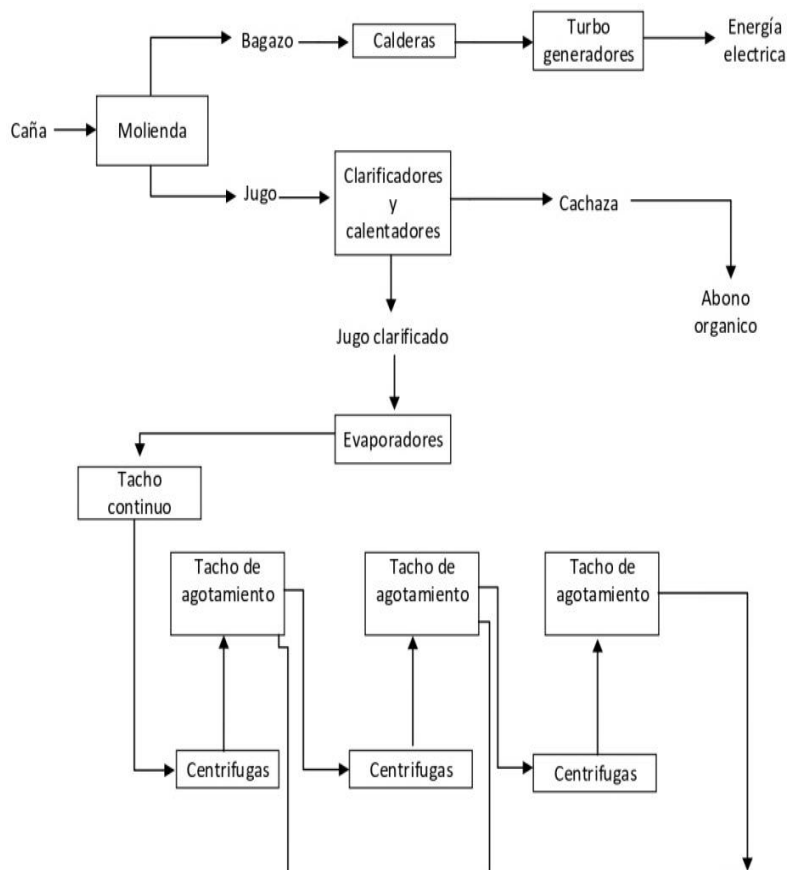
formado por cristales sueltos de sacarosa y debe presentar una concentración mínima del 99.40% de polarización.

- Azúcar refinada, en México la NMX-F-003-SCFI-2004 la define como el producto sólido derivado de la caña de azúcar, constituido por cristales sueltos de sacarosa y en una concentración mínima de un 99.90% de polarización, lo que la hace más pura que el azúcar estándar. Presenta una mayor concentración de sacarosa y menor cantidad de impurezas.
- Azúcar glass: Es azúcar estándar que previamente se ha pulverizado y se combina con un máximo del 5% de fécula maíz.

Cabe resaltar que el aterronamiento no es un fenómeno exclusivo de algún tipo de azúcar, es más bien un fenómeno que se puede presentar en cualquier tipo de polvo, pero esto dependerá de las características específicas de cada uno. En este estudio se hará referencia al fenómeno de aterronamiento del azúcar refinado.

#### **4.4 Proceso de obtención de azúcar en fábrica**

El proceso de obtención del azúcar comienza con la extracción del jugo de caña, para posteriormente pasar a las etapas de clarificación, evaporación, cocción, centrifugado y refinado (SIAP, 2019), como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Diagrama de bloques del proceso de extracción del azúcar.

**Fuente:** Elaboración propia modificada de SIAP (2019).

La **clarificación** es la etapa donde se retira la mayor parte de impurezas que contenga el jugo de caña, para su óptimo aprovechamiento en etapas posteriores (Vega *et al.*, 2011). En la **evaporación**, el jugo clarificado se lleva a los evaporadores donde se concentra hasta aproximadamente 60°Bx, debido a que aquí se elimina por lo menos el 80% del agua (Velásquez *et al.*, 2019) y se obtiene la meladura. En la **etapa de cocción**, la meladura (solución azucarada obtenida al evaporar gran parte del agua contenida en el jugo de clarificado) (Ortiz *et al.*, 2008) se sulfata con una mezcla de ácido fosfórico, cal y floculantes anicónicos y es enviada a los tachos donde se obtiene miel y cristales de azúcar. Esta etapa emplea un sistema de agotamiento de meladura llamadas templas. (Alvarez S. & Garcia P., 2013). Durante el **centrifugado**, se elimina la película de miel que cubre los cristales de azúcar a través de un lavado con agua caliente para. En esta etapa se obtienen dos productos, uno es el azúcar como producto terminado y el otro es la miel. Esta miel se puede volver a procesar y producir azúcar, mientras que la que ya está agotada, se conoce como miel final; la cual comúnmente usada para la alimentación del ganado o fabricación de alcohol (Alvarez S. & Garcia P., 2013). El proceso de **refinación** tiene como objetivo eliminar las impurezas que pueda tener el azúcar, se lleva a cabo disolviendo el azúcar crudo, de la disolución se obtiene un licor al que se adiciona un floculante compuesto por ácido fosfórico e hidróxido de calcio para arrastrar impurezas, que serán retiradas en un clarificador. Este licor se vuelve a concentrar y cristalizar en un nuevo tacho para posteriormente eliminar el jarabe en las centrífugas (Mazon I. , 2011). De manera



similar al azúcar estándar el refinado pasa la etapa de secado donde el nivel de humedad final de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-F-003-SCFI-2004 debe ser del 0.04 % como se muestra en el cuadro 1. Como resultado de esta última etapa se obtiene azúcar refinada en caso de que no se realice esta última, se obtendrá azúcar estándar.

#### 4.5 Calidad de azúcar

En México el azúcar refinado está regulada por la Norma Mexicana - NMX-F-003-SCFI-2004, esta norma establece los estándares de calidad fisicoquímicos con los que debe cumplir el azúcar refinado (Cuadro 1). Estándares de calidad para este estudio solo se consideran: La polarización indica la pureza de azúcar o el nivel de refinamiento del azúcar y se calcula tomando en cuenta que pureza de sacarosa es 100. La humedad es uno de los factores que tienen una relación muy estrecha con el atorrónamiento, ya que este parámetro determina la estabilidad y calidad del azúcar durante el almacenamiento (Ravnö, 2012) y el color la NMX-F-2012 lo define como el índice de absorbancia multiplicado por 1000, el resultado de esto se denominan unidades ICUMSA (IU) a pH de 7,0.

La norma además brinda algunas recomendaciones para definir las condiciones de almacenamiento; tales como almacenar el azúcar en un lugar fresco, seco, con ventilación, libre de polvo y protegido de roedores e insectos; y si esto es adecuado el azúcar tendrá una vida de anaquel de 2 años. Otros autores como Chen & Chou, (1993) sugieren además de mantener una temperatura de almacenamiento menor a 38°C y una humedad relativa menor al 60%; mantener la rotación de inventarios, con el fin de evitar cambios de temperatura y humedad, y que las bodegas sean sitios cerrados donde el azúcar envasado no tenga contacto con la intemperie y animales.

**Cuadro 1.** Parámetros de calidad de la azúcar refinada de acuerdo con la NMX-F-003-SCFI-2004

Parámetros de calidad	Unidad	Valores	Nivel	Método de prueba
Polarización	%	99.90	Mínimo	MNX-F-079
Color	U.I.	45.00	Máximo	NMX-F-526
Cenizas sulfatadas/conductividad	%	0,04	Máximo	NMX-F-082
Humedad	%	0,04	Máximo	NMX-F-294
Azúcares reductores directos	%	0,05	Máximo	NMX-F-495
Turbidez	U.I.	25,00	Máximo	OPCIONAL
Dióxido de Azufre (sulfitos)	ppm	15,00	Máximo	NMX-F-501
Materia insoluble	ppm	20,00		
Plomo	ppm	0,50	Máximo	NMX-F-499

Arsénico	ppm	1,00	Máximo	NMX-F-498
Partículas metálicas	ppm	10,00	Máximo	OPCIONAL
Potencial Floc	U.A:	0,14	Máximo	OPCIONAL

Fuente: MNX-F-003-SCFI-2004

#### 4.6 Modelo Causal

Es de suma importancia tener claro el concepto de causalidad. Muchas veces se considera erróneamente que, si hay una relación de asociación entre las variables, existe también una relación causal. Un ejemplo de esto es que cuando hay nubes nos lleva a pensar que lloverá, y cuando no las vemos pensamos que no lloverá (Cañadas *et al.*, 2015). Otro ejemplo de esto lo presenta (Kenny, 1979) donde se enuncia que el fumar causa cáncer de pulmón, sin embargo, algunos fumadores de avanzada edad no desarrollaron esta enfermedad, mientras otras que nunca fumaron si lo desarrollaron.

Ejemplos como los anteriores se pueden presentar al momento de modelar un fenómeno, sin embargo, se considera un efecto causal cuando se cumple con lo siguiente: “Una variable A es causa de B si siempre que se da A acontece B, y nunca acontece B si previamente no se ha dado A.” (Caballero D., 2006).

Las relaciones causales tienen su origen través de los estudios en genética de Sewall Wright, Wright comenzó con sus estudios en genética en el año de 1918 donde pretendía estimar el efecto que tiene ciertas causas en las medidas de los huesos de varios conejos, basando sus estudios en los resultados obtenidos por el profesor Castle publicados en 1914. En su trabajo de 1918 Wright aun no mencionaba los coeficientes path, el path análisis, ni mostraba los diagramas que ilustraran las relaciones. Fue hasta en el año de 1920 donde mediante diagramas expresó la relación existente entre los factores comunes y los factores individuales (herencia, entorno común para compañeros de camada antes del nacimiento y el residuo, responsable en gran parte de irregularidad en el desarrollo) que afectan a cada individuo (Morales *et al.*, 2012)

Las relaciones encontradas por Wright se representaron en un “*path diagram*” (análisis de ruta) y por mucho tiempo se le conoció con ese nombre. Estos modelos surgieron ante la limitación de que las técnicas de análisis multivariante tienen la restricción que, para examinar temas prácticos y teóricos, solo pueden inspeccionar una relación a la vez, es decir solo plantea la relación entre variables dependientes e independientes, incluso aquellas que tienen muchas variables dependientes (Hair *et al.*, 1995).

A pesar de la funcionalidad del modelo de análisis de ruta, este se dejó en el olvido, hasta que a principios de la década de los años 70’s fue retomado y mejorado por economistas y sociólogos, transformando el método de Wright. Pasando del *path análisis* a SEM (Structural

Equation Modeling) (García V., 2011). Debido a esta transición, su estimación, se vuelve más compleja que la de las técnicas multivariantes (Orgaz B., 2008). Para poder hacer más fácil su implementación y análisis, se desarrollaron diferentes programas informáticos como es el caso de LISREL (Linear Structural Relations) desarrollado por Jöreskog en 1996. Este programa en sus inicios tenía la desventaja de que se necesitaban conocimientos matemáticos avanzados para poder establecer los planteamientos de las ecuaciones estructurales, (Cupani, 2012) lo que dificultaba su utilización por los usuarios. Posteriormente en 1985 se desarrolló EQS por Blanter, este programa presenta un interfaz amigable con el usuario y era fácil de comprender. Por último, en 1997 se desarrolló AMOS (*Analysis of Moment Structures*) por Arbuckle, el cual permitía especificar y realizar modificaciones gráficas al modelo (Cupani, 2012).

Se ha considerado que los SEM son una extensión de técnicas multivariadas (Kahn, 2006), pero a diferencia de estas, con SEM se puede llevar a cabo la evaluación y estimación de la relación entre constructos no observables llamados variables latentes (Cupani, 2012). Además de que permiten estudiar a la misma vez relaciones de dependencia. Esto es importante cuando una variable dependiente actúa al mismo tiempo como una variable independiente (Hair *et al.*, 1995). Asimismo, en los diagramas de sendero que son la representación gráfica se permite establecer el tipo y dirección que se espera tengan las variables del modelo (Ruiz D., 2008). Con los modelos de ecuaciones estructurales es posible que se pueda aceptar la teoría que se estableció, con respecto a un hecho real. Por lo tanto, los resultados son considerados una representación de la realidad (Caballero D., 2006).

Wright, (1923) menciona que “la teoría de los coeficientes de trayectoria ofrecen una fórmula general para la deducción de las relaciones causales, además de que es un requisito fundamental el conocimiento previo de las relaciones causales” esto tiene relación con lo que Blalock, (1964) enunció “se debe iniciar con un número finito de variables y las variables a incluir en el sistema se debe basar en una dosis de pensamiento e investigación”, es decir que todas las relaciones que se lleguen a representar en un diagrama de senderos deben estar respaldadas por el conocimiento teórico del fenómeno a estudiar.

Dentro de las razones por la que es importante la aplicación de un modelo causal es para poder enunciar una teoría de forma más exacta. Además de que el modelado causal puede ayudar al desarrollo, modificación y extensión de medición y la teoría (Kenny, 1979)

#### **4.7 Análisis de Senderos**

El método de análisis de senderos es conocido también como “*path analysis*” o análisis de ruta y permite evaluar la relación entre dos variables y determinar si es causal o está determinado por otras variables (Viveros *et al.*, 2015). Un análisis de sendero trata de desdoblarse el coeficiente de correlación de los efectos directos e indirectos llamadas causas, sobre variables más complejas llamadas efectos (Lagos *et al.*, 2013). El coeficiente de correlación ayuda a cuantificar que tan asociadas están dos variables, pero no es un indicador de causalidad (Brasileiro *et al.*, 2013).

Para construir un diagrama causal se deben cumplir con los supuestos de la regresión múltiple, como por ejemplo el tamaño de la muestra, la independencia de los errores, la normalidad univariada y multivariada, la linealidad, la multicolinealidad, la recursividad, el nivel de medición del intervalo y los niveles aceptables de confiabilidad (Perez *et al.*, 2013). Un modelo de senderos no prueba la existencia de causalidad, si no que verifica la influencia de variables independientes sobre una dependiente, así como su interacción (Medrano & Muñoz-Navarro, 2017); además de la evaluación de la calidad de los datos, identificando los datos extremos y datos perdidos.

Kapla (2000) y Kline (2005) sugieren seguir seis pasos para la construcción de un análisis de sendero: 1) especificación, 2) identificación, 3) estimación de parámetros, 4) evaluación del ajuste, 5) re-especificación del modelo y 6) interpretación. En el primer paso, el investigador da las bases teóricas del modelo causal y la relación que existe entre ellas. En esta etapa, existen dos tipos de errores, el primero es de especificación interna, que se refiere a omitir parámetros relevantes o incluir irrelevantes, y el segundo de especificación externa, que es cuando se omiten variables (Pérez *et al.*, 2013). La identificación, ayuda a saber si la cantidad de información es la adecuada para verificar el modelo; para esto se debe hacer el cálculo de los grados de libertad del modelo. Una vez calculados los grados, se deben seguir las siguientes reglas de decisión: cuando se tienen grados de libertad (*gl*) iguales a cero, indica un ajuste perfecto, *gl* negativos, indica falta de información. En este caso, se estaría tratando de estimar más parámetros de los que permite la información disponible. Los grados de libertad (*gl*) positivos en el modelo representan una sobre-identificación; es decir, que se cuenta con información suficiente por lo tanto el modelo puede ser estimado (Pérez *et al.*, 2013). Una vez cumplido con lo anterior, se realiza la estimación de los parámetros a partir de las varianzas y covarianzas muestrales. Con el objetivo de obtener una matriz que se ajuste a la matriz observada. Si la diferencia entre ellas es mínima o cercana a cero se puede decir que el ajuste es bueno. El método más usado para esto es el de máxima verosimilitud debido a que suelen ser concisos incluso cuando no se cumplen completamente los supuestos de normalidad

multivariada (Manzano, 2017). Cuando se tiene indicadores categóricos se pueden utilizar otros métodos como el método de mínimos cuadrados ponderados (Brown, 2006)

En el cuarto paso se evalúa si las relaciones entre las variables presentes en el modelo estimado se reflejan en lo observado. La evaluación se realiza basándose en la magnitud y significación de los parámetros estimados, varianza explicada por las variables y el ajuste del modelo a los datos. Los métodos de bondad de ajuste, pueden ser absolutos que evalúan el ajuste general del modelo, relativos miden los modelos propuesto entre sí y parsimoniosos donde se evalúa la bondad de ajuste del modelo con respecto a la cantidad de coeficientes considerados para obtener este nivel ajuste (Orgaz B., 2008) (Cupani, 2012) , aunque muchas veces uno solo no logra aportar información necesaria, comúnmente se utiliza una combinación de ellos (Bentler, 1995) (Byrne, 2001). En el quinto paso se tiene la posibilidad de mejorar el modelo. Para esto es muy importante al igual que en el primer paso, tener un buen fundamento teórico que permita la eliminación o adición de parámetros (Pérez *et al.*, 2013).

#### **4.8 Modelos de ecuaciones estructurales (SEM).**

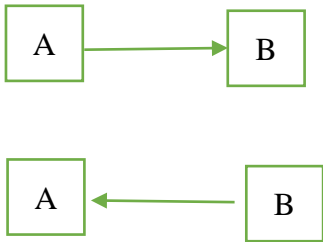

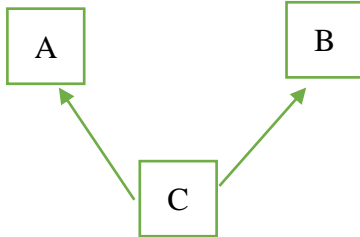
Los modelos de ecuaciones estructurales van acompañados de una representación gráfica llamada "*path diagrams*". Estos diagramas se apoyan en el conocimiento teórico que se tiene del tema de estudio. Además, ayudan a visualizar la teoría que se propone, ya que hacerlo con ecuaciones matemáticas dificultaría su comprensión (Medrano & Muñoz-Navarro, 2017). Además, estos modelos se conocen como un modelo que servirá de guía para que el investigador pueda identificar la interacción entre variables. Ahora bien, previamente se habían mencionado las variables observables; y en este apartado se definirán cada uno de los elementos que conforman el modelo estructural como se indica a continuación.

- Variables observadas: son aquellas que se puede medir de forma directa como la edad, que se representan mediante rectángulos (Manzano, 2017) y se denominan con letras griegas (Caballero D., 2006).
- Variable latente o no observable: No pueden ser medidas de forma directa, un ejemplo de esto es la inteligencia que se mide a través de exámenes (Ruiz D., 2008), son representadas por óvalos y se denominan con letras latinas (Caballero D., 2006).

- Variable exógena: Es una variable independiente que afecta a otra variable, pero no es afectada por alguna otra (Ruiz *et al.*, 2010).
- Variable endógena: Variable dependiente que recibe el efecto de otras variables.
- Variable error: Toma en cuenta todas las fuentes de variación que no se consideran en el modelo. Se clasifican como una variable latente.

Estas variables se relacionan de diferentes maneras como se muestra en el Cuadro 2.

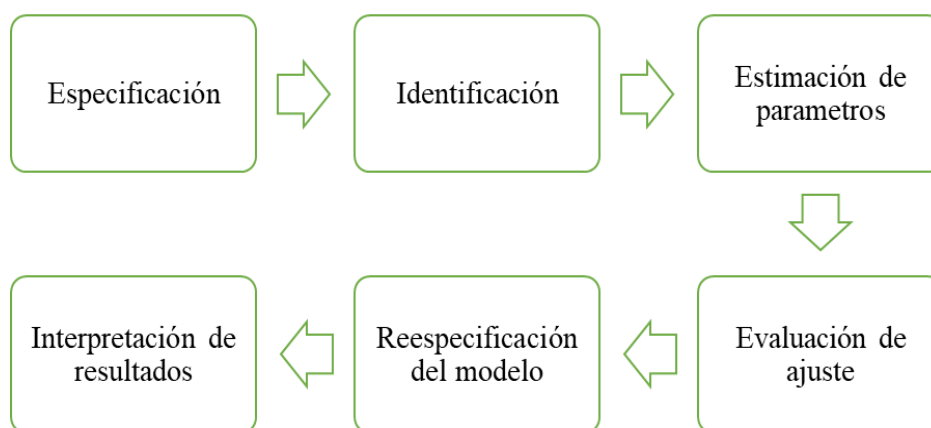
**Cuadro 2.** Interacción entre variables que se pueden presentar en un diagrama de senderos.

Relación	Representación grafica	Concepto
Directa		Existe una covariación al ser A causa de B, se puede considerar a B como la variable respuesta y A como la predictora, de igual forma será una relación directa si covarían a la inversa al ser B la causa de A (Garcia V., 2011).
Reciproca		También llamada bidireccional, esto sucede cuando una variable causa actúa además como un efecto de otra (Ruiz <i>et al.</i> , 2010).
Espúrea		Este tipo de relación comprende por lo menos tres variables, esto significa que la causa de la covariación entre dos variables se debe a la relación que tienen estas con una tercera (Ruiz D., 2008).

Indirecta	<pre> graph TD   A[A] --&gt; C[C]   C[C] --&gt; B[B] </pre>	<p>Al igual que la relación espúrea, implica tres variables, en esta la tercera variable sirve como mediadora. Es decir, para que suceda B, A tiene que actuar a través de C (Ruiz D., 2008).</p>
-----------	---	---

Fuente: Elaboración propia. Fuentes: (García V., 2011), (Ruiz D., 2008)

Para llevar a cabo la metodología SEM, se recomienda de forma similar que con los diagramas de senderos seguir 6 etapas: la especificación, la identificación, la estimación de parámetros, la evaluación de ajuste, la re-especificación del modelo y la interpretación de los resultados. Además de esto, se debe considerar el análisis de la matriz de datos (Cupani, 2012).



**Figura 5.** Diagrama de metodología para el análisis de los Modelos de Ecuaciones Estructurales (SEM). **Fuente:** Modificado de Cupani, (2012).

En la etapa de **especificación** se tiene como objetivo el planteamiento de un modelo estadístico que ayude a comprender la teoría y los datos de esta etapa (Orgaz B., 2008). Es en esta etapa donde surge la importancia del conocimiento teórico que se tiene del tema a estudiar (Cupani, 2012). Esto se consigue a través de la consulta bibliográfica, las investigaciones y las teorías relacionadas al fenómeno (Orgaz B., 2008). En el caso de que la información no sea

completa, puede suceder que no se asignen correctamente los parámetros y se deba modificar posteriormente el modelo. Asimismo, en esta etapa, se especificarán las variables, su interacción, así como la magnitud y sentido en lo que esto sucede (Orgaz B., 2008).

Una vez realizada la especificación del modelo, se presenta **la identificación**. En esta etapa se aborda el llamado “problema de la identificación del modelo” (Orgaz B., 2008), y se considera como uno de los procesos más difíciles y a su vez de los más importantes. Se centra en que el número de parámetros que serán estimados “sean de la misma cantidad o menores al número de unidades de información que se dispone en la matriz de varianzas- covarianzas obtenidas de los datos muestrales” (Orgaz B., 2008). A esto se le conoce como condición de orden. Ahora bien, cuando un modelo presenta variables latentes, se añade la condición de que cada una de ellas debe ser evaluada por tres o más indicadores. Por otra parte, como estos no son medibles de forma directa, se debe dar una escala con la cual puedan ser medidas. A esto se le conoce como condición de rango.

La importancia de la identificación radica en asegurar que los parámetros del modelo puedan ser estimados; es decir, que cada uno de los parámetros deben tener una sola solución. Esta etapa debe ser previa a la recolección de datos, de esta forma se verificará que cada parámetro este representado por una expresión algebraica en relación con las varianzas y covarianzas muestrales (Cupani, 2012). Uno de los parámetros que sirven para saber si el modelo está identificado son los grados de libertad, Si los grados de libertad son negativos, no será posible llevar a cabo el estudio, ya que los grados de libertad, representarán la sencillez del modelo.

Para poder determinar los grados de libertad (gl) se establece la siguiente formula de acuerdo con Medrano & Muñoz-Navarro (2017).

$$gl = \frac{(N. de variables observadas) \times (N. de variables observadas + 1)}{2} - N. de parámetros a estimar$$

Se espera que el resultado sean grados de libertad, mayores o iguales a cero. Esto significará que el modelo está identificado. Si tiene exactamente 0 grados de libertad se dice el modelo pierde relevancia, dado que no puede ser generalizado. Cuando los grados de libertad son menores a cero, indica que la cantidad de parámetros que se pretenden analizar sobrepasan lo permitido por la información disponible y se conocen como modelos subestimados. A manera de conclusión, se entiende que, a mayor número de grados de libertad, el modelo se vuelve más parsimonioso, es decir que se tiene un buen ajuste de los datos, por lo tanto, el investigador



podrá demostrar cuales de las asociaciones planteadas son de mayor importancia (Cupani, 2012).

En caso de que el investigador decida emplear un modelo inadecuadamente identificado, las estimaciones de los parámetros que se obtendrán no serán exclusivas de los datos obtenidos en la matriz de covarianzas muestrales, esto ocasionara que los resultados sean ilógicos” (Orgaz B., 2008). Si el modelo está correctamente identificado, se debe verificar si es adecuado para los datos a los que se va destinar. En otras palabras, esto quiere decir que los datos deben cumplir con los supuestos y condiciones de aplicación del modelo. Esto se conoce como fase diagnóstica, y en este tipo de modelos se considera que las variables observadas ya sea endógenas o exógenas se comportan de acuerdo con la normalidad multivariada (Orgaz B., 2008).

Posteriormente durante la **estimación de parámetros** se el valor de los parámetros que fueron especificados en el modelo a partir de las varianzas y covarianzas muestrales (Medrano & Muñoz-Navarro, 2017). Para esto hacen uso de software como LISREL, AMOS, CALIS, EQS (Escobedo *et al.*, 2016). Los métodos para realizar la estimación de parámetros tienen como objetivo obtener el valor de los parámetros que puedan demostrar la similitud entre las covarianzas establecidas por el modelo y las que se observan en la muestra (Medrano & Muñoz-Navarro, 2017). Lo que hace diferente a cada método de estimación, es la función de ajuste que utiliza. En otras palabras, como es que se reducen las diferencias entre covarianzas, uno de los métodos más populares es el de Máxima verosimilitud (ML). Se recomienda usar ML cuando se cumplen con supuestos estadísticos como: tamaño de muestra, distribución normal multivariada, entre otras (Schermelleh-Engel *et al.*, 2003). Sin embargo, cuando los datos se encuentren en escala ordinal o alejados a la distribución normal, son más recomendables los métodos como mínimos cuadrados (Flora & Curran, 2004).

Durante la **evaluación de ajustes**, se contrasta la hipótesis nula que enuncia lo siguiente, “la matriz de varianza y covarianzas de la muestra es igual a la desarrollada por parámetros del modelo”. Con esto se pretende verificar si las relaciones del modelo representan a las relaciones observadas (Weston & Gore, 2006); es decir, qué tan diferentes son las covarianzas de la muestra y las predichas por el modelo (Ruiz *et al.*, 2010). La evaluación ayuda a conocer la fiabilidad de los datos del modelo, y saber si los datos son correctos y de utilidad para la investigación (Escobedo *et al.*, 2016). Las medidas para la calidad del ajuste se pueden clasificar en tres grupos:

- a) Las consideradas absolutas. Estas evalúan el ajuste global del modelo dentro del ajuste absoluto. Ahí se encuentra el *chi* cuadrado; la cual analiza directamente el ajuste entre la matriz de covarianza observada y la estimada (Orgaz B., 2008).
- b) Ajuste incremental. Este compara el modelo propuesto con un modelo distinto, donde se plantea la ausencia de relación entre variables. Como el índice de ajuste comparativo (CFI) (Orgaz B., 2008).
- c) Medida de ajuste de parsimonia. En este índice de evaluación de ajuste, las medidas de ajuste son modificadas para comparar modelos, con el objeto de establecer el nivel del ajuste alcanzado por cada coeficiente estimado (Escobedo *et al.*, 2016),

La medición de *chi* cuadrada es de las más usadas como medida de ajuste global del modelo, ya que posee pruebas de significancia estadística asociada. Cuando los resultados de la prueba son mayores a 0.05 se aceptará la hipótesis nula donde se enuncia la igualdad entre las matrices (Medrano & Muñoz-Navarro, 2017).

Dentro de las limitaciones de este índice, se encuentran que la Ji-cuadrada, va a depender de la cantidad de parámetros que existan. Es decir, va a disminuir cuando se adicionen parámetros al modelo; por lo tanto, modelos complejos tendrán valores Ji-cuadrada menores que aquellos modelos simples debido a la disminución de los grados de libertad (Hooper *et al.*, 2008). Precisamente por esto, en muchas ocasiones se suele dividir entre los grados de libertad esperando como resultado un valor menor a dos para un ajuste adecuado.

Cuando la información que se proporciona no es suficiente para poder valorar un modelo, se recomienda la evaluación conjunta de varios índices para poder decidir sobre el nivel de ajuste (Escobedo *et al.*, 2016). En el Cuadro 3., se presentan los distintos niveles de referencia de evaluación de ajuste para los modelos que se desean comprobar.

**Cuadro 3.** Niveles de evaluación de ajuste para un Modelo Ecuaciones Estructurales.

ÍNDICE	VALOR
Chi cuadrado (Ji-cuadrada)	No significativa
GFI, AGFI, NFI, NNFI, CFI	Mayor a 0.90
RMR RMSEA	Menores a 0.10

GFI (índice de bondad de ajuste), AGFI (índice ajustado de bondad de ajuste), NFI (índice de ajuste normalizado), NNFI (índice de ajuste no normalizado), CFI (índice de ajuste comparativo), RMR (residuo cuadrático medio), RMSEA (error de aproximación cuadrático medio).

La **re-especificación del modelo** consiste en consultar métodos para la mejora del ajuste del modelo, ya sea incorporando o removiendo algunos parámetros del modelo. Es necesario que las modificaciones se realicen considerando la teoría, ya que muchas veces se realizan modificaciones basadas solamente en los datos que se tienen (Cupani, 2012). Para efectuar la re-especificación, se deben revisar los índices de modificación, un ejemplo de estos índices de modificación es el que proporciona el software CALIS conocido como Multiplicado de Lagrange (LM), LM indica como mejoraría estadísticamente Chi - Cuadrada si un parámetro se agregara al modelo (Ó'Rourke, Norm, & Hatcher, 2013).

Finalmente, la **interpretación de resultados**, en esta última etapa se aprueban o se rechazan las hipótesis planteadas dentro del modelo, esta última etapa permite al investigador establecer el modelo que más represente la teoría planteada (Escobedo *et al.*, 2016).

## 5. Literatura citada

- Aguilar- Rivera, N. (2014). Reconversión de la cadena agroindustrial de la caña de azúcar en Veracruz México. *Nova Scientia*, VI(12), 125-161.
- Aguilar-Rivera N., R.-L. D.-M. (2010). Azúcar, coproductos y subproductos en la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *VirtualPro Procesos Industriales*, CVI, 1-28.
- Aguilar-Rivera, N., Debernadi-Vázquez, T., & Herrera-Paz, H. (2017). Subproductos, coproductos y derivados de la agroindustria azucarera. *Agroproductividad*, X(11), 13-20.
- Álvarez S., M., & García P., R. (2013). Estudio de simulación de procesos de producción en ingenios azucareros.
- Bentler, P. M. (1995). *Theory and implementation of EQS: A*. Los Angeles: BMDP statistical Software.
- Blalock, H. (1964). *Causal inferences in nonexperimental research*. Chapel Hill: University of North Carolina Press.
- Brasileiro., B., Peternelli, L., & Pereira B., M. (2013). Consistency of the results of path analysis among sugarcane experiments. *Crop breeding and applied biotechnology*, XIII(2), 113-119.
- Brown, T. A. (2006). *Confirmatory factor analysis for applied research*. New York: The Guilford Press.
- Byrne, B. M. (2001). *Structural equation modeling with AMOS: Basic concepts, applications, and programming*. Mahwah : NJ: Lawrence Erlbaum.

- Caballero D., A. (2006). SEM vs. PLS: Un enfoque basado en la práctica. IV Congreso de metodología de encuestas, 57-66.
- Cañadas, G. R., Gea, M. M., Contreras, J., & Roa, R. (2015). La "causalidad" y su relación con la correlación y asociación. Jornadas sobre el aprendizaje y la enseñanza de las matemáticas, 2-13.
- Castrillon, N., Pabon, B., & Reif-Acherman, S. (2011). Influencia de las condiciones del secado en el aterronamiento y la compactación del azúcar almacenado. *Ingeniería y Competitividad*, XIII(1), 9-23.
- Chen, C. J., & Chou, C. C. (1993). *Cane sugar handbook* (12th Ed. ed.). John Wiley & Sons.
- Chitprasert, P., Chedchant, J., Wanchaitanawong, P., & N., P. (2006). Effects of grain size, reducing sugar content, temperature and pressure on caking of raw sugar. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*(40), 141-147.
- Christakis, N., Wang, J., Patel, M., Bradley, M. S., Leaper, M. C., & Cross, M. (2006). Aggregation and caking processes of granular materials: continuum model and numerical simulation with application to sugar. *Advanced Powder Technology*, XVII(5), 543-565.
- CONADESUCA. (16 de octubre de 2019). Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la caña de Azúcar. Recuperado el 06 de enero de 2020, de <https://www.gob.mx/conadesuca/es/articulos/6-informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico?idiom=es>
- Cupani, M. (2012). Análisis de ecuaciones estructurales: conceptos, etapas de desarrollo y un ejemplo de aplicación. *Revista tesis*(1), 186-199.
- Escobedo P., M., Hernández G., J., Estebané O., V., & Martínez M., G. (2016). Modelos de ecuaciones estructurales: Características, fases, construcción, aplicación y resultados. *Ciencia y trabajo*, XVIII(55), 16-22.
- Flora, D. B., & Curran, P. J. (2004). An empirical evaluation of alternative methods of estimation for confirmatory factor analysis with ordinal data. *Psychological methods*, VII(4), 466-491.
- García V., M. (2011). Análisis causal con ecuaciones estructurales de la satisfacción de ciudadana con los servicios municipales . Santiago de Compostela.
- Gregoria Mateos-Aparicio Morales, H. E., & Martínez R., E. (2012). Relaciones de causalidad entre variables origen y evolución del análisis path. En J. Arribas M., A. Almazá Ll., B. Mañas R., & A. Vallejos, *Historia de la probabilidad y de la estadística VI* (págs. 217-232). Valencia: UNED. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

- Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., & Black, W. (1995). *Análisis multivariante* (5a ed.). Prentice Hall.
- Hernández A., F., Valencia O., A., Toledo G., J., & Hernández A., H. (2013). La caña de azúcar en su contexto histórico. En *El sector cañero en Nayarit desde una perspectiva organizacional y ambiental* (págs. 4-34). España: Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso.
- Hooper, D., Coughlan, J., & Mullen, M. (2008). Structural equation modelling: Guidelines for determining model fit. *The Electronic Journal of*, VI(1), 53-60.
- Kahn, J. (2006). Factor analysis in Counseling Psychology research, training and practice: Principles, advances and applications. *The Counseling Psychologist*, XXXIV(5), 684-718.
- Kapla, D. (2000). *Structural equation modeling: Foundations and extensions*. Newbury Park.
- Kenny, D. (1979). *Correlation and causality*. New York: Wiley.
- Kline, R. (2005). *Principies and practice of structural equation modeling*. New York: The Guilford Press.
- Lagos S., L., Alirio V., F., Lagos B., T., & Duarte A., D. (2013). Correlaciones genotípicas, fenotípicas y ambientales, y análisis de sendero en tomate de árbol (*Cyphomandra betacea* Cav. Sendt.). *Acta Agronómica*, LVII(3), 215-222.
- Manzano P., A. (2018). Introducción a los modelos de ecuaciones estructurales. *Investigación en educación médica*, VII(25), 67-72.
- Mazon, I. (2011). Centrifugación. En J. Perán G (Ed.), *Libro blanco del control automático en la industria de la caña de azúcar* (págs. 145-164). España: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).
- Medrano, L., & Muñoz-Navarro, R. (2017). Aproximación conceptual y practica a los modelos de ecuaciones estructurales. *Revista digital de investigación en docencia universitaria*, XI(1), 219-239.
- NMX-F-003-SCFI-2004. (s.f.). *Industria azucarera- Azúcar refinada - especificaciones*.
- NMX-F-084-SCFI-2004. (s.f.). *Industria azucarera-azúcar estándar-especificaciones*.
- Ó'Rourke, Norm, & Hatcher, L. (2013). *A step-by-step- Approach to using SAS for factor analysis and structural equation modeling*. Cary, NC: SAS institute Inc.
- Orgaz B., B. (2008). Introducción a la metodología SEM: Concepto y propósitos fundamentales. En *Metodología en la investigación sobre la discapacidad*. Introducción al uso de las ecuaciones estructurales (págs. 13-29). Salamanca: INICIO.

- Ortiz F., F., Tobón G., L. G., Alvarado L., A. M., Torres O., R., & Baes S., O. (2008). Disminución de pérdidas de sacarosa en la elaboración de meladura en un ingenio azucarero. *Revista de ingeniería industrial*, 1-24.
- Pascual-Ramírez, J., & Espinoza-Enríquez, J. &. (2016). Caracterización de la compactación del azúcar de caña (*Saccharum officinalis* L.) y propuesta para sus medidas preventivas. *Revista de simulación y laboratorio*, II(5), 106-109.
- Pérez, E., Medrano, L., & Sánchez R., J. (2013). El Path Analysis: conceptos básicos y ejemplos de aplicación. *Revista Argentina de Ciencias del Comportamiento*, V(1), 52-66.
- Ríos, F., & Delgado C., M. (2008). Cadena de valor de la caña de azúcar. En R. Bongiovanni, & M. EEA, *Economía de los cultivos industriales: Algodón, caña de azúcar, maní, tabaco, té y yerba mate* (págs. 25-31). Buenos Aires: Argentina.
- Ruiz D., M. (2008). Introducción a los modelos de ecuaciones estructurales. En *Metodología en la investigación sobre discapacidad. Introducción al uso de las ecuaciones estructurales* (págs. 43-75). Salamanca: INICIO.
- Ruiz, M. A., Pardo, A., & San Martín, R. (2010). Modelos de ecuaciones estructurales. *Papeles del psicólogo*, XXXI(1), 34-35.
- SAGARPA. (2015). SAGARPA. Recuperado el 20 de marzo de 2020, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114371/Nota\\_T\\_cnica\\_Informativa\\_Diciembre\\_2015.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114371/Nota_T_cnica_Informativa_Diciembre_2015.pdf)
- Schermelleh-Engel, K., Moosbrugger, H., & Müller, H. (2003). Evaluating the fit of structural equation models: Tests of significance and descriptive goodness-of-fit measures. *Methods of psychological research online*, VIII(2), 23-74.
- SIAP. (2018). La producción de caña de azúcar supera las 55 millones de toneladas en 2018. Recuperado el 25 de enero de 2020, de <https://www.gob.mx/siap/articulos/la-produccion-de-cana-de-azucar-supera-las-55-millones-de-toneladas-en-2018?idiom=es>
- Tait, P., Blanco, A., & Fanning, M. (2010). The implementation of a dryer/cooler conversion and short residence time conditioning system for refined sugar. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol*, CXII(1340), 464-471.
- Vega C., P., Lamanna R., R., Revollar, S., & Álvarez Z., H. (2011). Purificación y clarificación del jugo de la caña de azúcar. En J. Perán G. (Ed.), *Libro blanco de la automatización y control en la industria de la caña de azúcar* (págs. 47-69). España: Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED).
- Velásquez, F., Espitia, J., Mendieta, O., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2019). Non-centrifugal cane sugar processing: A review on recent advances and the influence of process

variables on qualities attributes of final products. *Journal of Food Engineering*, CCLV, 32-40.

Viveros V., C., Baena G., D., Salazar V., F., López, L., & Victoria k., J. (2015).

Características de la caña de azúcar asociadas con toneladas de caña por hectárea y sacarosa (% caña). *Acta Agronómica*, LXIV(3), 268-272.

Von Wobeser, G. (1988). Historia mexicana. En *La hacienda azucarera en la época colonial* (págs. 1063-1067).

Weston, R., & Gore Jr., P. A. (2006). A Brief Guide to Structural Equation Modeling. *The Counseling Psychologist*, XXXIV(5), 719-751.

Wright, S. (1923). The theory of path coefficients: A reply to Niles's Criticism. *Genetics*, 239-255.

## **CAPITULO I. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ATERRONAMIENTO DEL AZÚCAR DE CAÑA.**

### **1.1. Introducción**

La industria azucarera es considerada una de las industrias más antiguas en el mundo. Una de las primeras tecnologías que dieron paso a lo que actualmente conocemos como ingenios, fueron los trapiches, que utilizaban la fuerza de los animales para la molienda de caña de azúcar con el fin de obtener panela. Más tarde, surgieron los ingenios azucareros (Von Wobeser, 1988). En la actualidad, México cuenta con 51 ingenios azucareros, distribuidos en 7 regiones y en 15 estados (CONADESUCA, 2019).

Durante la zafra 2018-2019 en México, estuvieron en operación 50 de los 51 ingenios presentes en la república; los cuales, industrializaron un total de 804,060 ha de caña, con una molienda 57 millones de ton de caña que dieron como resultado 6,436,314 ton de azúcar (CONADESUCA, 2019). En el estado de Veracruz se concentran 18 de los 51 ingenios mencionados, donde se elaboraron alrededor de 2,499,011 ton de azúcar, de las cuales 570,146 ton corresponden a azúcar refinada elaborada sólo por 4 de los 18 ingenios presentes en el estado (CONADESUCA, 2019). Además, la agroindustria azucarera en México tiene un peso social muy importante, al proveer al menos de 2 millones de empleos de forma directa o indirecta a personas que se dedican a las actividades dentro de la cadena (Aguilar-Rivera *et al.*, 2017).

Ante este panorama, es de suma importancia realizar investigaciones pertinentes que puedan beneficiar a cada uno de los siete eslabones de la cadena de valor, entre ellos el cultivo y cosecha, el transporte de la caña del campo a la fábrica, donde es transformado en azúcar, la comercialización directa o indirecta, el transporte para la distribución del azúcar, la comercialización del producto para su uso directo, el uso industrial y por último el consumidor final (Aguilar-Rivera *et al.*, 2017).

De acuerdo con Aguilar-Rivera, (2014), la agroindustria azucarera presenta problemas de competitividad, debido a que no son autosuficientes en aspectos energéticos. Como consecuencia, México no presenta capacidad para ser un exportador de azúcar. Por esta razón, el mercado nacional se convierte en la base del comercio del azúcar. Por lo tanto, se deben centrar los objetivos en reducir costos en campo, fábrica y administración (Aguilar-Rivera N., 2010).



El atterronamiento del azúcar es un fenómeno que afecta la comercialización del producto porque no permite su fluidez durante el uso industrial, dificultando su aplicación como materia prima en la industria alimentaria. Por lo anterior, en este trabajo se utiliza el análisis causal para contribuir a la identificación y cuantificación de los factores que lo ocasionan, lo que posteriormente podría contribuir a un mejor entendimiento del fenómeno. A través de este estudio se pretende contribuir a mejorar la competitividad de la agroindustria azucarera al disminuir de manera indirecta los costos que se generan por este fenómeno que impacta directamente en la calidad del producto final.

## 1.2. Materiales y Métodos

El análisis de senderos es el modelo antecesor a las ecuaciones estructurales. Estos análisis tuvieron su inicio en 1917, cuando el genetista estadounidense Sewall G. Wright diseñó un modelo con el cual, pretendía explicar la influencia genética entre los compañeros de camada. Las relaciones encontradas por Wright se representaron en un diagrama denominado “*path diagram*”. A principios de la década de los setenta esta metodología fue retomada y mejorada por economistas y sociólogos, haciéndolo mucho más efectivo, dando paso así al denominado *path analysis*, hoy por hoy “*structural equation modeling*” (García V., 2011).

Los diagramas de sendero son un complemento fundamental de las ecuaciones estructurales, con estos diagramas es posible visualizar la teoría que se propone, ya que hacerlo con ecuaciones matemáticas dificultaría su comprensión (Medrano & Muñoz-Navarro, 2017). Para realizar la metodología de ecuaciones estructurales, es recomendable seguir seis etapas: especificación, identificación, estimación de parámetros, evaluación de ajuste, reespecificación del modelo y finalmente, la interpretación de los resultados (Cupani, 2012). En este sentido, este trabajo muestra la etapa de la especificación, en la cual es prioritario el conocimiento y la comprensión de la teoría relacionada con el fenómeno a estudiar en este caso el atterronamiento. Para lograr esta etapa de especificación, se debe llevar a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica, consulta de investigaciones anteriores y teorías relacionadas con el fenómeno. Si esta etapa no se realiza de forma adecuada, los resultados podrán derivarse en situaciones donde no se asignen correctamente los parámetros esperados.

En este estudio, se realizó una búsqueda en las bases de datos bibliográficos con las que cuenta el Colegio de Postgraduados y con el Google Scholar, estas a su vez nos dirigieron a diversas revistas como: “*Journal of Food engineering*”, “*Advanced Power Technology*”, y “*Procedia Engineering*”. Las palabras clave que se utilizaron en la búsqueda fueron: “Atterronamiento de azúcar” y “Compactación de azúcar”. Con el objetivo de ampliar la búsqueda se utilizaron “*sugar lump*”, “*lump*”, “*caking sugar*”, lo cual brindó mejores

resultados. La limitación de la fecha de la búsqueda no pudo ser menor a cuatro años, debido a que son muy pocos los estudios realizados en este fenómeno. Una vez revisados, se elaboró una tabla dividida en tres columnas donde se concentra: El nombre del autor y la fecha de su trabajo, el trabajo de investigación realizado y por último las causas que propiciaban el aterronamiento encontradas por los autores, con el objetivo de identificar y clasificar las causas. Posteriormente se realizó el diagrama de senderos, tomando como base las variables identificadas en las investigaciones señaladas en el Cuadro 4, cabe resaltar que para esta etapa no existe una metodología como tal, sino más bien los diagramas se construyen con base al entendimiento del fenómeno mostrado por los investigadores, la interacción y el sentido entre las variables con respecto al aterronamiento forman parte de los análisis estadísticos del capítulo II.

### **1.3. Resultados y Discusión**

El aterronamiento es un fenómeno que se puede observar durante las etapas de almacenamiento y distribución. El aterronamiento se debe a la sensibilidad del azúcar a las condiciones ambientales y al tamaño del grano. Estas condiciones promueven la formación de una interfaz cristalina y puentes líquidos entre los granos de azúcar que forman un conglomerado incapaz de fluir, que solo puede ser revertido por medios mecánicos (Castrillon *et al.*, 2011). El azúcar se usa principalmente para consumo doméstico y como materia prima para la industria. Cuando se presenta la característica de aterronado, se dificulta su uso, y esto es motivo de rechazo del producto (Pascual *et al.*, 2016).

Christakis *et al.* (2006) explican el aterronamiento como el intercambio de agua superficial entre las partículas del producto. Cuando se presenta este intercambio, las partículas absorben humedad y se unen por medio de puentes líquidos y cuando se desecan se vuelven sólidos. Estos puentes pueden tener diferentes resistencias relacionadas con condiciones de actividad de agua ( $A_w$ ). Con una  $A_w$  de 0.8, los puentes sólidos se vuelven dos o tres veces más fuertes que los puentes líquidos (Billings *et al.*, 2005).

Respecto a este fenómeno, se han realizado investigaciones de utilidad para los industriales azucareros con el fin de minimizar este defecto en el azúcar, así como sus repercusiones negativas. Tait *et al.* (2010), sometieron el azúcar a un secador al cual se modificó principalmente el flujo de aire, conservando la mayor parte de las piezas de la maquinaria original, pero cambiando la ubicación de algunas, para su almacenamiento en un silo, logrando con ello grandes avances en minimizar la aparición de terrones en el producto terminado, evitando con ello el uso de maquinaria provista para la descompactación de la azúcar envasada. Chitprasert *et al.* (2006) realizaron estudios sobre la aplicación de microclimas y determinar

isotermas de adsorción, a fin de demostrar la relación entre el tamaño del grano y sus propiedades higroscópicas del azúcar. Derivado de esto, se obtuvieron las condiciones de almacenamiento idóneas, como medidas de prevención; es decir, un tamaño de grano mayor a 0.425 mm y una humedad relativa menor al 67.89% a 30°C.

Otro factor asociado al aterronamiento es la humedad que migra del interior del grano al exterior, formando una corteza junto con las partículas finas en el exterior del grano (Freeman *et al.*, 2015); debido a que cuando los cristales son de menor tamaño existe mayor superficie de contacto entre las partículas. Pascual *et al.* (2016) proponen que el tamizado del azúcar se realice bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, ya que se ha observado que las partículas pequeñas son las que mayormente inician la adsorción de humedad, desencadenando el aterronamiento. En dicho estudio también se recomienda que el peso de la estiba no debe exceder de 10 ton, una vez sobrepasado este límite se presenta aterronamiento por efecto de la presión a la que se someten los cristales de azúcar.

Para poder conocer el fenómeno de aterronamiento es necesario comprender como se comporta una partícula de forma individual y como interactúa cuando es envasada a granel. Dentro de los mecanismos que se deben considerar para estudiar el fenómeno de aterronamiento, Zafar *et al.* (2017) afirma que: “las fuerzas de Van Der Waals, las fuerzas electroestáticas y las fuerzas de puentes líquidos; así como los mecanismos de contacto, como la deformación elástica, deformación plástica, superficie rugosa, formación de puentes líquidos y sólidos y polvos amorfos”, son la clave para la prevención del fenómeno de aterronamiento.

Con base en los resultados de los estudios anteriormente presentados, se elaboró el Cuadro 4, cuyo objetivo principal fue facilitar la organización de la información para la posterior construcción del diagrama de análisis de senderos (Figura 6).

**Cuadro 4.** Variables de importancia en el aterronamiento de azúcar.

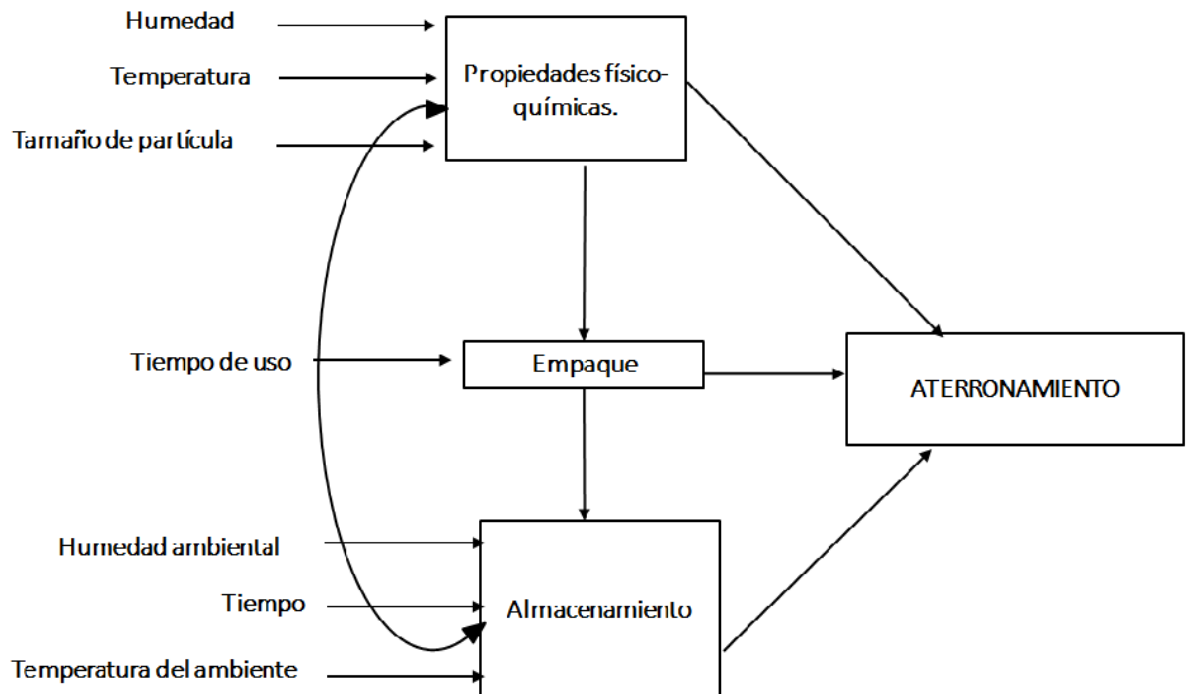
<b>Autor</b>	<b>Investigación</b>	<b>Contribución</b>
<b>Rogé &amp; Mathlouti, 2003</b>	Isotermas de sorción de vapor de agua	Tamaño de partícula (F-Q) Temperatura ambiente (A) Humedad ambiente (A)
<b>Billings <i>et al.</i>, 2005</b>	Condensación capilar	Humedad ambiente (A) Humedad del producto (F-Q) Temperatura del producto (F-Q) Tamaño de partícula (F-Q)

<b>Christakis et al., 2006</b>	Simulación numérica	Humedad ambiente (A)
<b>Chitprasert et al., 2006</b>	Efecto del tamaño de grano, azúcares reductores y presión.	Tamaño de grano (F-Q) Humedad ambiente (A) Temperatura ambiente (A)
<b>Castrillon et al., 2011</b>	La influencia de las condiciones de secado	Temperatura de almacenamiento (A) Empaque (E) Partículas finas (F-Q)
<b>Pascual et al., 2016</b>	Caracterización del fenómeno	Humedad ambiental (A) Tamaño de grano (F-Q) Empaque (E) Temperatura de almacenamiento (A)
<b>Zafar et al., 2017</b>	Polvos a granel	Tamaño de partícula (F-Q) Humedad del producto (F-Q)

**Fuente:** Elaboración propia a partir de la revisión en las principales revistas científicas. **F-Q** representa variables fisicoquímicas, **A** variables atribuidas al ambiente y **E** variables relacionadas con el empaque.

A partir de la información anterior se construyó un diagrama de senderos (Figura 6) en el que se muestra la relación entre las variables que influyen en la formación del aterronamiento en azúcar de caña con base en el Cuadro 4, capítulo 1: las propiedades fisicoquímicas (humedad interna, temperatura y tamaño de partícula), empaque (tiempo de uso de los sacos) y el almacenamiento (humedad ambiental, tiempo de permanencia en el almacén y temperatura ambiente). En el diagrama se puede apreciar que estas variables se encuentran dentro de un rectángulo, esto debido a que son denominadas variables observadas y se definen así ya que se pueden medir de forma directa (Manzano, 2017). Estos rectángulos están unidos mediante flechas rectas de una punta, representando que la flecha tiene su origen en la variable que ejerce la influencia (variable independiente) y termina en la variable que se predice (variable

dependiente), que en este caso corresponde al aterronamiento. En el caso de la flecha con doble punta representa una covariación entre las variables.



**Figura 6.** Diagrama de análisis de senderos del fenómeno causa-efecto del aterronamiento del azúcar de caña. Fuente: elaboración propia producto del análisis.

Para que un fenómeno sea considerado causal, debe de cumplir con la condición de que; la variable X es la causante de una variable Y; por lo tanto, al ocurrir X se presenta Y. La variable Y no puede presentarse sin la previa aparición de X (Caballero, 2006). Bajo esta condición se puede observar en el diagrama de senderos que:

- Cada una de las tres variables observables, como lo son las propiedades físicoquímicas (PF), el empaque y el almacenamiento, tienen un efecto directo sobre el aterronamiento, ya que de cada una surge una flecha que apunta hacia la variable dependiente (aterronamiento).
- Que las propiedades físicoquímicas tienen un efecto indirecto sobre el aterronamiento a través del empaque, es decir, que el efecto de las propiedades físicoquímicas en el aterronamiento se ven afectadas a través del empaque. Por ejemplo: si la humedad que presenta el azúcar es alta, esta se verá afectada en su migración hacia el ambiente, lo cual puede propiciar condiciones para que se presente el aterronamiento.

- También es posible observar el efecto indirecto de las PF en el aterronamiento a través de las condiciones de almacenamiento. Por ejemplo, en varias investigaciones se ha señalado que las condiciones ambientales (temperatura ambiente y humedad relativa) presentes al interior de los almacenes son factores que influyen en el fenómeno de aterronamiento (Rogé & Mathlouti, 2003, Billings *et al.*, 2005, Christakis *et al.*, 2006, Chitprasert *et al.*, 2006, Castrillon *et al.*, 2011, Pascual *et al.*, 2016 y Zafar *et al.*, 2017)
- Respecto al empaque Castrillón *et al.* (2011) señalaron que el empaque actúa como una barrera en la migración de la humedad y la temperatura interna del producto, su efecto en la disminución de la velocidad de migración, por ejemplo, de la humedad puede llegar a propiciar el aterronamiento, en especial en los empaques de polipropileno con una capa interna llamada “liner”; la cual, actúa como una protección contra la contaminación del producto. Este hallazgo coincide con la percepción de quienes manejan presentaciones de empaque de mayor contención de producto (1 y 1.5 ton), denominados supersacos. Estos supersacos son reusados hasta completar entre 8 y 10 períodos (zafra) de uso, a diferencia de los sacos de 50 kg que son utilizados sólo una vez, la reutilización de los supersacos conlleva un desgaste de la capa interna (liner), motivo por el cual la percepción del personal de almacenamiento del azúcar en supersacos nuevos se presenta con mayor frecuencia el aterronamiento que en sacos reusados.

El diagrama de senderos (Figura 6) representa en forma esquemática e hipotética el fenómeno causal del aterronamiento del azúcar de caña, en el que las magnitudes y significancia estadística de estas variables independientes (físicoquímicas, empaque y almacenamiento) respecto a la variable dependiente (aterronamiento), son posibles de ser evaluadas a través de los modelos de ecuaciones estructurales (SEM, por sus siglas en inglés). A través de esta técnica estadística multivariada se puede medir el efecto (peso) y la significancia de ésta en el fenómeno en estudio. En el Capítulo II se mostrará el resultado del uso de los SEM, pero sólo para las variables físicoquímicas dada la limitante que se tuvo de contar con información referente al empaque y a las condiciones de almacenamiento.

#### **1.4. Conclusiones**

Con base en los pocos estudios publicados relacionados con fenómeno de aterronamiento de azúcar de caña, se identificaron aquellas variables relacionadas con este fenómeno. Entre ellas, las propiedades físicoquímicas del azúcar (humedad interna, temperatura y tamaño de partícula), el empaque de polipropileno (liner) y las condiciones de almacenamiento (humedad

relativa y temperatura ambiental). El efecto directo e indirecto de estas variables puede propiciar la formación de estructuras de asociación entre los cristales del azúcar, generando con ello la formación de terrones. El análisis de las variables que promueven el aterronamiento, encontrados a través del estudio de las diferentes publicaciones permite tener una representación gráfica del fenómeno, representado como un diagrama de análisis de senderos, que servirá para las decisiones y planteamiento de futuros estudios, en especial con estudios relacionados en la cuantificación de la magnitud con la que estos factores inducen el aterronamiento en el azúcar de caña.

### **1.5. Literatura citada**

- Aguilar- Rivera, N. (2014). Reconversión de la cadena agroindustrial de la caña de azúcar en Veracruz México. *Nova Scientia*, VI(12), 125-161.
- Aguilar-Rivera N., R.-L. D.-M. (2010). Azúcar, coproductos y subproductos en la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. . *VirtualPro Procesos Industriales*, CVI, 1-28.
- Aguilar-Rivera, N., Debernadi-Vázquez, T., & Herrera-Paz, H. (2017). Subproductos, coproductos y derivados de la agroindustria azucarera. *Agroproductividad*, X(11), 13-20.
- Billings, S., Bronlund, J., & A.H.J., P. (2006). Effects of capillary condensation on the caking of bulk sucrose. *Journal of Food Engineering*, LXXVII(4), 887-895.
- Caballero D., A. J. (2006). SEM vs. PLS: UN ENFOQUE BASADO EN LA PRACTICA. IV Congreso de Metodología de Encuestas, 57-66.
- Castrillon, N., Pabon, B., & Reif-Acherman, S. (2011). Influencia de las condiciones del secado en el aterronamiento y la compactación del azúcar almacenado. *Ingeniería y Competitividad*, XIII(1), 9-23.
- Chitprasert, P., Chedchant, J., Wanchaitanawong, P., & N., P. (2006). Effects of Grain Size, Reducing Sugar Content, Temperature and Pressure on Caking of Raw Sugar. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*(40), 141-147.
- Christakis, N., Wang, J., Patel, M., Bradley, M. S., Leaper, M. C., & Cross, M. (2006). Aggregation and caking processes of granular materials: continuum model and numerical simulation with application to sugar. *Advanced Powder Technol*, XVII(5), 543-565.

- CONADESUCA. (16 de octubre de 2019). Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la caña de Azúcar. Recuperado el 06 de enero de 2020, de <https://www.gob.mx/conadesuca/es/articulos/6-informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico?idiom=es>
- Freeman, T., Brockbank, K., & Armstrong, B. (2015). Measurement and quantification of caking in powders. *Procedia Engineering*, CII, 35-44.
- García V., M. (2011). Análisis causal con ecuaciones estructurales de la satisfacción de ciudadana con los servicios municipales . Santiago de Compostela.
- Manzano P., A. (2018). Introducción a los modelos de ecuaciones estructurales. *Investigación en educación médica*, VII(25), 67-72.
- Pascual-Ramírez, J., & Espinoza-Enríquez, J. &. (2016). Caracterización de la compactación del azúcar de caña (*Saccharum officinalis* L.) y propuesta para sus medidas preventivas. *Revista de simulación y laboratorio*, II(5), 106-109.
- Tait, P., Blanco, A., & Fanning, M. (2010). The implementation of a dryer/cooler conversion and short residence time conditioning system for refined sugar. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol*, CXII(1340), 464-471.
- Von Wobeser, G. (1988). Historia mexicana. En *La hacienda azucarera en la época colonial* (págs. 1063-1067).
- Zafar, U., Vivacqua, V., Calvert, A., Ghadiri, M., & Cleaver, J. (2017). A review of bulk powder caking. *Powder Technology*, CXIII, 389-401.



## **CAPITULO II. EVALUACIÓN DE MODELO CAUSAL DEL FENÓMENO DE ATERRONAMIENTO DE CAÑA DE AZÚCAR A TRAVÉS DE LOS MODELOS DE ECUACIONES ESTRUCTURALES**

### **2.1. Introducción**

Los modelos de ecuaciones estructurales (SEM, por sus siglas en inglés) reciben este nombre debido a la utilización de una serie de ecuaciones para hacer una representación de los diagramas de senderos en sistemas de ecuaciones simultáneas (Ruiz *et al.*, 2010). Estos modelos se crearon como alternativa a los restrictivos modelos de regresión y desde el punto de vista de Bollen (1989) los SEM combinan el análisis factorial con la regresión lineal, estudian las relaciones causales a través de información no experimental (Samperio P., 2019).

La razón por la cual se recurre a los SEM es por su capacidad para representar la causalidad entre variables, esta relación de causalidad debe tener una excelente base teórica. Por esto es muy importante tener presente lo que menciona Ruiz *et al* (2010): “los modelos de ecuaciones estructurales se utilizan en estudios de tipo correlacional, donde solo se observa la magnitud de las variables y estas nunca son manipulables”. Gracias a la flexibilidad que presentan, han sido utilizadas en diferentes disciplinas y en diversos fenómenos, teniendo mayor auge en las ciencias sociales. Un ejemplo de su amplia aplicación es en la investigación de la enfermería, donde se buscaba evaluar la relación entre la satisfacción de las enfermeras, la satisfacción del cliente y el síndrome de Burnout (un trastorno relacionado con el estrés). De acuerdo con la evidencia empírica que encontraron los investigadores, plantearon las siguientes relaciones: la satisfacción laboral favorece el desarrollo del síndrome de Burnout y este síndrome a su vez influye en la satisfacción laboral, de esta forma se presentan una relación bidireccional. Por otro lado, estos dos pueden tener influencia en la satisfacción del cliente (Arrogante, 2018). En áreas más relacionadas al ámbito alimentario, se encontraron investigaciones relacionadas principalmente a la intención de compra de un producto agroalimentario tradicional, evaluando la relación entre la calidad, satisfacción y la intención de volver a comprar la marca. En otro caso de estudio desarrollado por Espejo *et al.*, (2007) se evaluó la percepción de los consumidores respecto a la calidad del aceite de oliva con denominación de origen protegida; los autores tenían la hipótesis de que sí se contaba con esta distinción podría tener el producto mayor ventaja competitiva frente a la competencia. Por último, los modelos SEM también se han utilizado para estudiar el comportamiento de los consumidores de carne de ternera, en el que los autores sugieren más en las causas de las fluctuaciones en el consumo de carne (López & Rivera, 2005).

En el presente estudio se hará uso de las ecuaciones estructurales para estudiar el fenómeno de aterronamiento como un fenómeno causal, lo cual nos permitirá un análisis más detallado del efecto de los factores que intervienen en ese proceso de aglomeración de los cristales de azúcar de caña. El análisis tendrá como base la evaluación a través de los modelos de ecuaciones estructurales del diagrama de senderos presentado en el capítulo anterior, el cual se construyó a partir de la revisión de literatura e identificación de variables relevantes al fenómeno.

## **2.2. Materiales y métodos**

El presente estudio se enfocó en el análisis de causa y efecto (causalidad) del aterronamiento de azúcar refinada de caña producida en las zafras 2017-2018 y 2018-2019 de dos ingenios azucareros de la región de la Cuenca del Papaloapan. La presentación del azúcar evaluado fue en supersacos de 1.5 ton almacenados en bodegas ubicadas en la zona de Peñuela y Paraje, Veracruz. Debido a que de esta presentación es de la que se tiene acceso a los datos.

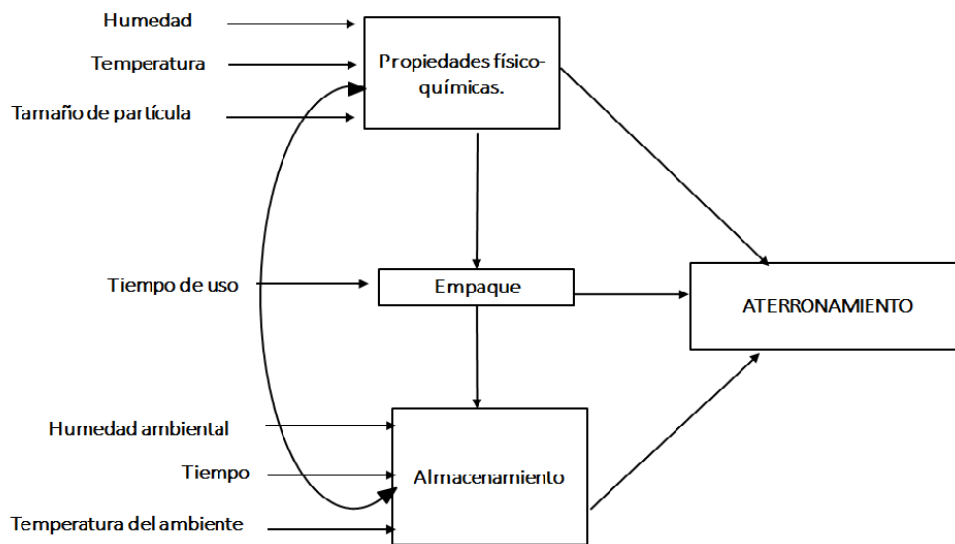
Las propiedades fisicoquímicas corresponden a variables cuantitativas medidas por los laboratorios de Control de Calidad de los ingenios de acuerdo con la trazabilidad de los lotes almacenados en los puntos de embarque descritos en el párrafo anterior. Cabe señalar que los valores corresponden a los análisis realizados al producto en su fecha de elaboración. La variable dependiente (aterronamiento) es una variable cualitativa dicotómica medida en escala nominal en los que a través de la observación se evaluó la presencia o ausencia del aglomerado de los cristales de azúcar por parte del personal de calidad del ingenio. Este fenómeno se registró al momento de que el producto fue desestibado de las estibas para ser trasladado a su punto de venta. El tiempo que el producto duró en condiciones de almacenamiento fue variable, teniendo un rango de 6 a 11 meses de almacenado en estibas con una altura máxima de 9 supersacos (1.5 ton por supersaco).

Para llevar a cabo el estudio de un fenómeno utilizando el modelo de ecuaciones estructurales, los especialistas recomiendan una serie de pasos para su aplicación (Cupani, 2012), tales como:

La especificación, La identificación, La estimación de parámetros, La evaluación del ajuste, La re-especificación del modelo Y la interpretación de los resultados

### ***Especificación***

La etapa de **especificación** se abordó en el primer capítulo, esta se centró en recolectar el máximo conocimiento teórico que se tuviera del fenómeno de aterronamiento de azúcar de caña, a través de la revisión de literatura. Este conocimiento nos permitió representar las interacciones en un diagrama de senderos como se muestra en la Figura 7. Donde se observa que el fenómeno de aterronamiento depende directamente de variables como propiedades fisicoquímicas, empaque y de las condiciones durante el tiempo de almacenamiento. Por otra parte, también se tienen efectos indirectos por efecto del empaque a través del tiempo de almacenamiento. La flecha con doble punta representa una correlación o covariación entre las propiedades fisicoquímicas y el almacenamiento. Las variables encerradas en un rectángulo son porque se consideran variables observadas, dado que se pueden medir de forma directa por sus indicadores (Manzano, 2017). Por ejemplo, entre las propiedades fisicoquímicas señalan por varios investigadores son la humedad del producto, temperatura interna del producto y el tamaño de partícula, el empaque con el tiempo de uso de los supersacos o el uso de liner en los sacos de polipropileno (Chitprasert *et al.*, 2006, Castrillon *et al.*, 2011, Pascual *et al.*, 2016). Por último, el almacenamiento está dado por variables como la humedad ambiental, el tiempo que permanecen los sacos en el almacén y la temperatura promedio del ambiente.



**Figura 7.** Diagrama de senderos del aterronamiento de azúcar refinada. Fuente: elaboración propia.

### **Identificación**

La siguiente etapa una vez especificado el modelo es la identificación, la cual se realiza antes de la recolección de los datos (Medrano & Muñoz-Navarro, 2017). (Medrano & Muñoz-

Navarro, 2017)y Cupani (2012) proponen la utilización de los grados de libertad para saber si el modelo está identificado realmente con la siguiente formula

$$gl = \frac{1}{2} [N^{\circ} \text{ de variables observadas} \times [N^{\circ} \text{ de variables observadas} + 1]] - N^{\circ} \text{ de parametros a estimar}$$

De igual forma nos dan una serie de valores de referencia que servirán para evaluar la identificación del modelo como se presenta en el Cuadro 5.

**Cuadro 5.** Valores de referencia para la evaluación de la identificación de un modelo de ecuaciones estructurales.

gl < 0	subidentificado
gl = 0	identificado
gl > 0	sobreidentificado

Fuente: Elaboración propia a partir de (Medrano & Muñoz-Navarro, 2017). **gl:** grados de libertad

Solo aquellos modelos que tengan grados de libertad mayores a cero serán aptos para ser estimados y contrastados (Medrano & Muñoz-Navarro, 2017). Cuando un modelo no cuenta con grados de libertad, es muy posible que la matriz de varianza-covarianza observadas se ajusten a cualquier conjunto de datos evitando que puedan ser contrastados (Medrano & Muñoz-Navarro, 2017).

### **Estimación**

En esta etapa es donde se contrasta la hipótesis de que la matriz de varianzas y covarianzas de la población es igual a la del modelo teórico  $H_0: S = \Sigma$  (Manzano, 2018). En esta fase se aborda un punto importante de esta metodología, esto se refiere al tamaño de muestra, la mayoría de los autores sugieren un tamaño de muestra no debe ser menor a los 200 sujetos para cualquier SEM (Cupani, 2012) y (Manzano, 2018), aunque se debe considerar que modelos más complejos requieran de un tamaño de muestra mayor (Vargas H. & Mora-Esquivel, 2017), también hay que tomar en cuenta la multicolinealidad, es decir cuando hay variables altamente correlacionadas por lo que se consideran redundantes, por lo tanto se debe eliminar uno de ellas. Además, se debe perder de vista el cumplimiento de la distribución normal multivariada (Cupani, 2012). La estimación a través del método de máxima verosimilitud (ML, por sus siglas en inglés) es que se utiliza con mayor frecuencia, esto siempre

que se cumplan los supuestos que se mencionaron anteriormente, en caso contrario están los métodos de mínimos cuadrados ordinarios y mínimos cuadrados generalizados.

Durante esta fase para la presente investigación se realizó la construcción de la base de datos, cuyos datos fueron proporcionados por un grupo azucarero de la región de la cuenca del Papaloapan, la base de datos abarcó los registros de las dos últimas zafas (2018 y 2019), la información proporcionada correspondió sólo de ciertas variables observadas como propiedades fisicoquímicas y la variable de aterronamiento, desafortunadamente no fue posible contar con datos consistentes de almacenamiento y empaque, lo cual se convirtió en una limitante de esta investigación.

### ***Evaluación***

En esta etapa, de acuerdo con Weston & Gore Jr. (2006), “se determina si las relaciones entre las variables del modelo estimado reflejan adecuadamente las relaciones observadas en los datos”. En los SEM, a diferencia de otras técnicas, se evalúa la diferencia de covarianza de la muestra y la del modelo teórico. Se tienen tres principales estadísticos de bondad de ajuste: los absolutos, relativos y los de parsimonia. Cupani, (2012), Medrano & Muñoz-Navarro, (2017) y Manzano, (2018) recomiendan usar más de un indicador para llevar a cabo la evaluación del ajuste teórico propuesto del fenómeno en estudio. En el Cuadro 6 se muestran los valores de referencia de algunos de los indicadores propuestos para valorar la bondad de ajuste del modelo.

**Cuadro 6. Valores de referencia de los indicadores de ajuste de un modelo de ecuaciones estructurales**

<b>Indicador</b>	<b>Valor de referencia</b>
Índice de ajuste comparado (CFI)	Mayores a .90 aceptable y el óptimo de .95
Índice de ajuste no normado (TLI)	Mayores a .90 aceptable y el óptimo de .95
Raíz cuadrada media del error de aproximación (RMSEA)	Menor a .8 aceptable y el óptimo es de .6
Índice de bondad de ajuste (GFI)	Mayores a .90 aceptable y el óptimo de .95

**Fuente:** Elaboración propia a partir de Cupani, (2012; Medrano & Muñoz-Navarro, (2017) y Manzano, (2018)

Para el desarrollo del presente capítulo se presentaron limitantes en la construcción de la base de datos debido a la falta en la consistencia de información de las variables de empaque y almacenamiento. Ya que no se lleva un registro del tiempo de uso de los supersacos en los ingenios; es decir, no se contabilizan las vueltas de reúso de estos empaques de polipropileno con “liner” en su capa interna. Esto limitó evaluar el efecto que pudiera tener la variable empaque en propiciar las condiciones para la formación de terrones en el azúcar. En relación con la variable ambiente no se llevan registros por parte de los ingenios de la humedad y temperatura del ambiente dentro del almacén o el tiempo que permanece un saco dentro de almacén; sin embargo, si se cuenta con los datos del producto que presenta aterronamiento y propiedades fisicoquímicas bajo las cuales se propició el fenómeno como: color U.I., % humedad, pureza y % de granulometría, estos datos que fueron utilizados para este estudio

### **Análisis estadístico**

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de las variables cuantitativas y de la variable cualitativa con el software Minitab 18®. Para el análisis causal del diagrama de senderos se utilizó PROC CALIS del software estadístico SAS versión 9.4. La metodología de análisis de los modelos SEM se basó en Cupani (2012) y Ó'Rourke, Norm, & Hatcher, L. (2013), tal y como se señala a continuación.

## **2.3. Resultados y discusión**

### *Análisis estadístico descriptivo*

En el Cuadro 7, se muestra el resumen de las estadísticas descriptivas de las variables incluidas en el diagrama de senderos limitado. El color Promedio fue de 26.03 UI, valor aceptable para azúcar refinado de acuerdo con la norma NMX-F-003-SCFI-2004 para azúcar refinada. La pureza promedio fue de 99.91% con un coeficiente de variación de 0.06%, lo cual indica que la pureza en todos los lotes es muy similar. La humedad de igual forma se encuentra dentro de los valores establecidos por la norma para azúcar refinada con un valor promedio de 0.0244% y un coeficiente de variación de 14.57%, lo cual nos indica una variabilidad aceptable en los datos. Granulometría fue de 3.48% en promedio con un coeficiente de variación de 34.18% entre lotes, lo que significa que existe una alta variabilidad en el tamaño de los cristales de azúcar refinada.

**Cuadro 7. Estadísticas descriptivas de las variables incluidas en el diagrama de senderos**

Variable	Media $\pm$ ee	Desviación estándar (sd)	Coefficiente de Variación (CV)
Color IU	26.04 $\pm$ 0.11	2.95	11.35
Pureza (%)	99.91 $\pm$ 0.00	0.06	0.06
Humedad (%)	0.02 $\pm$ 0.00	0.00	14.57
Granulometría (%)	3.48 $\pm$ 0.04	1.19	34.18

Fuente: Elaboración propia con datos físicos y químicos promedio, obtenidos de Ingenios. **ee**: error estándar, **sd**: desviación estándar, **CV**: coeficiente de variación

### *Análisis SEM*

Considerando estas limitantes del modelo teórico (diagrama de senderos, Figura 7) propuesto, solo se obtuvieron los datos de la variable denominada propiedades fisicoquímicas (humedad interna, granulometría, color y pureza) y de la variable dependiente (aterronamiento).

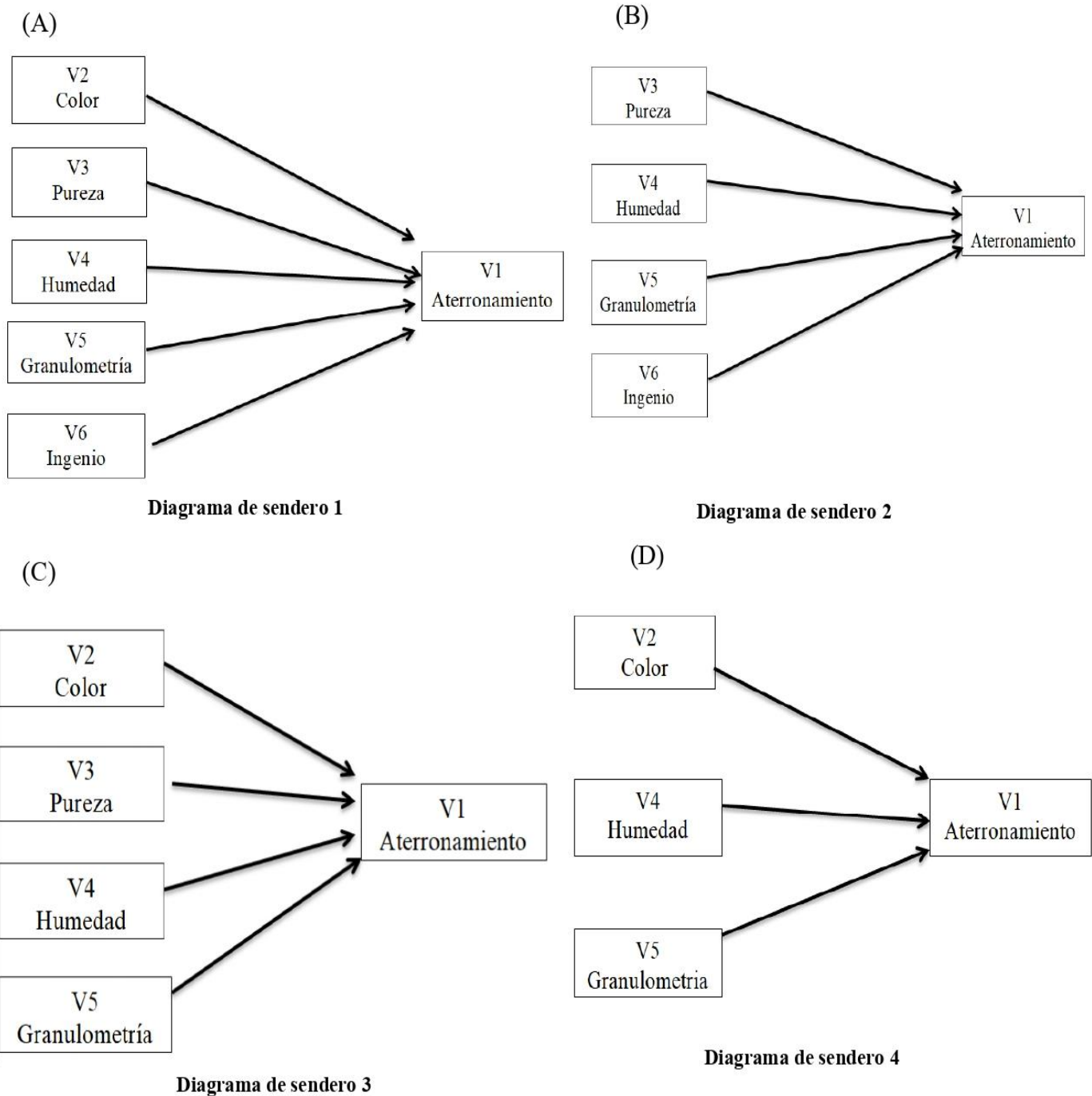
Cuando un modelo de ecuaciones estructurales está formado únicamente por variables de tipo observables (que se pueden medir de forma directa) caen en un análisis particular dentro de los modelos de ecuaciones estructurales denominados path analysis (Stage *et al.*, 2004).

La particularidad que tiene el path analysis dentro de los modelos de ecuaciones estructurales radica en que los primeros están constituidos sólo por variables observables, con las que se pretenden estimar la asociación entre las variables, mientras que en su forma general los modelos de ecuaciones estructurales se incluye también el análisis de variables latentes; es decir, el modelo teórico (diagrama de senderos) está constituido tanto por variables observables y latentes (Keith, 2015).

Del diagrama de senderos propuesto para explicar el fenómeno de aterronamiento como un fenómeno causal (Figura 7) se eliminaron las variables empaque y almacenamiento, quedando sólo las variables fisicoquímicas. A partir de esta modificación se construyeron 7 diagramas de senderos propuestos en los que se contemplan variables como: aterronamiento (variable dicotómica), color U.I., pureza, % de humedad y % de granulometría. Estos diagramas tienen el mismo sustento teórico que el diagrama principal, solo que ahora está enfocado a las propiedades fisicoquímicas que provocan el aterronamiento.

El diagrama de sendero 1 (Figura 8 A) se toma como base para explicar la metodología SEM, cuya metodología será la misma para los diagramas de sendero del 2 al 4 (Figura 8 B, C y D respectivamente). La diferencia entre ellos obedece a la significancia estadística de las

variables independiente de acuerdo con su rol en el diagrama de sendero. Se puede observar que el diagrama de sendero 1 está formado por 6 rectángulos o cuadrados, esto significa que son variables observables; es decir, que se pueden medir de forma directa, en este caso: V1 representa el aterronamiento, V2 el color U.I., V3 la pureza del azúcar, V4 la humedad interna, V5 la granulometría o el tamaño de partícula y por último V6 el ingenio de donde proviene el azúcar.



**Figura 8.** Diagramas de sendero de efectos directos de las variables independientes sobre la variable de respuesta “aterronamiento”

**Fuente:** Elaboración propia.



De las variables V2, V3, V4, V5, V6 se origina una flecha hacia la variable V1, las variables que están en el origen de la flecha son las que ejercen cierta influencia sobre la que está al final de la flecha; es decir, las del lado izquierdo son variables independientes y la variable dependiente está al lado derecho. De esta forma se espera que el color U.I., la pureza, la humedad interna, la granulometría y el ingenio de procedencia tengan alguna influencia sobre el aterronamiento. Se sabe que el diagrama de sendero es la representación gráfica de un sistema de ecuaciones, que serán utilizados para la estimación de los coeficientes de sendero. La ecuación que representa el diagrama de sendero 1 se expresa de la siguiente forma:

$$V1 = PV1V2 V2 + PV1V3 V3 + PV1V4 V4 + PV1V5 V5 + PV1V6 V6 + E1$$

Donde PV1V2 representa la trayectoria que va desde V2 hasta V1, V1 al ser una variable endógena, que recibe el efecto de otras, se debe considerar los factores de variabilidad o el error asociado a esta variable y se representarla al final de la ecuación con E1. P representa el coeficiente de sendero (path coefficient), que corresponde a la magnitud positiva o negativa de la variable independiente respecto a la dependiente, su valor difiere para cada variable independiente y nos permite identificar la variable con mayor peso en el fenómeno. La ecuación anterior se expresa de esta forma, ya que así se ingresó al procedimiento PROC CALIS del programa estadístico SAS.

Los diagramas de sendero 2, 3 y 4 (Figuras 9) tienen la misma estructura que el diagrama de sendero 1, con la diferencia de que no presentan la misma cantidad de variables independientes.

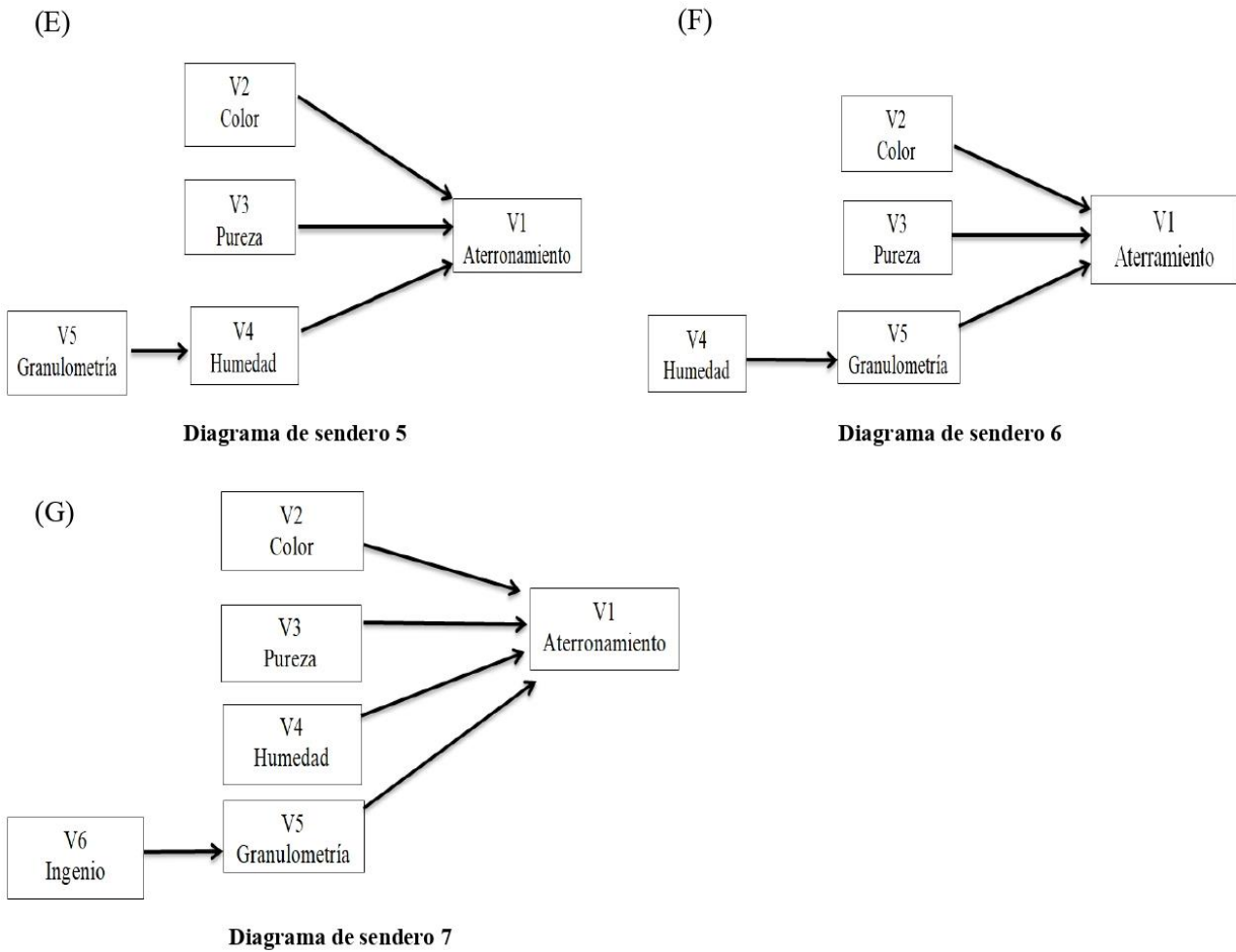
Los diagramas de senderos 5, 6 y 7 (Figura 8. E, F y G), cambian respecto a los anteriores dado que en estos casos se adiciona la presencia de una variable endógena más; es decir, una variable endógena es aquella que tiene doble función, ya que recibe un efecto y a la vez realiza un efecto, como en el diagrama 5 la variable 4 es endógena (Figura 12). En el diagrama de sendero 5 se considera que el color, la pureza y la humedad interna tienen efecto directo sobre el aterronamiento y que a su vez la granulometría (V5) tiene un efecto indirecto en el aterronamiento a través de la humedad interna. Este cambio en el sendero de alguna de las variables implica un cambio en la representación de la ecuación, por lo que la expresión queda de la siguiente forma:

$$V1 = PV1V2 V2 + PV1V3 V3 + E1$$

$$V4 = PV4V5 V5 + E2$$

Desde el punto de vista teórico, las variables endógenas están asociadas a errores aleatorios, los cuales se representan en los diagramas de sendero como E1 y E2.

En los diagramas de sendero 6 y 7 se tiene la misma forma de los senderos que en el diagrama de sendero 5 y a su vez la misma estructura de las ecuaciones, cambiando sólo la posición de algunas variables, esto se puede observar en el diagrama de sendero 5 (figura 9 E) donde la granulometría tiene un efecto indirecto con el aterronamiento a través de la variable de humedad, caso contrario al diagrama de sendero 6 (figura 9 E), Mientras que el diagrama de sendero 6 (figura 9 G) se añade la variable ingenio al modelo.



**Figura 9** Diagramas de sendero de efectos indirectos de las variables dependientes e independientes sobre la variable respuesta “aterronamiento” **Fuente:** Elaboración propia.

La evaluación de cada uno de los diagramas de sendero propuestos se realizó a través de los índices de bondad de ajuste de cada uno de los modelos propuestos. Ó'Rourke, Norm, & Hatcher (2013) recomiendan basar el análisis de los diagramas de sendero tomando en cuenta más de un índice de bondad para evaluar el ajuste (índice absoluto, índice de parsimonia e índice incremental). En el Cuadro 8 se muestran los índices de bondad de ajuste recomendados para evaluar los modelos como índices de ajuste absoluto se consideró: chi- cuadrada, los grados de libertad y la raíz cuadrática media estandarizada residual ( $\chi^2$ , gl y SRMR); así como

los índices de parsimonia como el error cuadrático medio y su límite de confianza (RMSEA y RMSEA 90) y el índice incremental el índice de ajuste comparativo (CFI).

**Cuadro 8. Índices de bondad de ajuste de los modelos. Elaboración propia a partir de la base de datos.**

Modelo	$\chi^2$	df	CFI	SRMR	RMSEA	RMSEA 90
1	0	0	1	0	.	.
2	<b>0.7541</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0.0058</b>	<b>0</b>	<b>0.0000-0.0960</b>
3	<b>1.1372</b>	<b>1</b>	<b>0.9998</b>	<b>0.0069</b>	<b>0.0142</b>	<b>(0.0000-0.1036)</b>
4	0	0	1	0	.	.
5	286.7412	3	0.1028	0.1524	0.3719	(0.3361-0.4089)
6	<b>36.5642</b>	<b>3</b>	<b>0.8939</b>	<b>0.0592</b>	<b>0.1279</b>	<b>(0.0928-0.1665)</b>
7	<b>4.1077</b>	<b>4</b>	<b>0.9998</b>	<b>0.0132</b>	<b>0.0063</b>	<b>(0.0000-0.0584)</b>

$\chi^2$ =chi cuadrada, **df** = grados de libertad, **CFI**= índice de ajuste comparativo, **SRMR**= raíz cuadrada media estandarizada residual, **RMSEA**=error cuadrático medio de aproximación, **RMSEA 90** = límites de confianza del 90% RMSEA.

Estos índices deben estar dentro cierto rango de acuerdo con Ó'Rourke, Norm, & Hatcher,(2013) como se muestra en el cuadro 9, estos índices de referencia permiten saber si el modelo se encuentra ajustado o no y esto ayudará a la selección del modelo más adecuado.

**Cuadro 9. Referencias de los índices de bondad de ajuste.**

Índice	Referencia
$\chi^2$	Cercano a 0
SRMR	< 0.9
RMSEA	< 0.9
CFI	> 0.94

$\chi^2$ =chi cuadrada, **SRMR**= raíz cuadrada media estandarizada residual, **RMSEA**=error cuadrático medio de aproximación, **CFI**= índice de ajuste comparativo

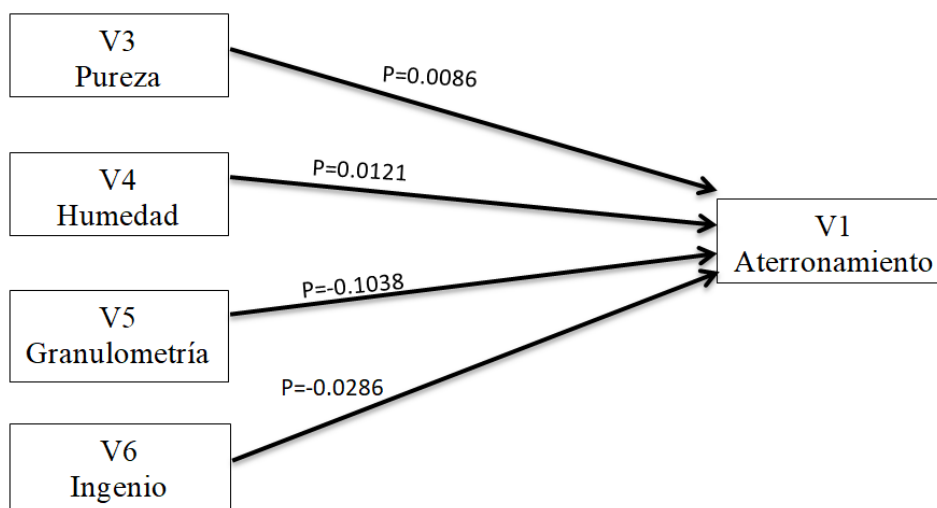
**Fuente:** Elaboración propia a partir de Ó'Rourke, Norm, & Hatcher, (2013).

Considerando los valores de referencia del Cuadro 9, se puede corroborar que el modelo 5 tiene un valor de  $\chi^2$  muy elevado, lo cual lo convierte en un modelo sobrestimado; mientras que los modelos 1, 4 y 5 (Cuadro 8) solo se ajustan a uno de los 3 índices propuestos en el Cuadro 9, lo que los convierte en modelos poco confiables. En lo que respecta a los modelos 2, 3, 6 y 7, se puede verificar que presentan valores aceptables en lo por lo menos dos de los tres índices reportados ( $\chi^2$ , CFI, SRMR, RMSEA o RMSEA 90)(Ó'Rourke, Norm, & Hatcher, 2013).

Una vez seleccionados los modelos candidatos (2, 3, 6 y 7), se procedió a colocar los valores de los coeficientes estandarizados estimados en sus respectivos senderos en los diagramas de las Figuras 10,11,12 y 13); así como las ecuaciones estructurales respectivas a cada modelo.

En la Figura 10, se representa el diagrama de sendero 2, con los valores de los coeficientes estandarizados. Comparando los coeficientes del diagrama de senderos que se encuentran representados con la letra P en cada uno de los senderos, se puede observar que la V3 (pureza) nos señala que a mayor pureza menor será la tendencia a presentarse el aterronamiento. Lo mismo ocurre cuando el azúcar esta menos húmeda V4 (humedad interna), mientras que V5 (granulometría) indica que se tiene una relación inversa; es decir, que a menor tamaño de partícula mayor será la tendencia al aterronamiento. Estos hallazgos coinciden con lo encontrado en las investigaciones realizadas por Freeman *et al.* (2015); Pascual *et al.* (2016) y Chitprasert *et al.* (2006) quienes indican que la humedad que migra del interior del grano de azúcar se forma una película y que junto con las partículas finas presentes crean una especie de puente, desencadenando así el aterronamiento. En lo que respecta a la variable ingenio (V6), el ingenio 1 se caracteriza por tener tamaños de cristales de azúcar mayores a los del ingenio 2, lo cual se corrobora con el coeficiente estandarizado (-0.0286) que señala una relación inversa respecto al aterronamiento; es decir, hay menor tendencia al aterronamiento en el ingenio 1 en comparación con el ingenio 2

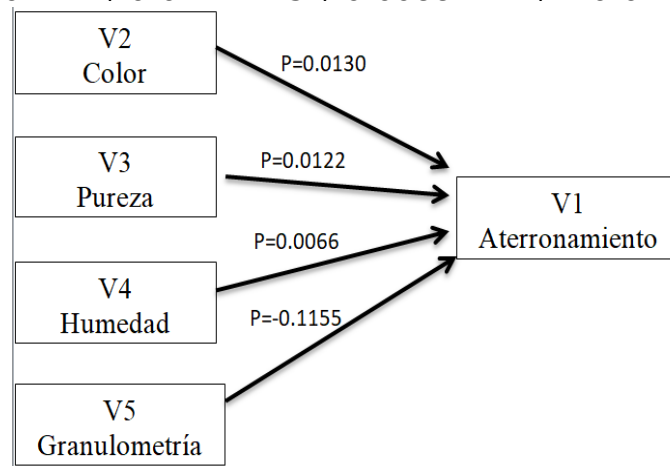
$$V1 = 0.00862 * V3 + 0.0121 * V4 + -0.01038 * V5 + -0.0286 * V6 + 1.0000 E1$$



**Figura 10.** Diagrama de sendero 2 de efectos directos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterronamiento. **Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 11 no se consideró la variable ingenio (V6) a diferencia del modelo de la Figura 10 que, si la incluye, esto se debe a que se quería comprobar la interacción de ingenio con las demás variables. La variable V2 (Color U.I.), muestra un efecto directo positivo igual a 0.0130, esto señala que, a mayor cantidad de color, el azúcar tendera a aterrornarse, esto coincide con la presencia de mayor cantidad de mieles residuales alrededor de los cristales con valores altos de U.I. Las variables V2 (color), V3 (pureza) y V4 (humedad interna) muestran un efecto directo con valor positivo de 0.0130,0.0122 y 0.0066 respectivamente. Esto quiere decir que cuando se tengan valores altos de estas 3 variables mayor será su efecto en el aterronamiento. Mientras que la variable V5 (granulometría) obtuvo un valor negativo de -0.0115 lo que indica que entre menor sea el tamaño del grano en el azúcar mayor efecto tendrá sobre el aterronamiento.

$$V1 = 0.0130 * V2 + 0.0122 * V3 + 0.0066 * V4 + -0.0115 + 1.0000 E$$

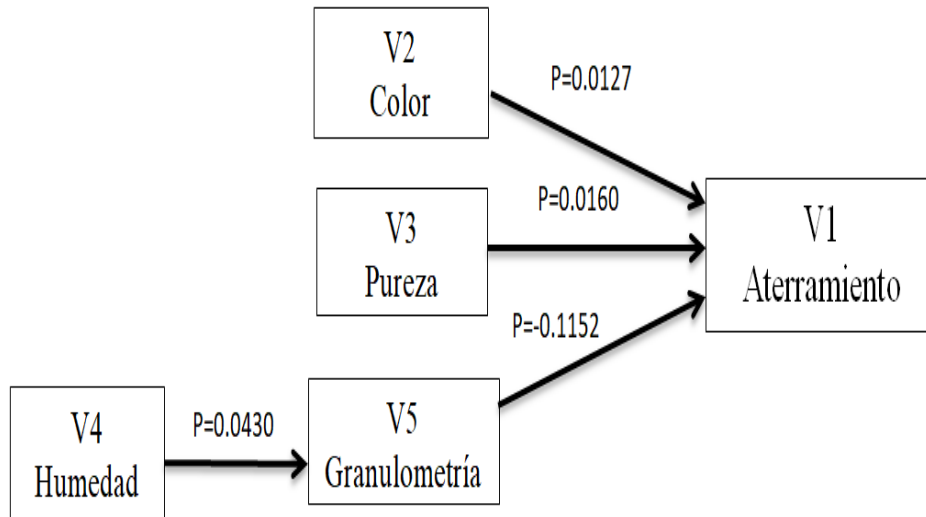


**Figura 11.** Diagrama de sendero 3 de efectos directos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterronamiento. **Fuente:** Elaboración propia.

En la Figura 12, se explica el aterronamiento considerando que la variable V2 (color U.I.) es el principal efecto directo positivo (0.0127), esto quiere decir que entre más color tenga el azúcar mayor efecto tendrá en el aterronamiento. La variable V3 (pureza) tiene un efecto positivo, pero de menor magnitud (0.016) si lo comparamos con el efecto de la variable V4 (humedad interna) (0.043). Lo interesante con respecto a V4 (humedad interna) es que actúa indirectamente a través de V5 (granulometría), lo que representa que a mayor humedad interna y menor tamaño de partícula el azúcar podrá aterrornarse con mayor facilidad.

$$V1 = 0.0127 * V2 + 0.016 * V3 + -0.1152 + 1.0000 E1$$

$$V5 = 0.043 * V4 + 1.0000 E2$$



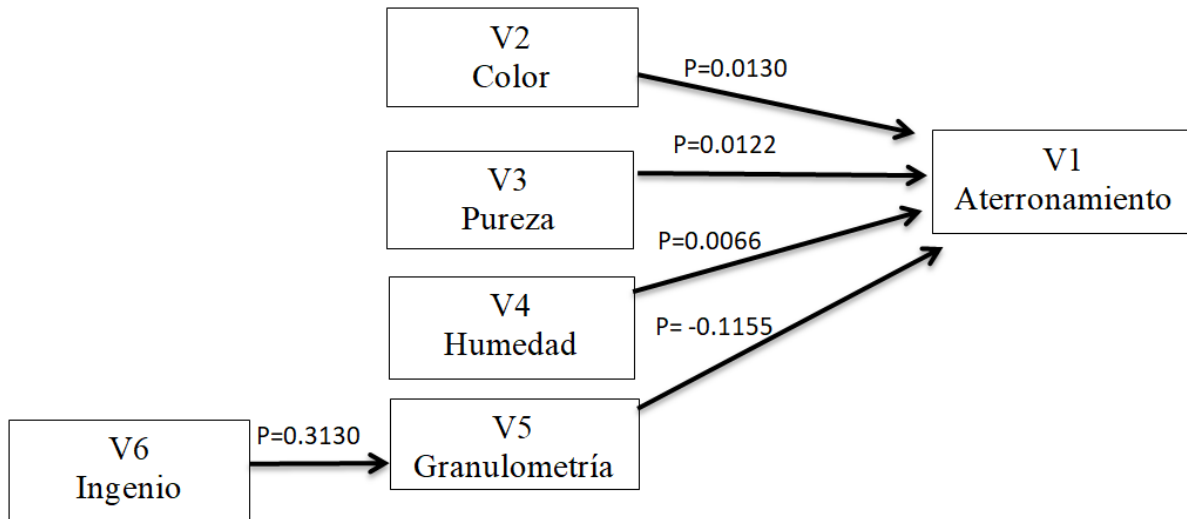
**Figura 12.** Diagrama de sendero 6 de efectos directos e indirectos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterramiento. **Fuente:** Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 13, el diagrama de sendero 7 muestra que la variable con mayor efecto sobre el aterramiento es V6 (ingenio) que actúa de forma indirecta con un valor positivo de 0.313 sobre V5 (granulometría), que sigue presentando un efecto directo con un valor negativo de -0.1155, como se presentó en los modelos anteriores. La variable V2 (color), es la tercera en importancia con un efecto directo (0.0130) y por último las variables V3 (pureza) con un valor de coeficiente de 0.0122 y V4 (humedad interna) con un valor de 0.0066.

$$V1 = 0.0130 * V2 + 0.0122 * V3 + 0.0066 * V4 + -0.1155 * V5 + 1.0000 E1$$

$$V5 = 0.3130 * V6 + 1.0000E1$$



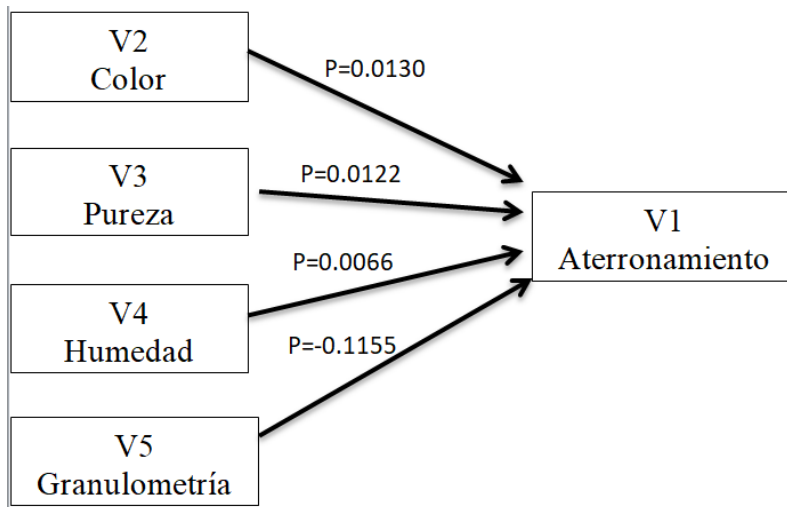
**Figura 13.** Diagrama de sendero 7 de efectos directos e indirectos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterronamiento.  
**Fuente:** Elaboración propia.

De los cuatro diagramas presentados anteriormente, los diagramas que representan mejor a la teoría estudiada en el capítulo 1, de acuerdo con las investigaciones relacionadas a este fenómeno, son los diagramas de sendero número 3 y 6 (Figura 14 y 15). Esto se debe a que las variables que participan en ambos diagramas son las mismas, cambiando solamente el sentido de los efectos. Es decir, en el diagrama de sendero 3 (Figura 16), se observa que todas las variables tienen un efecto directo sobre el aterronamiento (V1); mientras que en el diagrama 6 (Figura17), la humedad interna (V4) tiene un efecto indirecto al aterronamiento (V1) a través de la granulometría (V5).

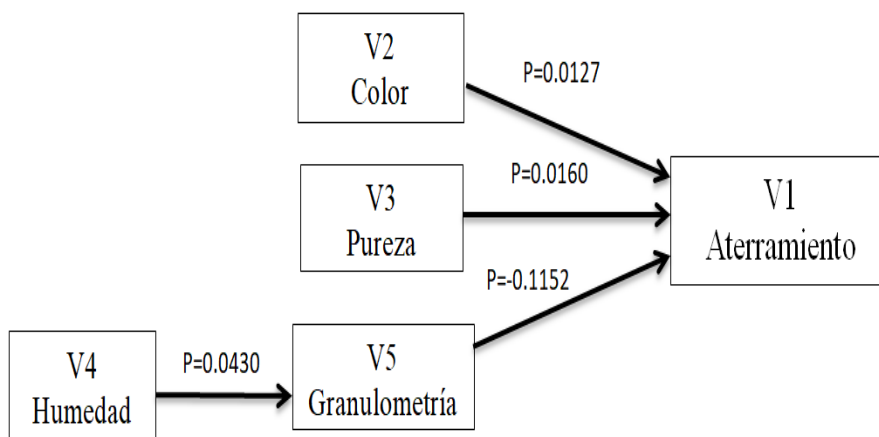
Además, se puede observar que los coeficientes de ruta de color y granulometría tienen casi el mismo valor en ambos diagramas. En el diagrama 6 (Figura15) los coeficientes de sendero con mayor valor sobre el aterronamiento son V4 (humedad interna) a través de V5 (granulometría) lo que indica que a mayor humedad interna en el azúcar y con un tamaño de partícula pequeño el azúcar se puede aterronar con mayor facilidad. Estos resultados coinciden con los encontrados por Pascual *et al.* (2016), quienes indicaron que las partículas finas son las que comienzan con el proceso de incremento en la humedad. De igual manera Christakis *et al.* (2006) explican que, a mayor humedad, las partículas especialmente las de menor tamaño formarán un puente líquido, que posteriormente cuando existan variaciones en la humedad se volverán sólidos, desarrollando de esta forma el aterronamiento.

El tercer coeficiente de importancia es el de la pureza (V3) seguido del color (V2), estas dos variables están inversamente asociadas; es decir, un color de 45 U.I. Está relacionado con una

menor pureza del azúcar refinado (99.90% Pol). Por lo tanto, el azúcar con bajo color, su pureza es mayor, lo que hace que tenga menor tendencia a aterronarse.



**Figura 14.** Diagrama de sendero 3 de efectos directos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterronamiento. **Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 15.** Diagrama de sendero 6 de efectos directos e indirectos con coeficientes estandarizados de las variables independientes sobre la variable respuesta aterronamiento. **Fuente:** Elaboración propia.

## 2.4. Conclusiones

El estudio del fenómeno de aterronamiento en el azúcar refinado de caña como un fenómeno causal, permite visualizar no solo las variables que presentan una significancia estadística, sino también su magnitud (coeficiente de sendero) en la formación de terrones. Con ello



comprobamos que variables como la humedad interna (V4) y la granulometría (V5) juegan un papel crucial en este fenómeno y genera inconvenientes en la calidad del producto final.

De los cuatro modelos seleccionados, de acuerdo con los criterios de las estadísticas de bondad de ajuste, los modelos que más se acercan a la realidad del fenómeno son los modelos 3 y 6; debido a que el efecto del ingenio es en realidad el efecto distribuido en las dos variables de mayor peso como lo son la humedad interna y la granulometría. Es por ello por lo que para prevenir el fenómeno de aterronamiento es recomendable mantener la humedad interna del azúcar almacenado por debajo del 0.024 % y que el porcentaje de finos no supere el 3.48%, por lo que un aumento combinado de ambos factores propiciaría la formación de terrones en el azúcar.

## **2.5. Literatura citada**

- Arrogante, O. (2018). Modelos de ecuaciones estructurales en Enfermería: metodología y aplicación en la investigación enfermera. *Índex de Enfermería*, XXVII(1-2), 67-71.
- Bollen, K. A. (1989). *Structural Equations with Latent Variables*. New York: John Wiley & Sons.
- Castrillon, N., Pabon, B., & Reif-Acherman, S. (2011). Influencia de las condiciones del secado en el aterronamiento y la compactación del azúcar almacenado. *Ingeniería y Competitividad*, XIII(1), 9-23.
- Chitprasert, P., Chedchant, J., Wanchaitanawong, P., & N., P. (2006). Effects of Grain Size, Reducing Sugar Content, Temperature and Pressure on Caking of Raw Sugar. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*(40), 141-147.
- Cupani, M. (2012). Análisis de Ecuaciones Estructurales: conceptos, etapas de desarrollo y un ejemplo de aplicación. *Revista tesis*(1), 186-199.
- Espejo B., J., Fandos H., C., & Flavian B., C. (2007). Modelo de ecuaciones estructurales aplicado al aceite de oliva virgen extra del bajo Aragón con denominación de origen protegida. *Revista Mexicana de Agronegocios*, XI(20), 222-237.
- Freeman, T., Brockbank, K., & Armstrong, B. (2015). Measurement and quantification of caking in powders. *Procedia Engineering*, CII, 35-44.
- Keith, T. (2015). *Multiple regression and beyond: An introduction to multiple regression and structural equation modeling* (segunda ed.). New York: Taylor & Francis.

- López, M., & Rivera, L. (2005). Comportamiento del consumidor valenciano de carne de ternera. Tesis. España.
- Manzano P., A. (2018). Introducción a los modelos de ecuaciones estructurales. Investigación en educación médica, VII(25), 67-72.
- Medrano, L., & Muñoz-Navarro, R. (2017). Aproximación conceptual y practica a los modelos de ecuaciones estructurales . Revista digital de investigación en docencia universitaria, XI(1), 219-239.
- Ó'Rourke, Norm, & Hatcher, L. (2013). A step-by-step- Approach to using SAS for Factor Analysis and Structural Equation Modeling. Cary, NC: SAS institute Inc.
- Pascual-Ramírez, J., & Espinoza-Enríquez, J. &. (2016). Caracterización de la compactación del azúcar de caña (*Saccharum officinalis* L.) y propuesta para sus medidas preventivas. Revista de simulación y laboratorio, II(5), 106-109.
- Ruiz, M. A., Pardo, A., & San Martin, R. (2010). Modelos de ecuaciones estructurales. Papeles del psicólogo, XXXI(1), 34-35.
- Samperio P., V. (2019). Ecuaciones estructurales en los modelos educativos: Características y fases en su construcción. Apertura, XI(1), 90-103.
- Stage, F., Cartyer, H., & Nora, A. (2004). Path analysis: An introduction and analysis of a decade of research. Journal of Education Research, 98, 5-12.
- Vargas H., T., & Mora-Esquivel., R. (2017). Tamaño de la muestra en modelos de ecuaciones estructurales con constructos latentes: Un método práctico. Actualidades investigativas en educación, XVII(1), 1-34.
- Weston, R., & Gore Jr., P. (2006). Brief Guide to Structural Equation Modeling. The Counseling Psychologist, XXXIV(5), 719-751.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES**

### **1. Conclusiones**

A pesar de que no fue posible llevar a cabo un análisis del diagrama de senderos completo a través de la metodología de ecuaciones estructurales, el análisis del diagrama de senderos basado sólo en las propiedades fisicoquímicas nos permitió visualizar la utilidad de esta

herramienta en fenómenos causales como lo es el aterronamiento. Esta metodología permitió identificar cuáles son las variables que presentan mayor influencia para el desarrollo de aterronamiento en azúcar refinada de caña, además de probar la hipótesis planteada en esta investigación en relación con el tamaño de grano y la humedad interna, cuyos factores resultaron presentar la mayor contribución a la formación de terrones.

## **2. Recomendaciones**

Es recomendable que dentro de la industria de los alimentos se lleve un monitoreo de las condiciones en las cuales el producto es almacenado, esto con la finalidad de poder estudiar con mayor profundidad como es que interactúa el ambiente y las características propias del producto en propiciar las condiciones hacia el aterronamiento. De esta manera dar pauta a la transferencia de tecnología que permita minimizar la aparición de fenómenos como el aterronamiento.

Las limitantes que se tuvieron en la presente investigación en relación con la información requerida de los otros factores (empaqué, humedad relativa y temperatura interna de los almacenes) presentes en el diagrama de senderos, nos muestra la importancia de la cultura en la ciencia de datos que permiten modelar fenómenos en las cadenas agroalimentarias con la finalidad de hacer más eficiente los procesos que la conforma.