



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN FILTRO PRENSA DENTRO DEL
PROCESO DE FILTRACIÓN DE BEBIDAS ALCOHÓLICAS**

Cony Asenath Juárez Franco

Asesorado por el Msc. Ing. Edwin Adolfo Morales

Guatemala, abril de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN FILTRO PRENSA DENTRO DEL
PROCESO DE FILTRACIÓN DE BEBIDAS ALCOHÓLICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CONY ASENATH JUÁREZ FRANCO

ASESORADO POR EL MSC.ING. EDWIN ADOLFO MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, ABRIL DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

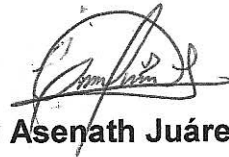
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN FILTRO PRENSA DENTRO DEL PROCESO DE FILTRACIÓN DE BEBIDAS ALCOHÓLICAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 30 de noviembre de 2011.



Cony Asenath Juárez Franco

Guatemala, 18 de Enero de 2013

Señor:

Víctor Manuel Monzón

Director de Escuela de Ingeniería Química

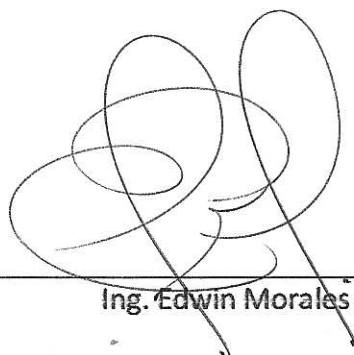
Presente

Le saludo deseando que toda actividad que emprenda prospere.

Por este medio me dirijo a usted para informarle que he revisado el informe final del trabajo de graduación titulado *"Evaluación de la operación de un filtro prensa dentro del proceso de filtración de bebidas alcohólicas"*, de la alumna Cony Asenath Juárez Franco quien se identifica con el número de carnet 2006-11612 a quien he asesorado para la realización del mismo y considero apto para ser presentado ante la escuela de Ingeniería Química y posteriormente ser publicado.

Sin otro asunto me despido deseándole el mejor de los días.

Atentamente,



Ing. Edwin Morales López

Edwin Morales Lopez
INGENIERO QUIMICO
COLEGIADO # 1378



Guatemala, 13 de marzo de 2013
Ref. EI.Q.TG-IF.017.2013

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-280-2011-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Cony Asenath Juárez Franco**

Identificada con número de carné: **2006-11612**

Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN FILTRO PRENSA DENTRO DEL PROCESO DE FILTRACIÓN DE BEBIDAS ALCOHÓLICAS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Edwin Morales López**.

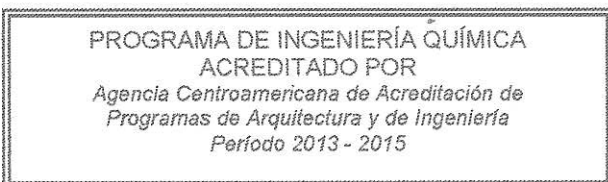
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Ref.EIQ.TG.092.2013

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **CONY ASENATH JUÁREZ FRANCO** titulado: "**EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN FILTRO PRENSA DENTRO DEL PROCESO DE FILTRACIÓN DE BEBIDAS ACOHÓLICAS**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, abril 2013



Cc: Archivo
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UN FILTRO PRENSA DENTRO DEL PROCESO DE FILTRACIÓN DE BEBIDAS ALCOHÓLICAS**, presentado por la estudiante universitaria **Cony Asenath Juárez Franco**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Ríos
Decano



Guatemala, abril de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por permitirme llegar a este momento, llenar de bendiciones mi vida y guiarme cada día.

Mis padres

Otto Juárez y Nora de Juárez. Por ser mi ejemplo, mi inspiración y siempre apoyarme en buenos y malos momentos, así también por sus enseñanzas las cuales me han hecho la persona que hoy soy.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis hermanos	Josué, Abdy y Gady Juárez. Por los buenos momentos compartidos y el apoyo que siempre me han brindado.
La familia Espina Estrada	Por abrirme las puertas de su hogar, por permitirme ser parte de su familia y por sus consejos y apoyo.
La familia Orizábal de León	Por recibirme en su familia, por sus consejos, su confianza y la especial compañía que me han dado, en especial a Fabiola por ser más que una amiga, mi hermana.
Mis amigos	Por brindarme amistad incondicional y por el apoyo mutuo en nuestra formación académica y espiritual.
Mis asesores	Edwin Morales y Mónica Franco. Por el tiempo y dirección que me otorgaron en la realización de mi trabajo de tesis.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por proveerme de excelente educación y en especial a la Facultad de Ingeniería, por brindarme los conocimientos necesarios para mi formación como profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Filtración	3
2.2. Medio filtrante	8
2.3. Torta filtrante.....	9
2.4. Tratamiento preliminar de las suspensiones antes de la filtración	11
2.5. Coadyuvantes de filtración	11
2.6. Equipo de filtración	13
2.7. Tipos de filtros	13
2.7.1. Filtros de lecho	13
2.7.2. Filtros de mangas	14
2.7.3. Filtros de hojas	14
2.7.4. Filtros rotatorios continuos.....	15
2.7.5. Filtro prensa	17
2.7.5.1. Filtro prensa de placas y marcos	17
2.7.5.2. Filtro prensa de placas huecas	20

2.8.	Principios de filtración.	21
2.9.	Proceso de filtración de bebidas alcohólicas.....	23
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
3.1.	Variables	25
3.1.1.	Variables de control.....	25
3.1.2.	Variables independientes	27
3.1.3.	Variables dependientes	28
3.1.4.	Variables de medición	29
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	29
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	29
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	30
3.5.	Proceso de fabricación de bebidas alcohólicas.....	30
3.6.	Técnica cualitativa o cuantitativa	32
3.6.1.	Técnica cualitativa	32
3.6.2.	Técnica cuantitativa.....	32
3.6.3.	Diseño preliminar.....	32
3.6.4.	Procedimientos para la determinación de los parámetros de operación del filtro prensa	33
3.7.	Recolección y ordenamiento de la información	35
3.7.1.	Elección del diseño experimental	35
3.7.1.1.	Diseño de tratamientos.....	36
3.7.1.2.	Muestreo	36
3.7.1.3.	Diseño de control de error	37
3.7.1.4.	Diseño de observaciones	37
3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información..	38
4.	RESULTADOS.....	41

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	47
CONCLUSIONES	53
RECOMENDACIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	57
APÉNDICES	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diagrama sistemático del sistema de filtración.....	3
2.	Mecanismo de filtración con formación de la torta	6
3.	Esquema de formación de la torta.....	10
4.	Filtro prensa de placas y marcos.....	18
5.	Operación de filtración en un filtro prensa de placas y marcos	19
6.	Proceso de fabricación de bebidas alcohólicas.....	31
7.	Diseño preliminar	33
8.	Gráfica del modelo matemático de la función del volumen de filtrado....	44

TABLAS

I.	Determinación de las variables de control.....	26
II.	Determinación de las variables independientes	27
III.	Variables dependientes	28
IV.	Variables de medición	29
V.	Datos experimentales de masa de carbón activado y tierra diatomácea	38
VI.	Datos experimentales del volumen de filtrado.....	38
VII.	Datos experimentales del tiempo de filtrado.....	39
VIII.	Datos experimentales del diferencial de presión	40
IX.	Promedio de los datos experimentales	40
X.	Resistencia específica del medio filtrante (α)	41
XI.	Resistencia específica de la torta filtrante (R)	42
XII.	Volumen óptimo de filtrado (V).....	42

XIII.	Tiempo óptimo de filtrado (t)	43
XIV.	Caudal máximo de filtrado ($q_{\text{máx}}$).....	43
XV.	Turbidez del producto filtrado (T).....	44
XVI.	Datos de la gráfica número 8	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área frontal del filtro
q	Caudal
q_{max}	Caudal máximo
c	Concentración de sólidos en la alimentación
a	Constante
a₁	Constante
b	Constante
b₁	Constante
S_a	Desviación estándar de la variable a
kg	Kilogramos
m	Metros
Pa	Pascales

α	Resistencia específica de la torta
R	Resistencia del medio
s	Segundos
T	Temperatura
t	Tiempo
NTU	Unidades Nefelométricas de turbidez
a_i	Valor i-esimo de la variable a
\bar{a}	Valor promedio de la variable a
μ	Viscosidad dinámica del fluido
V	Volumen

GLOSARIO

Carbón activado	Término genérico que describe una familia de adsorbentes de origen orgánico altamente cristalino y de una estructura porosa interna extensivamente desarrollada.
Caudal	Cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo.
Clarificación	Tipo de filtración para suspensiones que contienen pocos sólidos.
Coadyuvantes	Sustancias granuladas o fibrosas que permiten la formación sobre el medio filtrante de una torta prefiltrante adicional de mayor permeabilidad y mayor profundidad, donde quedan retenidas las fases heterogéneas en forma de flóculos deformables o pastas de mayor viscosidad y contenido en sólidos finos.
Filtración	Operación unitaria cuya finalidad es la separación de un sólido insoluble que está presente en una suspensión sólido-líquido, haciendo pasar dicha suspensión a través de una membrana porosa que retiene las partículas sólidas.

Filtro	Equipo de operaciones unitarias por medio del que se realiza la filtración.
Filtro prensa de placas y marcos	Montaje alternado de placas cubiertas en ambos lados con un medio filtrante que por lo general es tela y marcos huecos, que proporcionan el espacio necesario para la acumulación de la torta durante la filtración.
Medio filtrante	Barrera que permite que pase el líquido, mientras retiene la mayor parte de sólidos.
Presión	Magnitud físicaescalarque mide la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, y sirve para caracterizar cómo se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie.
Tierra diatomácea	Clasedealgasunicelulares microscópicas. Conocidas también como Bacillariophyceae, son uno de los más comunes tipos defitoplancton.
Tortafiltrante	Capa formada debido a la obstrucción de los poros del medio filtrante es un fenómeno complicado.

Turbidez

Falta de transparencia de un líquido debida a la presencia de partículas en suspensión.

Viscosidad

Resistencia de un fluido a deformaciones tangenciales.

RESUMEN

Se realizó una evaluación de la operación de filtrado de un filtro prensa para la clarificación de bebidas alcohólicas en una empresa dedicada a la fabricación y envasado de las mismas.

El estudio de tesis se enfocó en determinar la resistencia específica de la torta, la resistencia específica del medio filtrante, el volumen y el tiempo óptimos de filtrado y el caudal máximo que garantice la calidad de las bebidas alcohólicas.

La metodología utilizada para cumplir con el objetivo propuesto fue un estudio matemático y gráfico del comportamiento del filtro en función del tiempo de filtrado, se realizaron cinco corridas en donde se medía el volumen de filtrado, el diferencial de presión y la turbidez del producto en distintos tiempos, para cada una de las placas filtrantes.

Con los datos encontrados se determinó la resistencia específica del medio filtrante, la resistencia específica de la torta, el volumen óptimo de filtrado, el tiempo óptimo de filtrado y el caudal máximo que garanticen la calidad del producto la cual se comparó con la medida de la turbidez requerida por la empresa para verificar la calidad del producto.

OBJETIVOS

General

Evaluar la operación de filtrado de un filtro prensa de placas y marcos, para la clarificación de bebidas alcohólicas de una empresa de fabricación y envasado de bebidas alcohólicas por medio del establecimiento de parámetros de operación que garanticen la calidad del producto.

Específicos

1. Determinar la resistencia específica de la torta por medio de una gráfica que relacione el tiempo de filtrado y el volumen de filtrado.
2. Determinar la resistencia específica del medio filtrante por medio de una gráfica que relacione tiempo de filtrado y el volumen de filtrado.
3. Encontrar un modelo matemático a partir de datos experimentales a fin de determinar si es posible establecer un volumen y tiempo óptimos de filtrado que garanticen la calidad del producto, de ser así, determinar el volumen y tiempo óptimos de filtrado.
4. Establecer el caudal máximo que garantice la calidad del producto por medio de una función que relacione el área frontal del filtro, la resistencia del medio y la viscosidad del fluido.

INTRODUCCIÓN

La filtración es una operación unitaria cuya finalidad es la separación de un sólido insoluble que está presente en una suspensión sólido-líquido, haciendo pasar dicha suspensión a través de una membrana porosa que retiene las partículas sólidas.

En la industria en general, la filtración es una operación unitaria muy común, para el caso particular de la industria de alimentos se distinguen tres tipos característicos de filtración; con suspensiones apreciables de sólidos, denominada filtración, con suspensiones que contienen pocos sólidos denominada clarificación y la microfiltración donde las partículas a separar son de orden de 0,1 milímetro o menores.

En una empresa dedicada a la fabricación y envasado de bebidas alcohólicas, dentro del proceso de filtración para la clarificación de sus productos se utilizan varios filtros de diversas categorías, entre los cuales se encuentra un filtro prensa de placas y marcos utilizados para la filtración de la mayoría de productos, dicho filtro fue el objeto de evaluación del presente trabajo de investigación.

En la empresa tienen como objetivo de calidad e inocuidad ser el productor de las bebidas alcohólicas más finas e inocuas para el consumidor, por lo cual, deben asegurar la calidad e inocuidad de cada uno de los productos que ofrecen para mantener el estándar de calidad que han forjado por lo cual deben ser muy rigurosos en sus procesos, para mantener la calidad y lograr la plena satisfacción de sus clientes.

La operación unitaria de filtración es de suma importancia dentro del proceso de producción de bebidas alcohólicas ya que asegura la calidad de los productos que fabrica la empresa, debido a que cada uno de estos productos debe pasar por un proceso de filtración para poder ser envasado, por lo tanto el funcionamiento eficaz y eficiente del filtro prensa del área de fabricación así como otros de filtros con los que cuenta la empresa es de suma importancia para ellos.

La empresa anteriormente tuvo algunos problemas con los productos filtrados por lo cual recurría a volver a filtrar el producto para lograr la calidad adecuada. Por lo tanto se vio la necesidad de establecer los parámetros de operación del filtro para evaluar el buen funcionamiento del mismo.

Se evaluó el funcionamiento de un filtro prensa del área de fabricación, para lograr un producto de calidad que cumpla con las exigencias para los consumidores finales el filtro prensa a evaluar es de placas y marcos de 60 x 60 centímetros de acero inoxidable, y se establecieron parámetros de operación óptimos para la filtración de productos que requieren de carbón activado y tierra diatomácea para su clarificación.

1. ANTECEDENTES

La filtración es una operación unitaria que tiene sus orígenes muchos años atrás, el filtro prensa es un artefacto que fue desarrollado en el siglo XIX con el fin de filtrar arcilla, actualmente el filtro prensa tiene una amplia aplicación en muchas industrias, debido a los altos rendimientos obtenidos, y debido a que se puede utilizar para el filtrado y clarificación de numerosos líquidos.

A pesar de que el proceso de filtración es una operación unitaria de elevada importancia a nivel industrial, en Guatemala, pocos estudios se han realizado sobre dicho tema, siendo los filtros prensa de placas y marcos los más utilizados a nivel industrial, razón por la cual es de suma importancia el buen control del funcionamiento de los mismos para lograr la mayor eficacia y eficiencia posible.

Entre los trabajos de graduación realizados sobre filtros prensa se encontraron los siguientes:

En el 2001, María Gabriela Rangel Centeno, estudiante de ingeniería química de la Universidad de los Andes, Venezuela, realizó su trabajo de graduación titulado: "Filtración de licores negros con membranas".

En el 1999, Claudia Regina Vetorrazzi González, estudiante de ingeniería química industrial de la Universidad Rafael Landívar, Guatemala, realizó su trabajo de graduación titulado: "Instalación y práctica de filtro prensa en el Laboratorio de Operaciones unitarias de la Universidad Rafael Landívar".

El objeto del trabajo de Claudia Regina era determinar la relación que existe entre la presión y la resistencia de la torta y el medio filtrante, así como la familiarización de los alumnos del Laboratorio de Operaciones Unitarias con los tipos de filtrado que se encuentran en la industria nacional, las conclusiones que la alumna planteó fueron que las gráficas tiempo/volumen de filtrado vs volumen de filtrado, dieron como resultado rectas, la correlación de la pendiente de cada gráfica anterior en relación con la presión en escala logarítmica era una recta, con estos y otros datos finamente se encontró la ecuación que describe el funcionamiento del filtro prensa.

En 1999, Diego Alexander Bermudez Salazar junto con Johanna María Escobar Arcila, estudiantes de ingeniería química de la Universidad del Valle, Colombia, realizaron su trabajo de graduación titulado: "Optimización del sistema de filtración de licores de refinería en el Ingenio Riopaila S.A.".

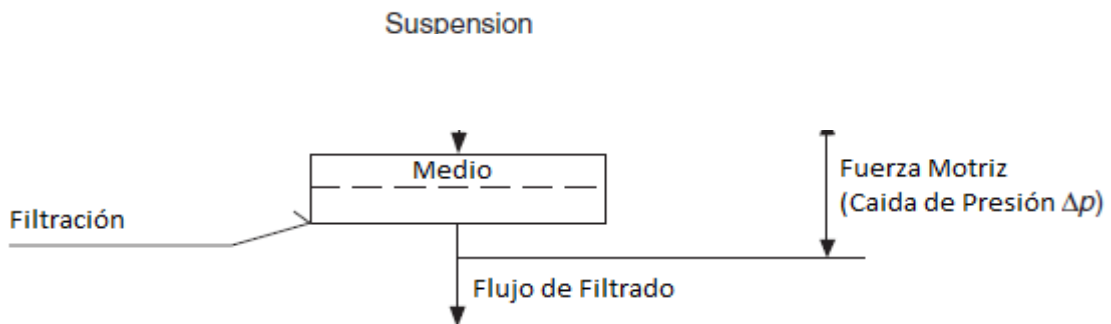
2. MARCO TEÓRICO

2.1. Filtración

“La filtración es una operación unitaria cuya finalidad es la separación de un sólido insoluble que está presente en una suspensión sólido-líquido, haciendo pasar dicha suspensión a través de una membrana porosa que retiene las partículas sólidas. A la membrana porosa se la denomina medio filtrante, mientras que las partículas retenidas en la membrana forman una capa que se denomina torta y el líquido que atraviesa la membrana porosa y está exento de sólidos se denomina filtrado”.¹

Generalmente, los poros del medio tendrán una forma tortuosa y serán menores que las partículas que deben separarse, operando el filtro en forma eficaz únicamente después que un depósito inicial haya sido retenido en el medio.

Figura 1. Diagrama sistemático del sistema de filtración



Fuente: SVAROVSKY, Ladislav. Solid-LiquidSeparation. p. 303.

¹ IBARZ RIBAS, Alberto. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. p. 271.

Filtración es el nombre de la operación unitaria. “Un filtro es un equipo de operaciones unitarias por medio del que se realiza la filtración”.²

El medio filtrante es la barrera que permite que pase el líquido, mientras retiene la mayor parte de sólidos. Dicho medio puede ser una pantalla, tela, papel o un lecho de sólidos. El líquido que pasa a través del medio filtrante se conoce como filtrado.

“Para obtener un flujo de fluido a través del medio filtrante, se debe aplicar una caída de presión ΔP a través del medio; desde un punto fundamental de vista este diferencial de presión se puede lograr por medio de cuatro fuerzas motrices: gravedad, vacío, presión y fuerza centrífuga”.³

“La filtración es una operación unitaria de mucha utilidad dentro de la industria en general, en el caso particular de la industria alimentaria se distinguen tres tipos característicos de filtración. En uno de ellos se incluyen las suspensiones que contienen cantidades apreciables de sólidos insolubles y al ser filtrados forman una torta sobre el medio filtrante pudiendo interesar la obtención del sólido, del filtrado o de ambos”.⁴

Otro tipo es el que incluye suspensiones con pocos sólidos insolubles que por regla general suelen ser indeseables y en cuyo caso la filtración se denomina clarificación. Por último, se debe citar la microfiltración que se da en el caso de que las partículas sólidas a separar sean de tamaños del orden 0,1 milímetros.

²PERRY, M, GREEN, D, MALONEY, J. Manual del Ingeniero Químico, p.1696.

³SVAROVSKY, Ladislav. Solid-liquid Separation.p.303.

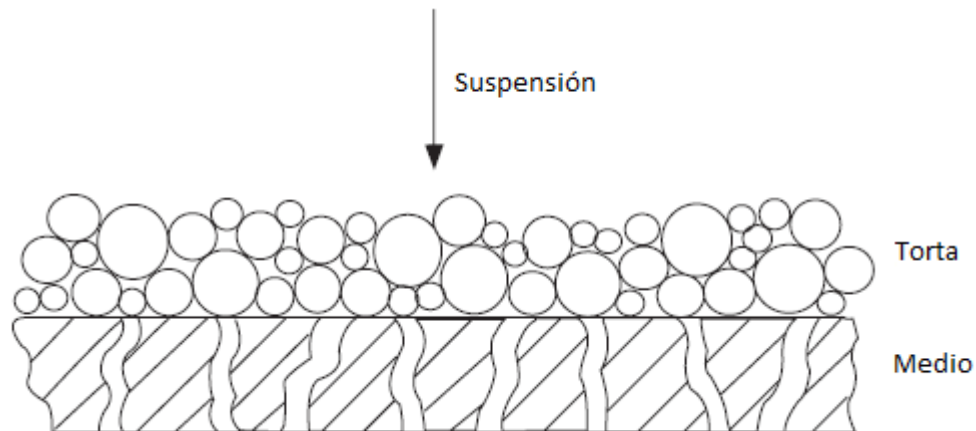
⁴IBARZ RIBAS, Alberto. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos, p. 271.

Cuando la cantidad de sólidos es relativamente pequeña, comparada con la del líquido, el proceso se denomina normalmente filtración. Al aumentar el porcentaje de sólidos la operación pasa a ser de prensado o centrífuga. Los filtros por lo general retienen los sólidos acumulados utilizando medios filtrantes formando una torta filtrante.

La filtración y los filtros se pueden clasificar de varias formas.

- a) Por la fuerza motriz o impulsora: se induce el flujo de filtrado por el medio filtrante mediante la carga hidrostática (gravedad), presión sobreatmosférica o vacío aplicado corriente arriba del medio filtrante, presión subatmosférica aplicada corriente abajo del citado medio o fuerza centrífuga a través de este último.
- b) Por el mecanismo de filtración: cuando los sólidos quedan detenidos en la superficie de un medio de filtración y se amontonan unos sobre otros para formar una torta de creciente espesor, la separación es conocida como filtración de torta. Cuando los sólidos quedan atrapados dentro de los poros o cuerpo del medio de filtración, se le denomina medio filtrante de profundidad, o filtración clarificadora.

Figura 2. **Mecanismo de filtración con formación de la torta**



Fuente: SVAROVSKY, Ladislav. Solid-Liquid Separation. p. 304.

- c) Por la función: lameta de la filtración puede ser la obtención de un sólido seco, un líquido clarificado o ambas cosas.
- d) Por ciclo operacional: los filtros pueden ser intermitentes o continuos, y los filtros por lotes, se pueden manejar con una fuerza impulsora de presión constante, a velocidad constante o en ciclos variables, con respecto tanto a la presión como a la velocidad. El ciclo por lotes puede variar grandemente, dependiendo del área de filtrado y la carga de sólidos.
- e) Por la naturaleza de los sólidos: la filtración de tortas puede incluir una acumulación de sólidos sustancialmente incompresibles que corresponden, más o menos, en la filtración por medio de filtro, a partículas deformables y rígidas.

Estos métodos de clasificación no se excluyen mutuamente. Además los filtros usualmente se dividen entre dos grupos de equipo de torta y clarificador, luego entre máquinas que utilizan la misma fuerza motora, y por último si son *batch* o continuos.

Los principales factores a considerar al seleccionar el equipo y las condiciones de operación son:

- Las propiedades del fluido, especialmente su viscosidad, densidad y propiedades corrosivas.
- La naturaleza del sólido, tamaño y forma de partícula, distribución de tamaños y características de relleno.
- La concentración de sólidos en suspensión.
- La cantidad de material a tratar y su valor.
- Si el producto valioso es el sólido, el fluido o ambos.
- Cuando es necesario lavar los sólidos filtrados.
- Si una contaminación muy ligera, provocada por el contacto de la suspensión o el filtrado con los diversos componentes del equipo, es perjudicial para el producto.
- Si la suspensión de alimentación puede calentarse.
- Si se puede efectuar algún tratamiento previo.

2.2. Medio filtrante

La función del medio filtrante es la de actuar como un medio de soporte para la torta filtrante, siendo las primeras capas de torta filtrante las que proporcionan el verdadero filtro. Todos los filtros requieren un medio filtrante para retención de sólidos.

“La especificación de un medio de filtración está basada en la retención de un tamaño mínimo de partículas y eficiencia de separación, así como en un tiempo aceptable de vida. La elección del medio de filtración es la consideración más importante para asegurar el funcionamiento satisfactorio de un filtro”.⁵En la filtración de la torta, la selección del medio filtrante incluye en la optimización de los siguientes factores:

- Capacidad de retener los sólidos sobre sus poros con rapidez.
- Velocidad baja de arrastre de sólidos dentro de sus intersticios.
- Resistencia mínima al flujo de filtrado.
- Resistencia a los ataques químicos.
- Suficiente resistencia para sostener la presión de filtración.
- Resistencia aceptable al desgaste mecánico.
- Capacidad para descargar la torta con facilidad y limpieza.

⁵ PERRY, M.; GREEN, D.; MALONEY, J. Manual del ingeniero químico, p. 1710.

- Capacidad para conformarse mecánicamente al tipo de filtro con el cual se utilizará.
- Costo mínimo.

En la selección del medio filtrante se incluyen innumerables tipos de telas, tejidos de fibras, fieltro o fibras no tejidas y sólidos porosos o perforados, membranas poliméricas o sólidos particulados en forma de un lecho permeable. Todos los tipos de medios filtrantes se encuentran disponibles en gran variedad de materiales.

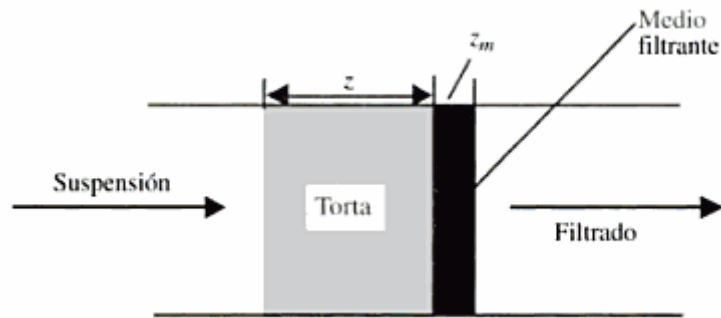
2.3. Torta filtrante

“Las etapas iniciales en la formación de la torta filtrante son importantes, ya que pueden tener una influencia importante sobre la resistencia al flujo y pueden afectar seriamente la vida útil de la tela.

La obstrucción de los poros del medio filtrante es un fenómeno complicado, en parte debido a la naturaleza muy compleja de la estructura de la superficie de los tipos usuales de medios filtrantes y en parte, porque las líneas de movimiento de las partículas no están bien definidas. Al inicio de la filtración, la forma en la cual se forma la torta filtrante varía entre dos extremos: a) la penetración de los poros por las partículas y b) el impedimento establecido en la entrada de los poros por las partículas formando puentes”.⁶

⁶ PERRY, M.; GREEN, D.; MALONEY, J. Manual del ingeniero químico, p. 1712.

Figura 3. **Esquema de formación de la torta**



Fuente: IBARZ RIBAS, Alberto. Operaciones unitarias en ingeniería de alimentos. p. 273.

La formación de la torta se ve afectada por la concentración de partículas en el fluido. Cuanto mayor sea la concentración de partículas, más pequeña será la distancia media entre las partículas y menor será la tendencia de las partículas a ser atraídas por las líneas de corriente dirigidas hacia los poros abiertos.

Las partículas de una suspensión concentrada tienden a distribuirse uniformemente sobre la superficie del filtro, formando puentes. En una solución diluida, las partículas son dirigidas por las líneas de corriente hacia los poros y tienden a depositarse en los mismos.

Como resultado, las suspensiones de alta concentración, generalmente dan lugar a tortas de resistencia más pequeña que las formadas a partir de suspensiones diluidas.

2.4. Tratamiento preliminar de las suspensiones antes de la filtración

Si la suspensión a filtrar es diluida y las partículas sólidas decantan fácilmente en el fluido, puede ser interesante efectuar una concentración preliminar en un espesador. La suspensión espesada, pasa entonces desde el espesador al filtro, reduciéndose de esta manera la cantidad de material a manejar.

La naturaleza de la torta filtrante tiene un efecto muy pronunciado sobre la velocidad de flujo del filtrado y mientras más grande sean las partículas que forman la torta filtrante, se obtiene una filtración más rápida. Por lo tanto, es conveniente agregar un agente coagulante a la suspensión. Si la suspensión es obtenida por medio de una precipitación, es también conveniente controlar las condiciones de precipitación de forma tal que se obtenga las partículas de mayor tamaño posible.

2.5. Coadyuvantes de la filtración

El empleo de coadyuvantes para la filtración es una técnica que se aplica con frecuencia para las filtraciones en que surgen problemas de baja velocidad de filtración, taponamiento rápido del medio o claridad no satisfactoria del filtrado. Los coadyuvantes de filtración son sólidos finamente divididos, granulares o fibrosos, capaces de formar una torta de alta permeabilidad en la que se pueden retener los flóculos deformables y los sólidos muy finos y pastosos.

“La utilización de coadyuvantes permite utilizar un medio filtrante mucho más permeable que el requerido en filtraciones de clarificación, con el objeto de producir un filtrado de la misma calidad por filtración profunda”.⁷

Los coadyuvantes de filtración deben ser de baja densidad para minimizar su tendencia al asentamiento; deben ser porosos y capaces de formar una torta porosa para minimizar la resistencia al flujo y deben ser químicamente inertes al filtrado.

Los dos coadyuvantes que más se utilizan son: la sílice diatomácea (también llamada tierra de diatomeas o tierra diatomácea) y sílice pura preparada a partir de yacimientos de esqueletos diatomáceos y perlita dilatada. Se utilizan también fibras de celulosa, carbón o yeso.

Los coadyuvantes de filtración se utilizan en general en dos formas: la primera consiste en utilizar el coadyuvante de filtración para formar una torta previa, esto se utiliza por lo general, cuando el material a filtrar contiene pequeñas turbidez que no forman nunca una torta filtrante verdadera. El segundo método consiste en incorporar el coadyuvante a la suspensión a filtrar.

- Tierra diatomácea: un coadyuvante de filtración de tierra diatomácea tiene una densidad bastante grande entre 128 a 320 kilogramos sobre metro cúbico, contiene partículas regularmente menores a 50 micrómetros, y produce una torta con una porosidad en el rango de 0,9 (volumen de torta / volumen total de torta filtrante).

⁷PERRY, M.; GREEN, D.; MALONEY, J. Manual del ingeniero químico, p. 1712.

La alta porosidad (comparada con una porosidad de 0,38 de un filtro prensa típico) indica su capacidad de ser un buen coadyuvante de filtración. Hay diferentes métodos de procesar la diatomita cruda lo que resulta en una serie de coadyuvantes de filtración con un amplio rango de permeabilidad.

2.6. Equipo de filtración

El filtro más adecuado será aquel que para una operación determinada, cumpla las necesidades a un costo global mínimo. El costo del equipo está muy relacionado con el área filtrante; normalmente se desea obtener una elevada velocidad global de filtración.

Esto implica la utilización de elevadas presiones, aunque las presiones máximas a utilizar están limitadas por consideraciones de diseño mecánico. Los factores más importantes en la selección de un filtro lo constituyen: la resistencia específica de la torta filtrante, la cantidad a filtrar y la concentración de sólidos.

2.7. Tipos de filtros

Los filtros más comúnmente utilizados son:

2.7.1. Filtros de lecho

En este tipo de filtros, las partículas penetran en el interior de los intersticios del lecho filtrante, donde quedan atrapadas. Se utiliza generalmente para la depuración de los suministros de agua y el tratamiento de las aguas residuales, con un contenido de sólidos de aproximadamente 10 gramos sobre metro cúbico o menos.

Este tipo de filtro ha sustituido a los filtros de arena. Estos filtros están contruidos de materiales granulares, con un tamaño de partícula de 0,6 a 1,2 milímetros y con una profundidad de lecho de 0,6 a 1,8 metros. Las partículas de sólidos se separan por una acción mecánica.

2.7.2. Filtros de mangas

Es ampliamente utilizado en la industria azucarera. Consta de un cierto número de mangas largas y delgadas unidas a una bandeja de alimentación horizontal; el líquido fluye por la acción de la gravedad, por lo que la velocidad de filtración es baja. Posee la ventaja de poder instalar una gran área de filtración. Los filtros de mangas, son ampliamente utilizados para eliminar partículas de polvo de gases. Pueden funcionar como filtros de presión o de succión.

2.7.3. Filtros de hojas

Los filtros de hojas surgieron de la necesidad de desarrollar unidades de gran capacidad. Fueron desarrollados por Moore, Kelly y Sweetland. El filtro Moore funciona al vacío y ha sido concebido esencialmente para dar grandes áreas utilizando una construcción sencilla. En los otros dos tipos, las hojas están contenidas en una carcasa para permitir la operación bajo presión.

Las características más importantes de este tipo de filtro son: la uniformidad y separación de la torta, la facilidad de lavado y la instalación de la tela.

- Filtro Moore: consiste en un cierto número de hojas, soportadas por un marco rígido, con las tuberías de descarga de filtrado conectadas a un colector común. La batería de hojas está sumergida en un depósito de suspensión y se aplica vacío a través del colector de descarga.
- Filtro Kelly: consiste en una serie de hojas rectangulares verticales dispuestas longitudinalmente en una carcasa cilíndrica horizontal. La suspensión se bombea al interior de la envuelta cilíndrica, purgándose el aire a la atmósfera y a luego se lleva a cabo la filtración hasta que se forma una torta del grueso requerido.
- Filtro Sweetland: consiste en hojas circulares, todas del mismo tamaño, sobre una carcasa horizontal, dividida en dos partes, la inferior de las cuales gira sobre una bisagra para proporcionar un fácil acceso a las hojas. El filtrado de cada hoja pasa a través de una mirilla y entra después a un colector común, a través del cual abandona el filtro. El ciclo de operación es parecido al del filtro Kelly, excepto que la torta se descarga sin sacar las hojas.

2.7.4. Filtros rotatorios continuos

Los dos tipos principales de filtros rotatorios son: el de tambor rotatorio y el de discos. Este tipo de filtro es de succión, en los que la filtración, lavado, secado parcial y descarga de la torta, tienen lugar automáticamente.

Las necesidades de mano de obra son bajas y puede obtenerse un funcionamiento económico. Los filtros rotatorios se desarrollaron por la industria minera, pero hoy en día, se utilizan también en la industria química.

- a) Filtros de tambor rotatorio: consiste en un cilindro dispuesto horizontalmente, con la superficie exterior formada por una plancha perforada o elementos de drenaje especiales sobre los que se fija la tela filtrante. Algunas veces la tela está separada del tambor por una tela metálica gruesa, de tal forma que se maximiza el área.

El cilindro está dividido en un cierto número de sectores, existiendo una conexión por separado entre cada sector y una válvula rotatoria especial. El tambor está sumergido en una suspensión que se mantiene agitada para evitar la decantación de los sólidos, aplicando vacío a aquellos sectores del tambor que están sumergidos.

Se produce una torta del espesor deseado, hasta aproximadamente 100mm, ajustando la velocidad de rotación del tambor. La capacidad de este tipo de filtros está comprendida entre 0,1 y 5 kilogramos de sólido por metro cuadrado y por segundo, variando según la naturaleza de la torta.

- b) Filtro rotatorio de discos: consiste en un cierto número de hojas filtrantes circulares montadas sobre un pesado eje tubular y separado por medio de cubos de rueda.

Cada sector del disco está conectado a una salida separada, formándose un canal continuo por las salidas de los correspondientes sectores de las otras hojas, cuando el conjunto de los discos está instalado. Estos canales están conectados a una válvula rotatoria, parecida a la del filtro de tambor.

El funcionamiento del filtro de discos es muy parecido al del filtro de tambor, pero la descarga de la torta es más difícil que en el tambor rotatorio. Este filtro puede funcionar de tal forma, que se filtren simultáneamente varias suspensiones, disponiéndolo de manera que los discos se sumerjan en depósitos distintos.

En este caso sin embargo, no es posible separar los diferentes tipos de filtrados. Su principal ventaja sobre el filtro rotatorio es que proporciona una mayor área de filtración en el mismo espacio.

2.7.5. Filtro prensa

Es uno de los filtros que con más frecuencia se utilizaban en los primeros años de la industria química y aún se emplean ampliamente.

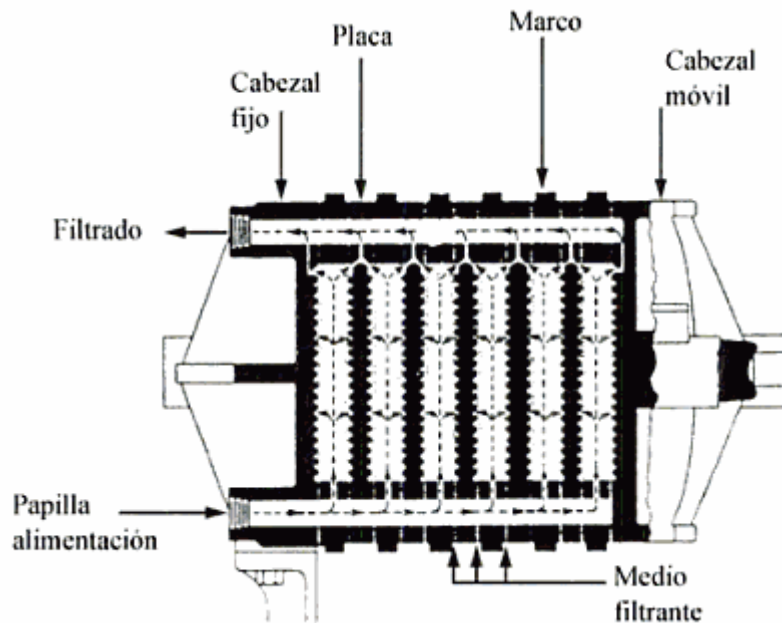
Los dos tipos que más se utilizan son el diseño de placa de lavado o placas y marcos, y el filtro prensa de placas huecas.

2.7.5.1. Filtro prensa de placas y marcos

Consiste en un montaje alternado de placas cubiertas en ambos lados con un medio filtrante que por lo general es tela y marcos huecos, que proporcionan el espacio necesario para la acumulación de la torta durante la filtración.

En los marcos existen agujeros para la alimentación y el lavado, en tanto que las placas tienen agujeros para el drenado del filtrado. Los marcos y placas están colgados en un par de barras de apoyo horizontales y se prensan, durante la filtración, para formar cierre a prueba de agua entre las dos placas terminales, una de las cuales es estacionaria.

Figura 4. **Filtro prensa de placas y marcos**



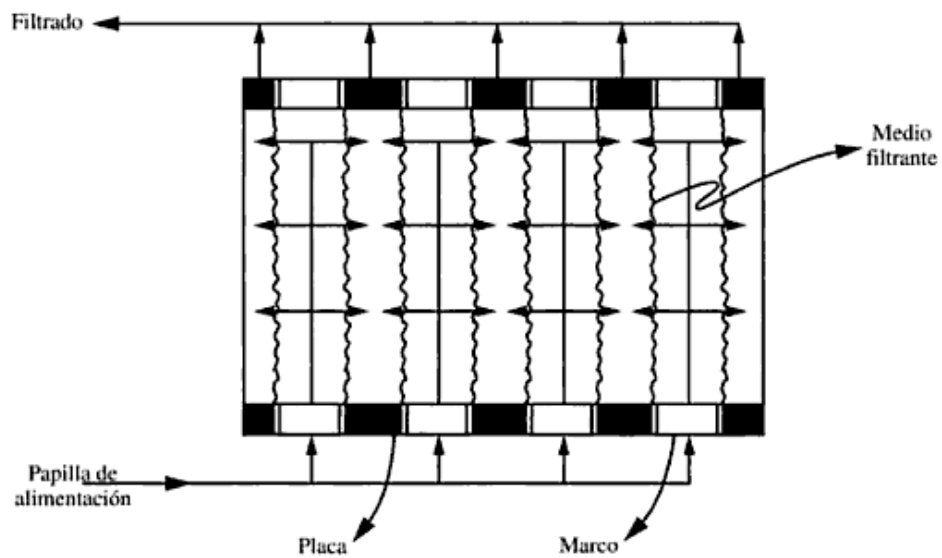
Fuente: IBARZ RIVAS, Alberto. Operaciones unitarias en ingeniería de alimentos. p. 273.

“La prensa se puede cerrar manualmente, en forma hidráulica o por medio de un motor. Existen varias disposiciones para la alimentación y descarga del filtrado. En la más común, la alimentación y la descarga de los diferentes elementos de la prensa, desembocan en un múltiple a través de algunos de los agujeros que están en las cuatro esquinas de cada uno de los marcos y placas.

La alimentación por la parte superior y la descarga por el fondo de las cámaras, proporcionan recuperación máxima del filtrado y el secado máximo de la torta.

En este filtro la solución pasa a través del medio filtrante, pero a medida que se va filtrando se forma una torta, que va aumentando su espesor, por lo que la solución debe atravesar, no sólo el medio filtrante, sino también la torta formada. Esto supone que la caída de presión a través del filtro sea cada vez mayor o bien el caudal de filtrado cada vez menor”.⁸

Figura 5. Operación de filtración en un filtro prensa de placas y marcos



Fuente: IBARZ RIBAS, Alberto. Operaciones unitarias en ingeniería de alimentos. p. 281.

El filtro prensa puede trabajar a caída de presión constante o a caudal constante de filtrado. En el primer caso, al mantener la caída de presión constante, el caudal de filtrado irá disminuyendo a lo largo del tiempo de filtración. Por el contrario, si se desea que el caudal de filtrado sea constante, la caída de presión se hará cada vez mayor.

⁸ IBARZ RIBAS, Alberto. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. p. 271, 272.

A medida que se va filtrando va aumentando el espesor del sólido depositado, con lo que constituye un caso no estacionario de circulación de fluidos a través de alturas de relleno variables.

2.7.5.2. Filtro prensa de placas huecas

Son parecidos a los de placas y marcos pero sólo constan de placas. Las dos caras de cada placa son huecas, para formar una cámara en la que se acumula la torta entre las placas adyacentes.

Este diseño tiene la ventaja de utilizar aproximadamente la mitad de las uniones de un filtro de placas y marcos, lo que hace que el cierre a presión sea más seguro.

Las ventajas del filtro prensa se determinan por: su sencillez, el bajo costo de capital, la flexibilidad y la capacidad para operar a alta presión en las aplicaciones como filtro de torta o filtro de clarificación.

Los requerimientos de área de piso y altura por unidad de área de filtro son pequeños y la capacidad se puede ajustar mediante la adición o eliminación de las placas y marcos. Los filtros prensa se limpian fácilmente y el medio filtrante, se puede reemplazar con facilidad. Con una operación adecuada se obtiene una torta más seca y densa, en comparación con la que se obtiene con la mayor parte de los otros filtros.

Existen varias desventajas tales como: un lavado imperfecto, debido a la densidad variable de la torta, una duración relativamente corta del medio filtrante, requerimientos de mano de obra elevados, etc.

Sin embargo, el mayor problema consiste en tener que abrir el filtro para descargar la torta, por lo que el operador está expuesto al contenido del filtro.

2.8. Principios de filtración

La filtración es un caso especial del flujo de fluidos, que envuelve el flujo de fluidos a través de un sólido poroso. El propósito de esta operación, como ya se mencionó anteriormente, es separar un sólido de un fluido. En el caso más común, el fluido es un líquido. Debido a esto el proceso de filtración, sin importar la forma en la cual es llevado a cabo, cumple con la ecuación básica del flujo de fluidos:

$$\text{Razón de flujo} = \text{Potencial/Resistencia}$$

Debido al pequeño diámetro hidráulico del medio filtrante, el flujo del filtrado a través del filtro, se efectúa en línea recta y cumple con las leyes modificadas de Poiseuille o D'Arcy.

En filtración, el potencial que induce el movimiento es de tipo mecánico; puede ser una diferencia en presión, la fuerza gravitacional o fuerza centrífuga. La diferencia de presión es normalmente la más utilizada.

La caída de presión en el filtro, es la suma de las caídas de presión que ocurren en la torta filtrante; el medio filtrante y la caída de presión que ocurre en los canales del filtro que se utilice, que normalmente, para cálculos aproximados, se desprecia.

La razón instantánea de flujo es directamente proporcional a la presión e inversamente proporcional a la resistencia total. La resistencia total está dada por la suma de la resistencia de la torta filtrante, la resistencia del medio filtrante y la resistencia equivalente a la caída de presión en los canales del filtro.

$$R = R_c + R' + R_p$$

Donde R es la resistencia total, R_c es la resistencia de la torta y R' es la resistencia del medio filtrante y R_p es la resistencia que presentan los canales del filtro, la cual para nuestros cálculos, será despreciada. La resistencia de la torta filtrante aumenta al aumentar el grueso de la torta y depende de la viscosidad del fluido que a filtrar, el ancho de la torta filtrante, la permeabilidad de la torta, y el área disponible para la filtración en dirección normal al flujo de filtrado.

A diferencia de la resistencia de la torta filtrante, la resistencia del medio filtrante es constante. Poco después que la filtración ha comenzado, los poros del medio filtrante son parcialmente tapados por las partículas contenidas en la suspensión a filtrar; estos poros, parcialmente tapados, se convierten en el verdadero medio filtrante y no el medio con los poros totalmente abiertos.

Debido a esto, no existe una forma de determinar la resistencia del medio filtrante, excepto por experimentación.

El proceso de filtración puede llevarse a cabo a presión o a volumen constante. A presión constante, el flujo de fluido al filtro, es controlado de forma tal que no varíe la presión dentro de la unidad. A volumen constante, se alimentará al filtro una razón constante de fluido sin tomar en cuenta las variaciones de presión.

2.9. Proceso de filtración de bebidas alcohólicas

Con el fin de clarificar, eliminar partículas indeseadas y olores de las bebidas alcohólicas estas deben de someterse a un proceso de filtración el cual cuenta de varias etapas:

- Preparación de la bebida alcohólica: en esta etapa se formula la bebida alcohólica de acuerdo a sus características específicas.
- Adición de carbón activado: en esta etapa se añade cierta cantidad de carbón activado a la bebida alcohólica preparada con el fin de eliminar color e impurezas.
- Reposo de la bebida alcohólica: en esta etapa la bebida se deja reposar por un tiempo determinado con el fin de que las partículas de carbón y las impurezas se depositen en el fondo.
- Armado de filtro: al filtro se le colocan los marcos y las placas filtrantes para y se aprieta para sellar cualquier salida.
- Preparación de la precapa: luego de reposado el producto se hace recircular cierta parte del licor junto con la tierra diatomácea para formar la precapa.
- Filtración: el licor se pasa a través del filtro para su clarificación.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Para lograr el cumplimiento de los objetivos a través de los resultados de la revisión bibliográfica de los métodos y para poder determinar los parámetros de operación de un filtro prensa de placas y marcos, se describen a continuación las variables que influyen en su determinación así como las variables a medir para determinar la variable respuesta.

3.1.1. Variables de control

En una investigación de tipo experimental existen variables que pueden ser controladas por el analista y otras variables no pueden ser controladas, para que la investigación sea objetiva se deben definir dichas variables con el fin de establecer parámetros de operación en función de dichas variables.

Tabla I. **Determinación de las variables de control**

No.	Variable	Dimensional		Factor Potencial de Diseño	
				Constantes	Variables
Análisis del Proceso					
1	Tiempo de filtrado	Segundos	s		X
2	Volumen de Filtrado	Metros cúbicos	m ³		X
3	Diferencial de Presión	Pascal	Pa		X
4	Masa de Tierra de Diatomeas	Kilogramos	kg	X	
5	Masa de Carbón Activado	Kilogramos	kg	X	
Análisis Externo					
6	Temperatura Ambiente	Grados Celsius	°C	X	
7	Presión Atmosférica	Pascal	Pa	X	

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variables independientes

Dentro de las variables de control se encuentran dos tipos de variables, variables independientes y variables dependientes, las variables independientes se eligen para establecer agrupaciones en el estudio, las variables independientes pueden ser manipuladas por el investigador.

Tabla II. **Determinación de variables independientes**

No.	Variable	Dimensional		Factor Potencial de Diseño	
				Constantes	Variables
Análisis del Proceso					
1	Tiempo de filtrado	Segundos	s		X
2	Volumen de Filtrado	Metro Cúbico	m ³		X
3	Diferencial de Presión	Pascal	Pa		X
4	Masa de Tierra de Diatomeas	Kilogramos	kg	X	
5	Masa de Carbón Activado	Kilogramos	kg	X	
6	Masa de la Torta Húmeda	Kilogramos	kg	X	
7	Masa de la Torta Seca	Kilogramos	kg	X	

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Variables dependientes

Las variables dependientes son variables respuesta dentro de la investigación dichas variables pueden ser influenciadas por los valores de las variables independientes, las variables dependientes son valores que se observan y determinan el efecto de la variable independiente.

Tabla III. Variables dependientes

No.	Variable	Dimensional		Factor Potencial de Diseño	
				Constantes	Variables
Análisis del Proceso					
1	Densidad del Fluido	Kilogramos/ Metro cúbico	kg/m ³	X	
2	Caudal del Filtrado	Metro cúbico/ Segundo	m ³ /s		X
3	Turbidez	NTU	NTU		X

Fuente: elaboración propia.

3.1.4. Variables de medición

Las variables de medición pueden ser cualitativas o cuantitativas para el estudio las variables de medición se expresaron cuantitativamente, siendo estas variables expresadas numéricamente.

Tabla IV. **Variables de medición**

No.	Variable	Dimensional	
1	Tiempo de filtrado	Segundo	s
2	Volumen de Filtrado	Kilogramos	kg
3	Masa de Tierra de Diatomeas	Kilogramos	kg
4	Masa de Carbón Activado	Kilogramos	kg

Fuente: elaboración propia.

3.2. **Delimitación de campo de estudio**

Campo de estudio: Tecnología de Alimentos

Área de investigación: Operaciones Unitarias

Línea de investigación: Laboratorio de Ingeniería Química

Proceso: filtración por medio de un filtro prensa de placas y marcos.

Ubicación: km. 16.5 Carretera Roosevelt 4-81, zona 1 Mixco, Guatemala C.A.

Clima: temperaturas que oscilan entre los 12-28°C según la época del año.

3.3. **Recursos humanos disponibles**

Investigadora: ConyAsenath Juárez Franco; encargada del desarrollo del trabajo de investigación.

Asesor: Ing. Qco. Edwin Morales López; responsable del asesoramiento y conducción del trabajo de investigación.

Coasesor: Inga. Qca. Mónica Franco Gordillo; responsable del coasesoramiento del trabajo de investigación.

Revisor: Ing. Qco. Renato Geovanni Ponciano

3.4. Recursos materiales disponibles

Equipo:

- Filtro prensa de placas y marcos de 24 placas con dimensiones de 60centímetros x 60centímetros, con una placa de celulosa marca Pall con nombre comercial D400, con un mesh de 7 micras.
- Turbidímetro digital con un rango de 0 a 1000 Unidades Nefelométricas con precisión de +/- 2%.
- Balanza Analítica digital con incertidumbre de 0,001g
- Manómetros tipo bourdon con unidad de medición en PSI en una escala de 0 a 100.
- Bomba Centrífuga sencilla de 7 caballos de fuerza y con flujo radial.

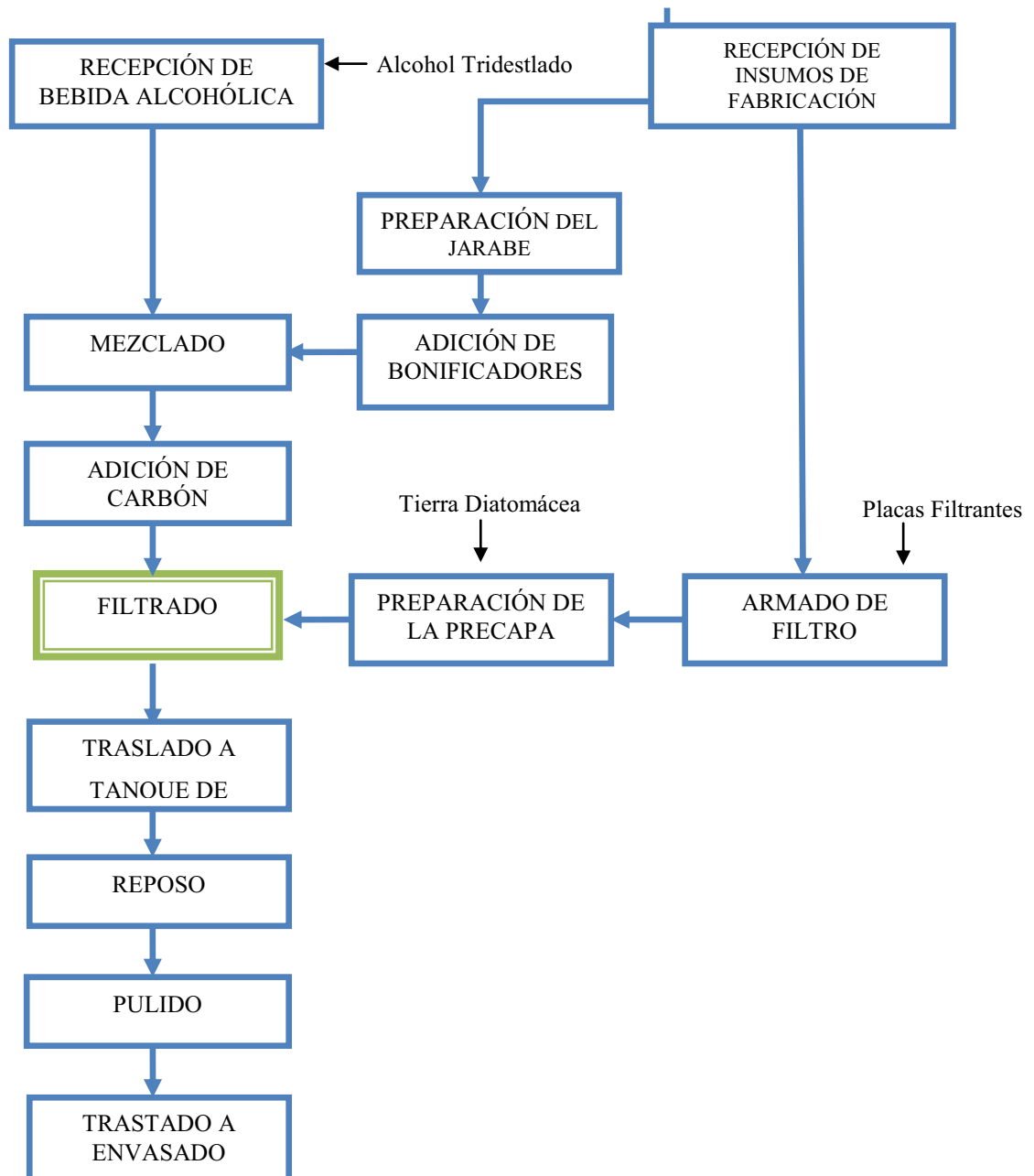
Reactivos:

- Tierra diatomácea de 45% de pureza.
- Carbón activado en polvo, fabricado a partir de madera y activado con ácido fosfórico.

3.5. Proceso de fabricación de bebidas alcohólicas

El proceso de fabricación de bebidas alcohólicas es un proceso sencillo en donde cada etapa requiere de un control establecido para lograr un producto que cumpla las características de calidad e inocuidad establecidas, el proceso de fabricación se puede expresar mediante el siguiente diagrama de flujo:

Figura 6. **Proceso de fabricación de bebidas alcohólicas**



Fuente: elaboración propia.

3.6. Técnica cualitativa o cuantitativa

La técnica de análisis dentro de un estudio puede ser cuantitativa o cualitativa dependiendo si las variables expresan las cualidades del objeto de estudio o si expresan en cantidades numéricas las variables.

3.6.1. Técnica cualitativa

Esta técnica se desarrolló mediante la observación de los cambios de color en las bebidas alcohólicas al ser sometidas al proceso de filtrado.

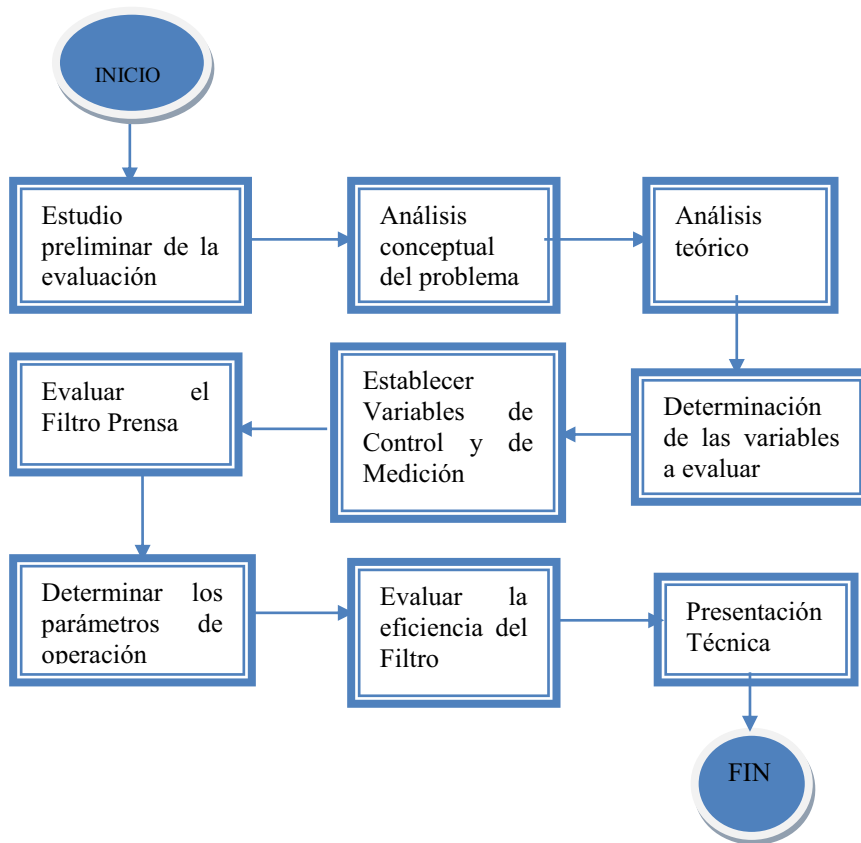
3.6.2. Técnica cuantitativa

La técnica cuantitativa dentro de la investigación se llevo a cabo a través de la evaluación del funcionamiento del filtro prensa, los parámetros de funcionamiento del mismo y el análisis de los datos obtenidos para el desarrollo de resultados, conclusiones y recomendaciones.

3.6.3. Diseño preliminar

El diseño preliminar expresa la forma en que el investigador desea llevara a cabo el estudio, determina los pasos a seguir para poder determinar el objeto del estudio.

Figura 7. **Diseño preliminar**



Fuente: elaboración propia.

3.6.4. Procedimientos para la determinación de los parámetros de operación del filtro prensa

Al establecer las variables de control y de medición que permitieron cumplir los objetivos del presente trabajo de graduación, se fijaron ciertas condiciones y características para que el método sea efectivo y cómodo para la realización del experimento asociado.

La determinación de los parámetros de funcionamiento del filtro prensa se realizó mediante la medición de variables de control tales como volumen de filtrado, tiempo de filtrado, diferencial de presión y la turbidez del producto.

La metodología para establecer los parámetros de funcionamiento del filtro se realizó por medio de una investigación científica de tipo exploratoria, los datos obtenidos se tabularon y se trabajaron mediante un programa de análisis de datos y por medio de funciones matemáticas y gráficas se obtuvieron parámetros de funcionamiento del filtro que garantizan la calidad del producto final.

Lo primero que se realizó fue una gráfica experimental del volumen en función de la relación tiempo-volumen, dicha gráfica se analizó linealmente y se determinó la ecuación de la gráfica y se determinaron la pendiente que se utilizó para encontrar el valor de la resistencia específica del medio y el intercepto que se utilizó para encontrar el valor de la resistencia específica de la torta, todo esto se realizó con ayuda del programa Microsoft Office Excel®.

Para determinar el modelo matemático que permita determinar la posibilidad de encontrar el volumen y tiempo óptimos de filtrado se derivó la ecuación de la gráfica determinada con anterioridad y se graficó la derivada para determinar con dicha gráfica la posibilidad de encontrar el volumen y el tiempo óptimos de filtrado.

Para determinar el caudal máximo de filtrado se utilizó la siguiente ecuación relaciona el área de filtrado, la resistencia del medio filtrante, el diferencial de presión y la viscosidad del producto.

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{A (\Delta p)}{\mu R}$$

Donde:

A = \u00e1rea frontal [m²]

R = resistencia del medio [1/m]

μ = viscosidad del Fluido [Pa s]

Δp =diferencial de presi\u00f3n [Pa]

Por \u00faltimo se realiz\u00f3 un promedio de los datos obtenidos y se procedi\u00f3 a realizar el an\u00e1lisis estad\u00edstico.

3.7. Recolecci\u00f3n y ordenamiento de la informaci\u00f3n

Para determinar el objeto del estudio es necesario establecer c\u00f3mo se van a recolectar los datos y como se van a ordenar dichos datos para que la investigaci\u00f3n sea objetiva y se pueda cumplir con el objetivo propuesto.

3.7.1. Elecci\u00f3n del dise\u00f1o experimental

El dise\u00f1o experimental es una t\u00e9cnica de investigaci\u00f3n que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro del estudio experimental, en el dise\u00f1o experimental se manipulan m\u00faltiples variables vinculadas a una causa con el fin de medir el efecto que tienen sobre la variable de inter\u00e9s.

El dise\u00f1o experimental prescribe una serie de pautas relativas qu\u00e9 variables hay que manipular, de qu\u00e9 manera, cu\u00e1ntas veces hay que repetir el experimento y en qu\u00e9 orden para poder establecer con un grado de confianza predefinido la necesidad de una presunta relaci\u00f3n de causa-efecto.

3.7.1.1. Diseño de tratamientos

Los tratamientos que se utilizaron para cumplir con los objetivos planteados se trabajaron según lo indicado dentro de las normas de la empresa. Siendo las variables de observación: el tiempo de filtrado, el diferencial de presión y el volumen de filtrado.

Se realizó una evaluación de los parámetros de operación para productos que requieren el uso de carbón activado y tierra diatomácea para su filtración.

3.7.1.2. Muestreo

Para que los resultados fuesen precisos, se trató de disminuir los posibles errores utilizando un número adecuado de corridas. Para conseguir lo anterior se utilizó una probabilidad de éxito del 95% por lo que conjuntamente la probabilidad de fracaso se tomó de un 5%, con un nivel de significancia del 5%.

$$N = \frac{Z^2 PQ}{E^2}$$

Donde:

Z = confiabilidad

P = probabilidad de Éxito

Q = probabilidad de fracaso (1 -P)

E = error estimado

N = número de corridas

Para la realización de la investigación se procedió a utilizar un error estimado del 20%, con lo cual utilizando la ecuación anterior se obtiene la cantidad de corridas a utilizar:

$$N = \frac{(1.96)^2 \times 0.95 \times 0.05}{(0.20)^2}$$

$$N = 4.5619 \sim 5$$

Con el dato obtenido anteriormente se define que la cantidad de corridas que se realizaron, 5.

3.7.1.3. Diseño de control de error

Según el número de corridas que se van a utilizar, se realizaran las tomas que sean necesarias para agotar el uso de la placa filtrante con el fin de completar las 5 corridas, con los datos correspondientes en cada unidad de medición se tomará el valor promedio de las lecturas realizadas. Esto con el fin de obtener un valor promedio confiable, es decir, preciso.

3.7.1.4. Diseño de observaciones

Para la realización del trabajo de graduación se trabajó con bebidas alcohólicas que requieren el uso de carbón activado y tierra diatomácea para su clarificación y la variable que se quiere observar es la turbidez a distintos tiempos, volúmenes y diferenciales de presión, para asegurar que se obtuvo la calidad de producto necesaria.

De acuerdo a lo descrito anteriormente se tomaron los datos de acuerdo a tablas de ordenamiento y procesamiento de la información las cuales se realizaron de la forma en que se muestra a continuación.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Tabular la información consiste en colocar en columnas y filas la información obtenida durante la experimentación, dicha información se debe ordenar de tal manera que sea objetiva para obtener los resultados requeridos.

La tabulación se utiliza como un proceso posterior a la recolección de datos primarios y a partir de la tabulación se obtienen resultados concretos en su manera más pura de todo el proceso de investigación, metódicamente es ordenar los datos de manera práctica y concisa que ver los patrones de comportamiento y las tendencias para poder obtener resultados.

Tabla V. **Datos experimentales de masa de carbón activado y tierra diatomácea**

Corrida	Producto	Carbón Activado	Tierra Diatomácea
		Libras (lb)	Libras (lb)
1	A	N_i	M_i
2	A	N_i	M_i
3	A	N_i	M_i
4	A	N_i	M_i
5	A	N_i	M_i

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Datos experimentales del volumen de filtrado**

Corrida	Producto	Volumen Filtrado	Volumen Acumulado	Turbidez
		Litros (l)	Litros (l)	(NTU)
1	A	---	X_i	Z_i
2	A	---	X_i	Z_i
3	A	---	X_i	Z_i
4	A	---	X_i	Z_i
5	A	---	X_i	Z_i
Promedio		---	X_i	Z_i

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Datos experimentales del tiempo de filtrado**

Corrida	Producto	Hora			Turbidez
		Inicio	Final	Tiempo (min)	(NTU)
1	A	---	---	Y_i	Z_i
2	A	---	---	Y_i	Z_i
3	A	---	---	Y_i	Z_i
4	A	---	---	Y_i	Z_i
5	A	---	---	Y_i	Z_i
Promedio		---	---	Y_i	Z_i

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos experimentales del diferencial de presión**

Corrida	Producto	Diferencial de Presión (PSI)						Turbidez (NTU)
		Inicial			Final			
		Entrada	Salida	ΔP	Entrada	Salida	ΔP	
1	A	---	---	W_i	---	---	V_i	Z_i
2	A	---	---	W_i	---	---	V_i	Z_i
3	A	---	---	W_i	---	---	V_i	Z_i
4	A	---	---	W_i	---	---	V_i	Z_i
5	A	---	---	W_i	---	---	V_i	Z_i
Promedio		W_i			V_i			

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Promedio de los datos experimentales**

Producto	Volumen Acumulado	Tiempo de Filtración	Diferencial de Presión (PSI)		Turbidez
	Litros (l)	Horas (h)	Inicial	Final	(NTU)
A	X_A	Y_A	W_A	V_A	Z_A
B	X_B	Y_B	W_B	V_B	Z_B
C	X_C	Y_C	W_C	V_C	Z_C
D	X_D	Y_D	W_D	V_D	Z_D
E	X_E	Y_E	W_E	V_E	Z_E

Fuente: elaboración propia.

Nota: los productos analizados fueron bebidas alcohólicas que requirieran de carbón activado y tierra diatomácea para su clarificación y todos fueron tratados de la misma manera.

4. RESULTADOS

A partir de los datos obtenidos y mediante un análisis matemático de los datos se obtuvieron los siguientes resultados que son respuesta a los objetivos planteados al inicio de la investigación.

Tabla X. Resistencia específica del medio filtrante (α)

Corrida	Resistencia específica del medio filtrante [m kg ⁻¹ 10 ⁸]	Dato Promedio [m kg ⁻¹ 10 ⁸]	Error Típico de la Media [m kg ⁻¹ 10 ⁷]
1	7,53	5,63	8,76
2	7,79		
3	5,18		
4	4,29		
5	3,37		

Fuente: elaboración propia basada en datos de las tablas del apéndice 4 y 5.

Tabla XI. Resistencia específica de la torta filtrante (R)

Corrida	Resistencia específica de la torta filtrante [m ⁻¹ 10 ¹⁰]	Dato Promedio [m ⁻¹ 10 ¹⁰]	Error Típico de la Media [m ⁻¹ 10 ¹⁰]
1	2,08	1,51	1,51
2	1,36		
3	1,20		
4	1,51		
5	1,40		

Fuente: elaboración propia basada en datos de las tablas del apéndice 4 y 5.

Tabla XII. Volumen óptimo de filtrado (V)

Corrida	Volumen óptimo de filtrado [m ³ 10 ⁻¹]	Dato Promedio [m ³ 10 ⁻¹]	Error Típico de la Media [m ³ 10 ⁻²]
1	3,82	2,96	7,07
2	3,19		
3	1,74		
4	3,92		
5	3,70		

Fuente: elaboración propia basada en datos de las tablas del apéndice 4 y 5.

Tabla XIII. **Tiempo óptimo de filtrado (t)**

Corrida	Volumen óptimo de filtrado [s 10¹]	Dato Promedio [s 10¹]	Error Típico de la Media [s 10⁻¹]
1	8,76	5,90	1,51
2	5,21		
3	0,34		
4	8,09		
5	7,11		

Fuente: elaboración propia basada en datos de las tablas del apéndice 4 y 5.

Tabla XIV. **Caudal máximo de filtrado (q_{máx})**

Corrida	Caudal máximo de filtrado [m³ s⁻¹ 10⁻³]	Dato Promedio [m³ s⁻¹ 10⁻³]	Error Típico de la Media [m³ s⁻¹ 10⁻³]
1	4,43	6,07	1,25
2	11,5		
3	6,05		
4	5,18		
5	6,31		

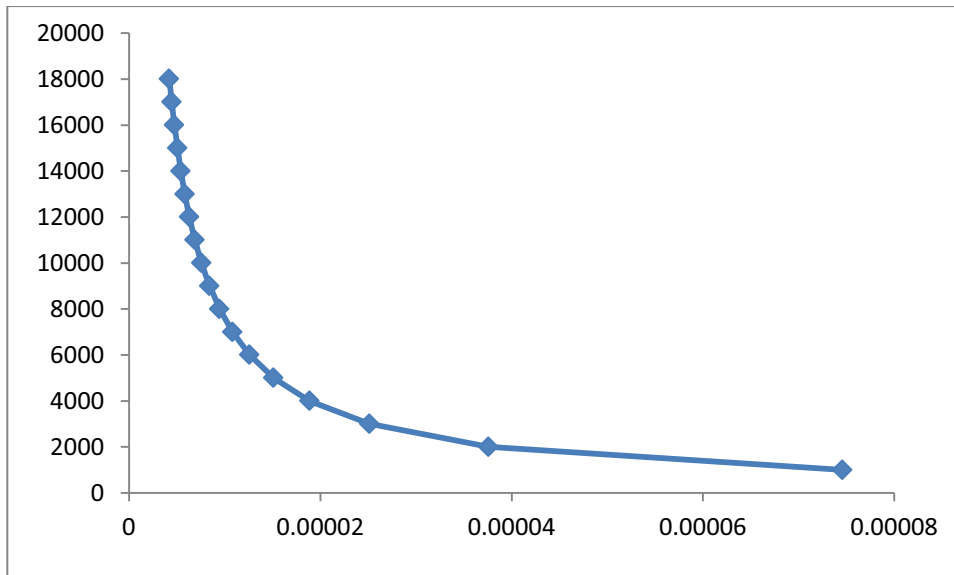
Fuente: elaboración propia basada en datos de las tablas del apéndice 4 y 5.

Tabla XV. Turbidez del producto filtrado(T)

Corrida	Volumen óptimo de filtrado [NTU]	Dato Promedio [NTU]	Error Típico de la Media [NTU 10 ⁻³]
1	0,13	0,13	1,25
2	015		
3	0,13		
4	0,13		
5	0,14		

Fuente: elaboración propia basada en datos de las tablas del apéndice 4 y 5.

Figura 8. Gráfica del modelo matemático de la función del volumen de filtrado



Fuente: elaboración propia basada en datos de las tablas del apéndice 4 y 5.

Tabla XV. **Datos gráfica número 8**

Color	Modelo Matemático	Intervalo de Validez
	$F(C) = V / (13,19V^2 + 218,81V)$	[0 -0,00008]

Fuente:datos gráfica número 8.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar la operación de filtrado continuo de un filtro prensa de placas y marcos para la clarificación de bebidas alcohólicas, esto se realizó por medio del establecimiento de parámetros de operación que garantizaran la calidad del producto filtrado.

Para llevar a cabo dicho objetivo se evaluó el filtro prensa por medio de una investigación científica tipo exploratoria, se realizaron cinco corridas utilizando una placa filtrante en cada una de ellas, para cada corrida se realizaron medidas de volumen, diferencial de presión y turbidez cada hora durante el tiempo de filtrado con dichas mediciones y al hacer un análisis de los datos se encontraron diversos resultados con lo que se pudo deducir diversas conclusiones y sus respectivas recomendaciones con el fin de cumplir con el objetivo planteado.

En un filtro prensa donde el caudal de filtración es constante y el diferencial de presión varía en función del tiempo el líquido a filtrar experimenta dos tipos de resistencia en serie una de las cuales es la resistencia de la torta filtrante(α) y la otra la resistencia del medio filtrante (R), la resistencia de la torta filtrante aumenta conforme se va dando la filtración, para el presente estudio la resistencia específica de la torta filtrante presento un valor de 15,1 por metro, dicho dato es un promedio de varias corridas realizadas que nos indica la resistencia promedio específica del filtro en estudio.

La mayoría de las tortas son compresibles y su resistencia específica cambia con la caída de presión.

La resistencia de la torta filtrante es la oposición que dicha torta presenta a que el líquido pase a través de ella. Este es el resultado de los promedios de las resistencias específicas efectivas obtenidas de una serie de corridas, el dato obtenido indica que el fluido va a tener una resistencia a un avance de 15,1 metros a través de la torta. La resistencia específica también varía debido a que la torta se va comprimiendo cada vez por efecto de la presión ejercida sobre ella, lo que causa que las partículas de la torta se unan más y su resistencia aumente.

Dentro de las resistencias que experimenta el líquido al ser filtrado se encuentra la resistencia que ejerce el medio filtrante, la cual en la teoría se asume es constante, sin embargo en la práctica no es así ya que cierta penetración y bloqueo se da por medio de las partículas en suspensión cuando dichas partículas penetran en el medio, logrando que los poros de la placa filtrante se tapen y no se pueda atravesar a través de ella.

Tanto la resistencia de la torta como la resistencia del medio filtrante dan como resultado que la presión de entrada del fluido y la presión de salida sean diferentes debido a que las partículas al penetrar y bloquear tanto la torta como el medio impiden el paso del líquido a filtrar, creando así un diferencial de presión, el cual aumenta conforme la filtración se lleva a cabo hasta llegar a tener un diferencial de presión constante.

La resistencia específica del medio filtrante tiene un valor de $5,63 \times 10^8$ metros sobre kilogramos, como resultado del promedio de las resistencias específicas efectivas de las diferentes corridas realizadas con el filtro.

La resistencia específica del medio R normalmente debería ser constante pero varía tanto por la penetración y bloqueo de partículas en suspensión como por la presión aplicada debido a la compresión de las fibras que puede resultar de la misma.

Debido a la caída de presión el filtro instalado incluye pérdidas no solo del medio sino también asociadas al bombeo y a los puertos de entrada y salida del filtro, para el cálculo de las resistencias del filtro dichos datos se toman como nulos, debido a que su valor es prácticamente despreciable.

Para poder determinar el volumen y el tiempo óptimos de filtrado se desarrollo un modelo matemático a partir de la relación del caudal de filtración, el volumen y el tiempo de filtrado. Dicha relación se encontró mediante los datos originales tomados en la empresa, siendo esta ecuación la misma que se utilizó para encontrar la resistencia de la torta filtrante y la resistencia del medio, debido a que el caudal de filtración, es la relación entre el volumen filtrado en función del tiempo de filtración, se utilizó la relación matemática descrita en la ecuación número uno; la cual sirvió para determinar tanto la resistencia específica del medio como la resistencia específica de la torta. Se despejo en función del volumen para poder determinar la existencia de un punto de crítico para determinar un volumen o tiempo óptimos de filtrado.

Al realizar dicho análisis se determinó que el modelo matemático encontrado resultante era inadecuado para determinar el volumen óptimo de filtrado ya que este no presenta puntos críticos y al derivar la función no es posible encontrar máximos y mínimos por lo cual se descartó la posibilidad de determinar un volumen o un tiempo óptimos de filtrado.

El proceso de filtración continua de bebidas alcohólicas y en general el proceso de filtración de un filtro prensa en general requiere que se coloque una precapa de filtrado como coadyuvante de la filtración, la cual se posiciona en el filtro mediante la adición de tierra diatomácea a una parte del licor a filtrar. Este se recircula hasta que toda la tierra diatomácea se deposite sobre la placa filtrante, previo a ser filtrado al licor se le añade carbón activado para poder eliminar contaminación, ya sean olores, sabores, colores entre otros que pueda presentar el producto a filtrar.

El caudal es el volumen de un fluido que pasa por una posición en una unidad de tiempo. De acuerdo a los resultados tenemos que el caudal máximo que puede presentar el filtro garantizando la calidad del producto es de $6,70 \times 10^{-3}$ metros cúbicos sobre segundo, lo que es equivalente a 24,120 litros por hora.

Al filtrar el licor que contiene el carbón activado, el proceso provoca que sobre la precapa de tierra diatomácea se forme una capa de carbón activado que no permite que el licor fluya libremente hacia las placas filtrantes, ya que esta capa de carbón activado se deposita de tal forma que adquiere una consistencia que se podría asemejar a un plástico, esto hace que la filtración sea casi imposible y el tiempo en que el licor pasa fluidamente con un caudal alto hacia la placa filtrante sea muy corto, ya que en el fondo del tanque de filtración se deposita el carbón que fue añadido al licor y al iniciar la filtración dicho carbón se deposita rápidamente sobre la precapa de tierra diatomácea.

Al comparar los datos originales con el resultado obtenido de caudal máximo de filtración se puede observar que el caudal máximo solo se obtiene en la primera hora de trabajo del filtro prensa y luego dicho caudal va disminuyendo debido a que el filtro se va saturando.

El caudal de filtrado es función de la resistencia del medio, la viscosidad y del diferencial de presión. De acuerdo a la teoría, la viscosidad permanece constante así como el diferencial de presión. Debido a que la resistencia del medio es constante y el caudal es inversamente proporcional a dicha resistencia y ésta va aumentando con el paso del tiempo entonces el caudal disminuye conforme la filtración está en proceso. Esto indica que aunque el caudal máximo sea una cantidad fija, el caudal promedio va a ser mucho menor a éste.

La turbidez que presentan los productos al ser filtrados se encuentra debajo del máximo permitido con un promedio 0,13 NTU, siendo el máximo permitido ya que los clientes tienen por requisito de calidad cualquier valor que se encuentre debajo de 1 NTU. El valor promedio de turbidez es mucho más bajo a lo requerido por los clientes por lo cual pueden presentar un producto de calidad que cumpla con los requisitos.

CONCLUSIONES

1. Se encontró que el promedio de la resistencia del medio filtrante (α) es de $5,63 \cdot 10^8$ metros sobre kilogramo, dicha resistencia no permanece constante sino que aumenta debido que existe cierta penetración y bloqueo por parte de las partículas en suspensión que se da en el medio filtrante.
2. La resistencia de la torta filtrante (R) es de 15,1, la cual se considera elevada debido a la capa de partículas de carbón que se forma sobre esta, provocando una saturación rápida del filtro lo cual es inadecuado para los objetivos de la empresa, ya que el tiempo de proceso de filtración es más alto de lo esperado.
3. De acuerdo al modelo matemático obtenido a partir de datos experimentales no es posible determinar un volumen y tiempo óptimos de filtrado que garanticen la calidad del producto, ya que la función desarrollada no posee puntos de críticos donde se pueda encontrar un valor máximo o mínimo.
4. El caudal máximo ($q_{\text{máx}}$) es de $6,70 \times 10^{-3}$ metros cúbicos sobre segundo. No existe diferencia significativa entre el caudal máximo de operación que puede presentar el filtro y el caudal máximo determinado para su óptimo funcionamiento.

5. La turbidez promedio obtenida del proceso de filtración es de 0,13 NTU, menor a la especificada por la empresa, garantizando que la calidad del producto filtrado es óptima.

RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio que permita determinar la posibilidad de disminuir la cantidad de carbón activado que se le aplica al licor previamente a ser filtrado.
2. Evaluar la posibilidad de un cambio de método en cuanto al uso de tierra diatomácea y carbón activado, añadiendo tierra diatomácea al licor previo a filtrarse para que la torta formada permita que el licor fluya más libremente.
3. Realizar un análisis económico en cuanto a las ventajas del uso de un filtro de mayor capacidad con el fin de disminuir el tiempo de filtración y por ende gastos operativos y de mano de obra.
4. Analizar la posibilidad de realizar la filtración en dos partes para poder eliminar el carbón depositado en el filtro y aprovechar el caudal inicial de trabajo.
5. Evaluar la posibilidad de que la salida del licor hacia el filtro se encuentre por arriba de la capa de carbón activado depositada en el fondo del tanque de reposo.

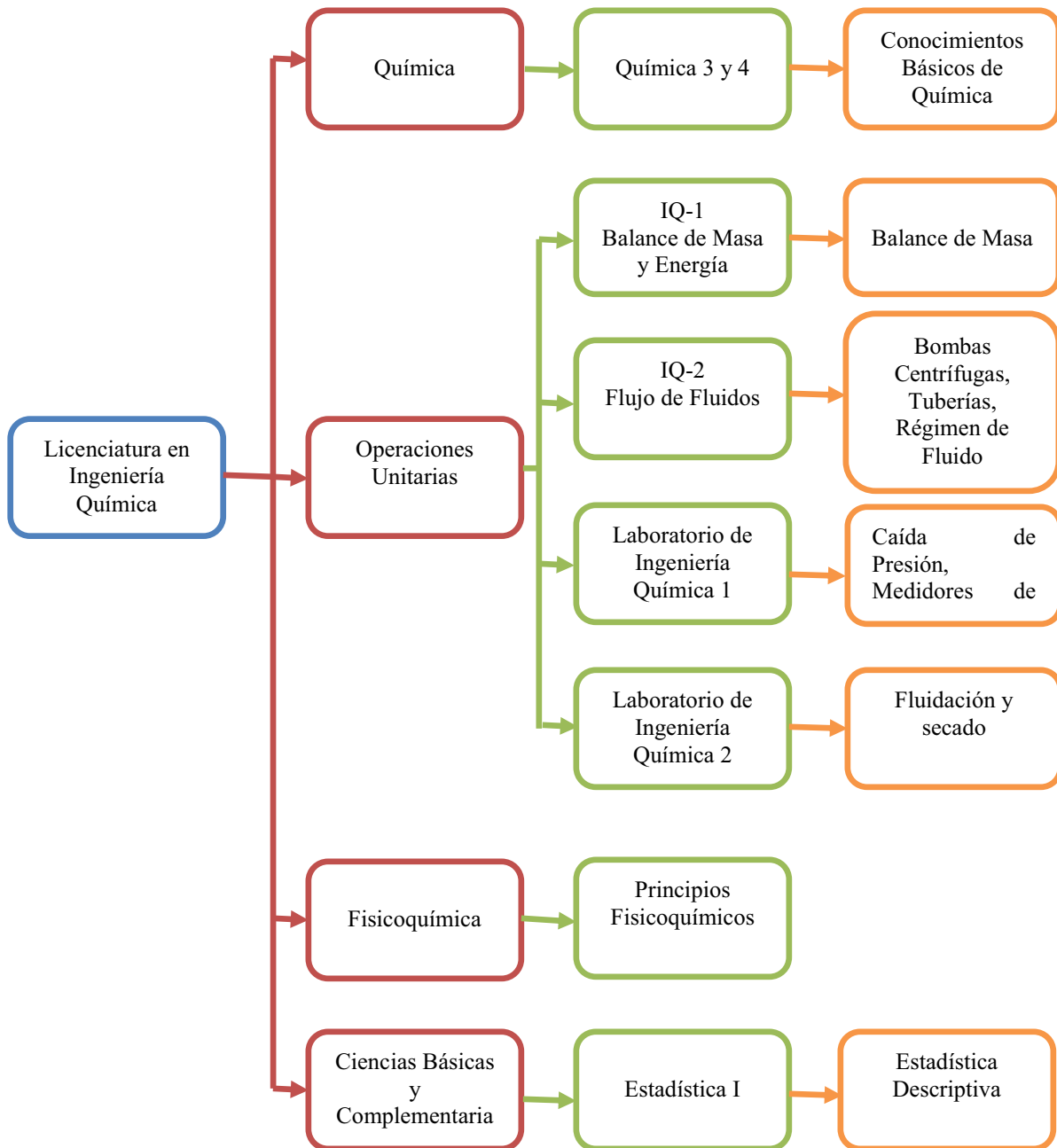
BIBLIOGRAFÍA

1. CHEN, Wu. Solid-Liquid separation via filtration, Technical & practical. *Chemical Engineering Magazine*, 104 (2): 66-72, febrero 1997. ISSN: 0009-2460.
2. COULSON, John Metcalfe. *Ingeniería química: operaciones básicas*. 3a.ed. España: Reverté, 2003. 413 p. ISBN: 8429171371.
3. DEVORE, Jay L. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 6a.ed. México: Thomson, 2005. 744 p. ISBN: 9706868313.
4. IBARZ RIBAS, Alberto. *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. España: Mundi-Prensa, 2005. 865 p. ISBN: 8484761630.
5. McCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4ª.ed. España: McGraw Hill, 1991. 1224 p. ISBN: 8429173617.
6. PERRY, Robert H.; GREEN, Don W.; MALONEY, James O. *Manual del Ingeniero Químico*. 6a.ed. Tomo 5. Capítulo Seis. España: McGraw Hill, 1992. 2577 p. ISBN: 8448133455.

7. SENTMANAT, José M. Clarifying liquid filtration: a practical guide to liquid filtration. Technical & practical. *Chemical Engineering Magazine*, 280 (10): 62-63, Octubre, 2011. ISSN: 0009-4528
8. SVAROVSKY, Ladislav. *Solid-Liquid separation*. 4a- ed. Londres, Inglaterra: Butterworth Heinemann, 2000. 568 p. ISBN: 0080541445.
9. VETTORAZZI GONZÁLES, Claudia Regina. *Instalación y práctica de filtración en unidad de filtro prensa en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad Rafael Landívar*. Tesis (Ingeniería Química). Guatemala: Universidad Rafael Landívar, 1999. 83 p.

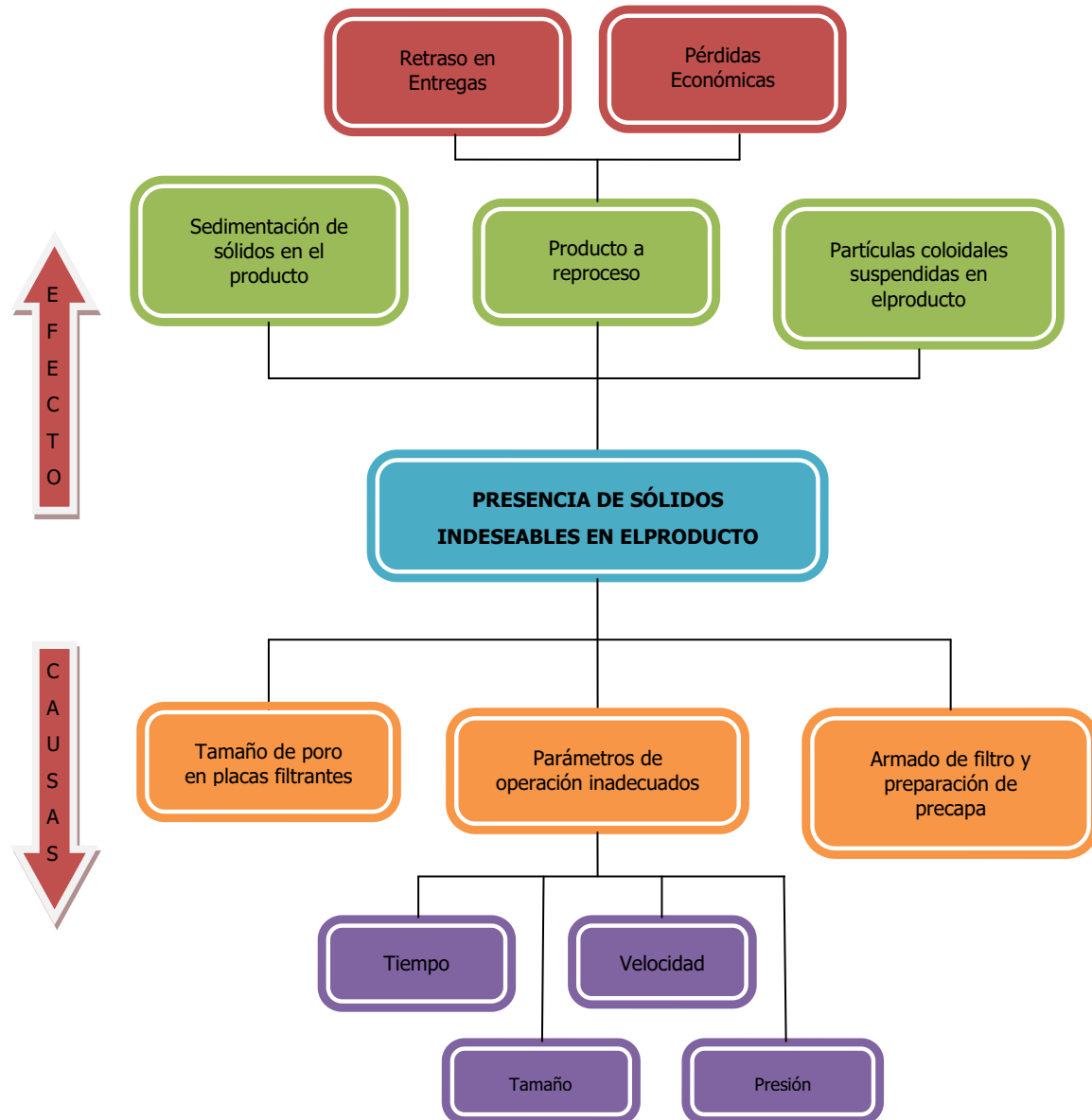
APÉNDICES

Apéndice 1. Tabla de Requisitos Académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de Problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Muestra de Cálculo

Determinación de la gráfica experimental del tiempo en función del volumen

Debido a que el diferencial de presión ΔP es constante para la determinación experimental de la resistencia de la torta α y la resistencia del medio filtrante R se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{t}{V} = aV + b$$

[Ecuación 1, Ref.4]

Donde:

t = tiempo de filtración [s]

V = volumen filtrado [m³]

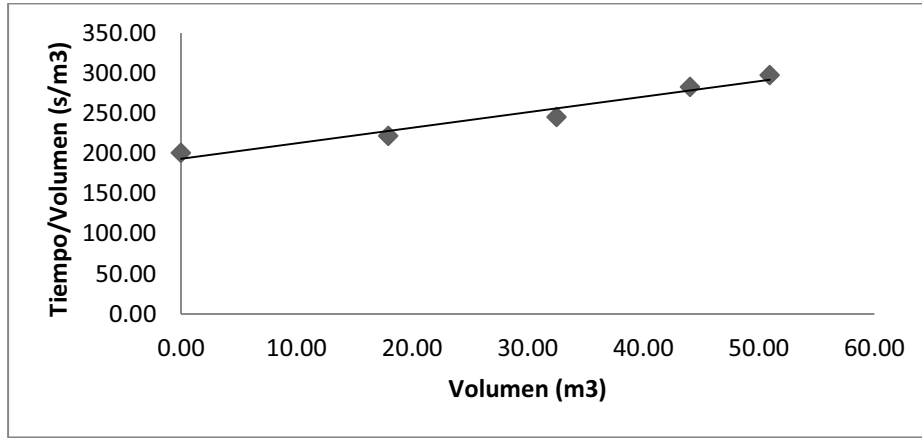
a = constante [s/m⁶]

b = constante [s/m³]

Para la determinación de “a” y “b” realizamos una grafica de t/V en función de t/V la cual tendrá una tendencia lineal con ayuda Microsoft Office Excel© encontramos la ecuación de la gráfica para obtener los valores de a que sería la pendiente de la gráfica y b que sería el intercepto.

Ejemplo: para los datos de la filtración No.1 y placa No.1.

Gráfica No 1



Fuente: Datos calculados, figura No.1.

Cuyo modelo matemático es:

$$t/V = 1,937V + 193.0$$

Donde:

$$a = 1.937 \text{ [s/m}^6\text{]}$$

$$b = 193.0 \text{ [s/m}^3\text{]}$$

Nota: de la misma forma como se determino en el ejemplo se determinaron los demás valores.

Determinación de la constante a_1

$$a = \frac{a_1}{2A^2\Delta p}$$

[Ecuación 2, Ref.4]

Donde:

$$a = \text{constante [s/m}^6\text{]}$$

$$a_1 = \text{constante [kg/m}^3 \text{ s]}$$

$$A = \text{área frontal [m}^2\text{]}$$

Δp = diferencial de Presión [Pa]

Ejemplo: para los datos de la filtración No.1 y placa No.1 de la tabla XVII

$$a_1 = a * 2A^2 \Delta p$$
$$a_1 = 1.937 * 2(1.07 E - 3)^2 137,895$$
$$a_1 = 69,247 \frac{kg}{m^3 s}$$

Nota: de la misma forma como se determino en el ejemplo se determinaron los demás valores.

Determinación de la constante b_1

$$b = \frac{b_1}{A \Delta p}$$

[Ecuación 3, Ref.4]

Donde:

b = constante [s/m³]

b_1 = constante [kg/m²s]

A = área frontal [m²]

Δp = diferencial de presión [Pa]

Ejemplo: para los datos de la filtración No.1 y placa No.1.

$$b_1 = b * A \Delta p$$
$$b_1 = 193,0 * 1,07 E - 3 137,985$$
$$b_1 = 9,59 x 10^{-6} \frac{Kg}{m^2 s}$$

Nota: de la misma forma como se determinó en el ejemplo se determinaron los demás valores.

Determinación de la Resistencia específica del medio

$$a_1 = \alpha \mu c$$

[Ecuación 4, Ref.4]

Donde:

a_1 = constante [$\text{kg/m}^3 \text{ s}$]

α = resistencia de la Torta [m/kg]

μ = viscosidad del Fluido [Pa s]

c = concentración de sólidos en suspensión [kg/m^3]

Ejemplo: para los datos de la filtración No.1 y placa No.1 de la tabla XVII

$$\alpha = \frac{a_1}{\mu c}$$
$$\alpha = \frac{69,247}{1,07 E - 3 * 0,65}$$
$$\alpha = 4,18 \times 10^7 \frac{\text{m}}{\text{Kg}}$$

Determinación de la Resistencia de la Torta

$$b_1 = \mu R$$

[Ecuación 5, Ref.4]

Donde:

b_1 = constante [kg/s m^2]

R = resistencia del medio [$1/\text{m}$]

μ = viscosidad del Fluido [Pa s]

Ejemplo: Para los datos de la filtración No.1 y placa No.1.

$$R = b_1 \mu$$

$$R = 9,59 E - 6 \cdot 0,36$$

$$R = 8,92 \times 10^9 \frac{1}{m}$$

Nota: de la misma forma como se determino en el ejemplo se determinaron los demás valores.

Determinación del volumen y el tiempo óptimos de filtración

Las condiciones óptimas de de filtración se obtienen al maximizar la función de la capacidad de filtración, es decir:

$$\frac{\delta F(c)}{\delta V} = 0$$

Ya que la capacidad de filtración se define como el cociente entre el volumen de filtrado y el tiempo de un ciclo de filtración:

$$F(c) = \frac{V}{t_{CICLO}}$$

El tiempo de un ciclo se define como la suma de los tiempos de filtrado.

Esta sería la condición máxima, al igualar cero la derivada de la capacidad de filtración con respecto del volumen filtrado es posible obtener el volumen óptimo de filtrado, de igual manera puede obtenerse el tiempo óptimo de filtración si la derivada se realiza respecto al tiempo.

Con la única diferencia es que para encontrar el volumen óptimo el tiempo se debe expresar en función del volumen de filtrado, y para el tiempo óptimo el volumen se debe expresar en función del tiempo de filtrado.

Para el caso del tiempo óptimo de filtración despejando el tiempo de la Ecuación 1 se tendría que:

$$t = aV^2 + bV$$

[Ecuación 6, Ref.1]

Donde:

t = tiempo de Filtración [s]

V = volumen filtrado [m³]

a = constante [s/m⁶]

b = constante [s/m³]

Con lo que la capacidad de filtración se puede expresar como:

$$F(c) = \frac{V}{(aV^2 + bV)}$$

[Ecuación 7, Ref.1]

Donde:

F(c) = capacidad de filtración [m³/s]

V = volumen filtrado [m³]

a = constante [s/m⁶]

b = constante [s/m³]

Se graficó la ecuación tomando para determinar si existen puntos críticos con el fin de encontrar un máximo donde exista un volumen y un tiempo optimo de filtración.

Determinación del caudal máximo según el tiempo de filtración

Para el cálculo del caudal máximo se tiene:

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{A (\Delta p)}{\mu R}$$

[Ecuación 9, Ref.1]

Donde:

A = área frontal [m²]

R = resistencia del medio [1/m]

μ = viscosidad del Fluido [Pa s]

Δp =diferencial de presión [Pa]

Al encontrar el caudal máximo se evaluará la tendencia de la turbidez conforme el caudal aumenta y se determinará si se cumple con la calidad de producto requerida por la empresa.

Ejemplo: para los datos de la filtración No.1 y placa No.1.

$$q_{m\acute{a}x} = \frac{A (\Delta p)}{\mu R}$$
$$q_{m\acute{a}x} = \frac{0,36 (137,895)}{1,07 E - 03 * 8,29E + 09}$$
$$q_{m\acute{a}x} = 5,18 x 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

Nota: de la misma forma como se determino en el ejemplo se determinaron los demás valores.

Dato Promedio Estadístico

El promedio (\bar{a}), permitirá obtener un dato representativo para cada variable en cada medición, de esta forma se tomara en cuenta las posibles variaciones aleatorias junto con la desviación estándar:

$$\bar{a} = \frac{\sum_i^n a_i}{n} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

[Ecuación 10, Ref.3]

Donde:

\bar{a} = valor Promedio

a_i = valor i

n = número de datos

Ejemplo: para los valores de la resistencia de la torta filtrante de las 5 corridas.

$$\bar{a} = \frac{\sum_i^n a_i}{n}$$

$$\bar{a} = \frac{7,53 E + 08 + 7,79 E + 08 + 5,18 E + 08 + 4,29 E + 08 + 3,31 E + 08}{5}$$

$$\bar{a} = 5,63 \times 10^8 \frac{m}{Kg}$$

Nota: de la misma forma como se determinó en el ejemplo se determinaron los demás valores.

Desviación Estándar

La desviación estándar (S_a), permitirá cuantificar la dispersión de los valores para una misma medición respecto al valor promedio, lo cual representará el error aleatorio causado por diversos factores:

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_i^n |\bar{a} - a_i|}{n - 1}}$$

[Ecuación 11, Ref.3]

Donde:

\bar{a} = valor Promedio

a_i = valor i

n = número de datos

S_a = desviación estándar de la variable a

Ejemplo: para los valores de la resistencia de la torta filtrante de las 5 corridas.

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_i^n |\bar{a} - a_i|}{n - 1}}$$

$$S_a = \sqrt{\frac{|5,63E + 8 - 7,53E + 8| + |5,63E + 8 - 7,79E + 8| + |5,63E + 8 - 5,18E + 8| + |5,63E + 8 - 4,29E + 8| + |5,63E + 8 - 3,37E8|}{5 - 1}}$$

$$S_a = 1,95 \times 10^8$$

Nota: de la misma forma como se determinó en el ejemplo se determinaron los demás valores.

Determinación de la Varianza de la muestra

La varianza de una variable aleatoria es una medida de dispersión del cuadrado de la desviación estándar de dicha variable frente a su media.

$$Var = \frac{\sum_i^n |\bar{a} - a_i|}{n - 1}$$

[Ecuación 12, Ref.3]

Donde:

\bar{a} = valor Promedio

a_i = valor i

n = número de datos

Var = varianza

Ejemplo: para los valores de la resistencia de la torta filtrante de las 5 corridas.

$$Var = \frac{\sum_i^n |\bar{a} - a_i|}{n - 1}$$

$$Var = \frac{|5,63E + 8 - 7,53E + 8| + |5,63E + 8 - 7,79E + 8| + |5,63E + 8 - 5,18E + 8| + |5,63E + 8 - 4,29E + 8| + |5,63E + 8 - 3,37E8|}{5 - 1}$$

$$Var = 3,84E + 16$$

Nota: de la misma forma como se determinó en el ejemplo se determinaron los demás valores.

Determinación del error típico de la media

$$\sigma = \frac{S_a}{\sqrt{n}}$$

[Ecuación 13, Ref.3]

Donde:

σ = error típico de la media

n = número de datos

S_a = desviación estándar de la variable a

Ejemplo: para los valores de la resistencia de la torta filtrante de las 5 corridas.

$$\sigma = \frac{S_a}{\sqrt{n}}$$

$$\sigma = \frac{1,95 E + 08}{\sqrt{5}}$$

$$\sigma = 8,76 x 10^7$$

Nota: de la misma forma como se determinó en el ejemplo se determinaron los demás valores.

Apéndice 4. Análisis Estadístico

Análisis Estadístico promedio y desviación estándar

Dato	Promedio	Desviación Estándar
Resistencia de la Torta Filtrante	$5,63 \times 10^8$	$1,96 \times 10^8$
Resistencia del Medio	$1,51 \times 10^{10}$	$1,96 \times 10^8$
Volumen Óptimo	$2,96 \times 10^{-1}$	$1,58 \times 10^{-1}$
Tiempo óptimo	$5,90 \times 10$	$3,39 \times 10$
Caudal máximo	$6,70 \times 10^{-3}$	$2,79 \times 10^{-3}$
Turbidez	0,13	$9,09 \times 10^3$

Fuente: Muestra de Cálculo, ecuaciones 10 y 11.

Análisis Estadístico varianza y error típico de la media

Dato	Varianza	Error típico de la media
Resistencia de la Torta Filtrante	$3,84 \times 10^{16}$	$8,76 \times 10^7$
Resistencia del Medio	$1,14 \times 10^{19}$	$1,51 \times 10^9$
Volumen Óptimo	$2,50 \times 10^{-2}$	$7,07 \times 10^{-2}$
Tiempo óptimo	$1,15 \times 10^3$	$1,51 \times 10$
Caudal máximo	$7,79 \times 10^{-6}$	$1,25 \times 10^{-3}$
Turbidez	$8,27 \times 10^{-5}$	$4,07 \times 10^{-3}$

Fuente: Muestra de Cálculo, ecuaciones 12 y 13.

Apéndice 5. Datos Originales

Datos filtración 1, placa No.1

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	13,790		
3,600	17,95	75,842	17,95	200,56
7,200	32,50	103,421	14,55	221,54
10,800	44,05	124,106	11,55	245,18
14,400	50,95	137,895	6,90	282,63
16,056	54,00	137,895	3,05	297,33
Promedio:			10,80	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 2, placa No.1

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	68,948		
3,600	14,55	213,737	14,55	247,42
7,200	22,55	241,317	8,00	319,29
10,800	28,80	248,211	6,25	375,00
14,400	33,65	255,106	4,85	427,93
18,000	38,85	262,001	5,20	463,32
21,600	40,65	262,001	1,80	531,37
25,200	45,05	268,896	4,40	559,38
28,800	47,75	268,896	2,70	603,14
32,400	49,95	275,790	2,20	648,65
36,000	52,45	282,685	2,50	686,37
36,900	54,00	282,685	1,55	683,33
Promedio:			4,91	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 3, placa No.1

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	62,053		
3,600	13,95	179,264	13,95	258,16
7,200	23,95	220,632	10,00	300,69
10,800	31,95	234,422	8,00	338,08
14,400	38,45	241,317	6,50	374,56
18,000	43,95	248,211	5,50	409,60
21,600	48,45	248,211	4,50	445,87
24,588	54,05	255,106	5,61	454,91
Promedio:			7,72	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 4, placa No.1

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	82,737		
3,600	14,54	220,632	14,54	247,66
7,200	22,04	241,317	7,50	326,74
10,800	28,04	248,211	6,00	385,22
14,400	32,53	248,211	4,49	442,67
18,000	37,04	248,211	4,51	486,01
21,600	40,54	248,211	3,50	532,86
25,200	44,04	255,106	3,50	572,26
28,800	47,04	255,106	3,00	612,30
32,400	50,00	262,001	2,96	648,00
Promedio:			5,56	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 5, placa No.1

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	82,737		
3,600	4,54	255,106	4,54	793,65
7,200	7,04	255,106	2,50	1,023,31
10,800	9,20	262,001	2,16	1,173,91
14,400	11,54	262,001	2,34	1,248,27
18,000	13,84	262,001	2,30	1,300,95
18,900	14,00	262,001	0,16	1,350,00
Promedio:			2,33	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 6, placa No.1

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	62,053		
3,600	11,05	110,316	11,05	325,79
7,200	19,95	151,685	8,90	360,90
10,800	24,10	144,790	4,15	448,13
Promedio:			8,03	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 7, placa No.1

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	62,053		
3,600	11,91	227,527	11,91	302,39
7,200	19,63	248,211	7,73	366,79
10,800	25,81	255,106	6,18	418,44
14,400	30,69	255,106	4,88	469,21
18,000	34,12	255,106	3,43	527,63
21,600	38,46	255,106	4,34	561,67
25,200	42,10	255,106	3,64	598,57
28,800	46,96	262,001	4,86	613,35
32,400	49,70	262,001	2,75	651,91
36,000	52,60	268,896	2,90	684,41
39,600	54,25	268,896	1,65	729,95
40,176	57,00	282,685	2,75	704,84
Promedio:			4,75	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 8, placa No.1

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	62,053		
3,600	12,69	213,737	12,69	283,80
7,200	19,75	234,422	7,07	364,56
8,640	24,00	241,317	4,25	360,00
Promedio:			8,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa

Datos filtración 1, placa No.2

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	41,369		
3,600	16,15	179,264	16,15	222,91
7,200	27,15	262,001	11,00	265,19
10,800	35,65	289,580	8,50	302,95
14,400	42,65	310,264	7,00	337,63
18,000	49,75	310,264	7,10	361,81
21,600	52,15	310,264	2,40	414,19
25,200	54,65	310,264	2,50	461,12
28,800	56,25	317,159	1,60	512,00
32,400	60,65	317,159	4,40	534,21
34,668	63,90	317,159	3,25	542,54
Promedio:			6,39	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 2, placa No.2

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	55,158		
3,600	14,65	158,579	14,65	245,73
7,200	22,15	220,632	7,50	325,06
10,800	28,15	248,211	6,00	383,66
14,400	34,65	255,106	6,50	415,58
18,000	39,35	255,106	4,70	457,43
21,600	42,95	255,106	3,60	502,91
25,200	46,15	275,790	3,20	546,05
28,800	49,25	289,580	3,10	584,77
32,400	52,15	303,369	2,90	621,28
33,300	54,00	310,264	1,85	616,67
Promedio:			5,40	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 3, placa No.2

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	27,579		
3,600	14,25	96,527	14,25	252,63
7,200	21,95	137,895	7,70	328,02
10,800	28,15	151,685	6,20	383,66
13,176	30,10	158,579	1,95	437,74
Promedio:			7,53	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 4, placa No.2

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	158,579		
1,800	2,85	186,158	2,85	631,58
3,600	5,00	193,053	2,15	720,00
Promedio:			2,50	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 5, placa No.2

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	27,579		
3,600	16,95	96,527	16,95	212,45
7,200	27,55	144,790	10,60	261,39
10,800	35,85	151,685	8,30	301,30
14,400	43,25	172,369	7,40	332,99
18,000	48,75	172,369	5,50	369,27
18,900	52,00	172,369	3,26	363,46
Promedio:			8,67	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 6, placa No.2

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	27,579		
3,600	10,50	75,842	10,50	342,86
7,200	16,20	89,632	5,70	444,44
Promedio:			8,10	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 7, placa No.2

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	27,579		
3,600	14,70	55,158	14,70	244,90
7,200	24,90	68,948	10,20	289,16
10,800	34,20	75,842	9,30	315,79
14,400	42,20	82,737	8,00	341,23
18,000	49,90	82,737	7,70	360,72
21,600	56,80	89,632	6,90	380,28
25,200	62,60	89,632	5,80	402,56
26,388	64,00	89,632	1,40	412,31
Promedio:			8,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 8, placa No.2

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	75,842		
3,600	17,92	310,264	17,92	200,95
7,200	24,61	330,948	6,70	292,56
10,800	30,28	337,843	5,67	356,73
14,400	35,00	337,843	4,73	411,43
18,000	39,30	344,738	4,30	458,02
21,600	43,35	344,738	4,05	498,27
25,200	47,20	344,738	3,85	533,90
28,800	50,85	351,633	3,65	566,37
32,400	54,05	351,633	3,20	599,44
36,000	57,00	351,633	2,95	631,58
Promedio:			5,70	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 9, placa No.2

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	220,632		
1,800	2,90	234,422	2,90	620,69
3,600	5,00	234,422	2,10	720,00
Promedio:			2,50	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 1, placa No.3

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	41,369		
3,600	11,91	89,632	11,91	302,39
7,200	19,63	117,211	7,73	366,79
10,800	25,81	144,790	6,18	418,44
13,824	28,00	158,579	2,19	493,71
Promedio:			7,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 2, placa No.3

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	158,579		
3,600	9,15	199,948	9,15	393,44
7,200	17,65	248,211	8,50	407,93
12,240	25,00	268,896	7,35	489,60
Promedio:			8,33	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 3, placa No.3

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	13,790		
3,600	8,10	41,369	8,10	444,44
4,212	9,00	41,369	0,90	468,00
Promedio:			4,50	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 4, placa No.3

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	41,369		
3,600	4,90	82,737	4,90	734,69
7,200	8,10	124,106	3,20	888,89
10,800	10,20	137,895	2,10	1058,82
14,400	11,00	144,790	0,80	1309,09
Promedio:			2,75	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 5, placa No.3

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	48,263		
3,600	17,95	124,106	17,95	200,56
7,200	32,50	186,158	14,55	221,54
10,800	44,05	193,053	11,55	245,18
14,400	50,95	206,843	6,90	282,63
18,000	57,00	206,843	6,05	315,79
Promedio:			11,40	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 6, placa No.3

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	34,474		
3,600	17,75	137,895	17,75	202,82
7,200	32,25	186,158	14,50	223,26
10,800	43,95	206,843	11,70	245,73
14,400	50,75	220,632	6,80	283,74
17,100	54,00	220,632	3,25	316,67
Promedio:			10,80	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 7, placa No.3

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	48,263		
3,600	11,62	186,158	11,62	309,76
7,200	20,62	234,422	9,00	349,14
10,800	28,62	241,317	8,00	377,33
14,400	34,62	248,211	6,00	415,92
18,000	38,92	255,106	4,30	462,46
21,600	42,82	255,106	3,90	504,41
25,200	46,42	262,001	3,60	542,85
28,800	49,82	262,001	3,40	578,06
32,400	53,12	268,896	3,30	609,92
33,480	54,00	268,896	0,88	620,00
Promedio:			5,40	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 8, placa No.3

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	34,474		
3,600	17,25	137,895	17,25	208,70
7,200	30,95	199,948	13,70	232,63
10,800	40,15	234,422	9,20	268,99
14,400	46,25	255,106	6,10	311,35
18,000	51,10	275,790	4,85	352,25
21,600	54,00	282,685	2,90	400,00
Promedio:			9,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 9, placa No.3

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	34,474		
3,600	18,25	89,632	18,25	197,26
7,200	32,80	117,211	14,55	219,51
10,800	44,65	144,790	11,85	241,88
14,400	51,50	151,685	6,85	279,61
17,100	54,80	151,685	3,30	312,04
Promedio:			10,96	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 1, placa No.4

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	82,737		
3,600	8,95	131,000	8,95	402,23
7,200	15,00	144,790	6,05	480,00
Promedio:			7,50	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 2, placa No.4

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	34,474		
3,600	4,75	62,053	4,75	757,89
7,200	8,25	75,842	3,50	872,73
9,000	9,00	82,737	0,75	1000,00
Promedio:			3,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 3, placa No.4

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	27,579		
3,600	17,35	82,737	17,35	207,49
7,200	30,25	110,316	12,90	238,02
10,800	40,45	131,000	10,20	267,00
14,400	49,25	172,369	8,80	292,39
18,000	55,35	193,053	6,10	325,20
21,600	59,35	213,737	4,00	363,94
25,200	61,85	227,527	2,50	407,44
28,800	64,00	227,527	2,15	450,00
Promedio:			8,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 4, placa No.4

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	96,527		
3,600	18,68	165,474	18,68	192,77
7,200	33,80	193,053	15,13	213,02
10,800	45,20	206,843	11,40	238,94
14,400	54,00	220,632	8,80	266,67
Promedio:			13,50	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 5, placa No.4

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	34,474		
3,600	17,50	199,948	17,50	205,71
7,200	31,75	186,158	14,25	226,77
10,800	43,80	227,527	12,05	246,58
14,400	49,55	248,211	5,75	290,62
14,688	50,00	248,211	0,45	293,76
Promedio:			10,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 6, placa No.4

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	41,369		
3,600	17,45	117,211	17,45	206,30
7,200	28,85	131,000	11,40	249,57
10,800	37,95	151,685	9,10	284,58
14,400	45,50	172,369	7,55	316,48
18,000	52,35	186,158	6,85	343,84
21,600	58,25	186,158	5,90	370,82
25,200	62,95	193,053	4,70	400,32
25,776	64,00	206,843	1,05	402,75
Promedio:			8,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 7, placa No.4

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	89,632		
1,800	3,65	179,264	3,65	493,15
3,600	6,50	206,843	2,85	553,85
Promedio:			3,25	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 8, placa No.4

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	68,948		
3,600	8,25	137,895	8,25	436,36
7,200	13,30	220,632	5,05	541,35
Promedio:			6,65	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 9, placa No.4

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	103,421		
3,600	10,60	199,948	10,60	339,62
4,176	12,00	213,737	1,40	348,00
Promedio:			6,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 1, placa No.5

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	10,10	68,948		
3,600	20,10	82,737	10,00	179,10
7,200	28,70	103,421	8,60	250,87
10,800	36,15	110,316	7,45	298,76
14,400	42,95	117,211	6,80	335,27
18,000	48,25	124,106	5,30	373,06
21,600	53,50	131,000	5,25	403,74
25,200	58,30	137,895	4,80	432,25
28,800	60,60	137,895	2,30	475,25
32,400	62,50	282,685	1,90	518,40
36,000	64,00	289,580	1,50	562,50
Promedio:			5,39	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 2, placa No.5

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	89,632		
3,600	10,85	179,264	10,85	331,80
7,200	18,40	213,737	7,55	391,30
9,288	21,00	220,632	2,60	442,29
Promedio:			7,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 3, placa No.5

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	89,632		
3,600	14,60	199,948	14,60	246,58
7,200	22,62	310,264	8,02	318,27
10,800	28,12	317,159	5,50	384,04
13,464	33,00	317,159	4,88	408,00
Promedio:			8,25	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 4, placa No.5

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	68,948		
3,600	16,30	165,474	16,30	220,86
7,200	28,65	193,053	12,35	251,31
10,800	38,30	213,737	9,65	281,98
14,400	44,45	220,632	6,15	323,96
18,000	50,20	234,422	5,75	358,57
20,088	54,00	234,422	3,80	372,00
Promedio:			9,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 5, placa No.5

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	68,948		
1,800	5,10	131,000	5,10	352,94
2,700	7,20	131,000	2,10	375,00
Promedio:			3,60	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 6, placa No.5

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	124,106		
1,800	5,15	172,369	5,15	349,51
3,600	9,00	199,948	3,85	400,00
Promedio:			4,50	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 7, placa No.5

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	89,632		
3,600	10,12	172,369	10,12	355,66
7,200	18,22	193,053	8,10	395,13
10,800	26,32	213,737	8,10	410,30
14,400	33,42	220,632	7,10	430,85
18,000	38,92	241,317	5,50	462,46
21,600	42,12	248,211	3,20	512,80
25,200	45,12	262,001	3,00	558,49
28,800	48,02	268,896	2,90	599,73
32,400	50,62	268,896	2,60	640,04
36,000	52,82	282,685	2,20	681,53
38,376	54,00	282,685	1,18	710,67
Promedio:			4,91	

Fuente: elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 8, Placa No,5

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	68,948		
3,600	13,25	158,579	13,25	271,70
7,200	22,55	179,264	9,30	319,29
9,000	27,00	199,948	4,45	333,33
Promedio:			9,00	

Fuente: elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 9, placa No.5

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	82,737		
3,600	14,75	151,685	14,75	244,07
7,200	24,20	179,264	9,45	297,52
10,800	31,35	193,053	7,15	344,50
14,400	37,15	213,737	5,80	387,62
Promedio:			9,29	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Datos filtración 10, placa No.5

Tiempo (s)	Volumen (m3)	Diferencial de Presión (Pa)	Caudal (m3/h)	Tiempo /Volumen (s/m3)
0	0,00	75,842		
3,600	10,22	165,474	10,22	352,18
7,200	18,62	199,948	8,40	386,64
9,000	21,00	227,527	2,38	428,57
Promedio:			7,00	

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

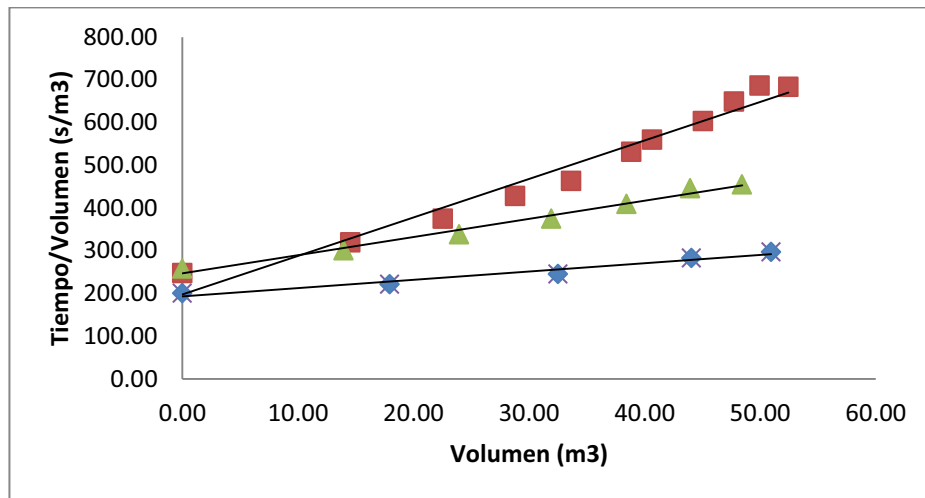
Datos de medida de turbidez

Filtración	Placa No,1 [NTU]	Placa No,2[NTU]	Placa No,3[NTU]	Placa No,4[NTU]	Placa No,5[NTU]
1	0,14	0,15	0,11	0,15	0,12
2	0,13	0,14	0,11	0,13	0,16
3	0,11	0,16	0,13	0,14	0,14
4	0,14	0,12	0,16	0,14	0,14
5	0,14	0,17	0,14	0,12	0,12
6	0,12	0,14	0,12	0,11	0,15
7	0,11	0,14	0,11	0,11	0,10
8	0,11	0,18	0,13	0,16	0,15
9	0,13	0,12	0,12	0,13	0,14
10					0,16
Promedio	0,13	0,15	0,13	0,13	0,14

Fuente:elaboración propia con datos tomados en la empresa.

Apéndice 6. Datos Calculados

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3 Placa No.1



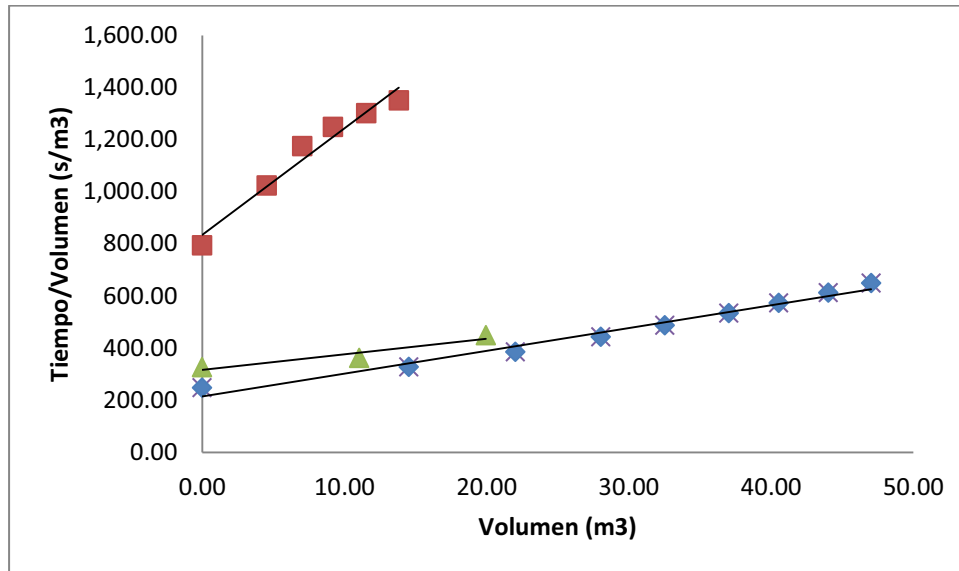
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No,1,

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3 Placa No.1

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 1,937V + 193,0$	0,960	[0 – 54]
	$t/V = 9,003V + 197,7$	0,964	[0 – 54]
	$t/V = 4,251V + 246,9$	0,985	[0 – 54,05]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3 Placa No. 1

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6, Placa No.1



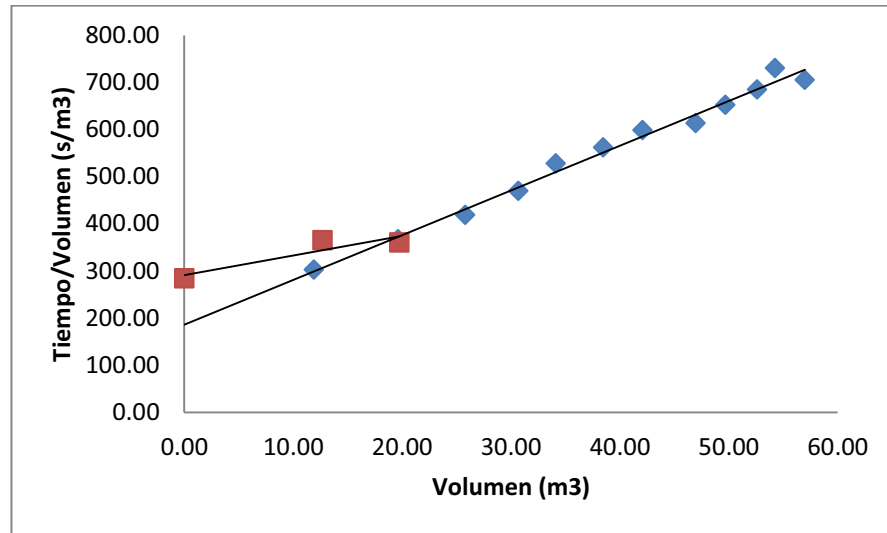
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No,1

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6 Placa No. 1

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 8,724V + 214,9$	0,979	[0 – 50]
	$t/V = 52,98V + 617,2$	0,940	[0 – 14]
	$t/V = 8,514V + 221,9$	0,812	[0 – 24,1]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6 Placa No, 1

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7 y 8, Placa No.1



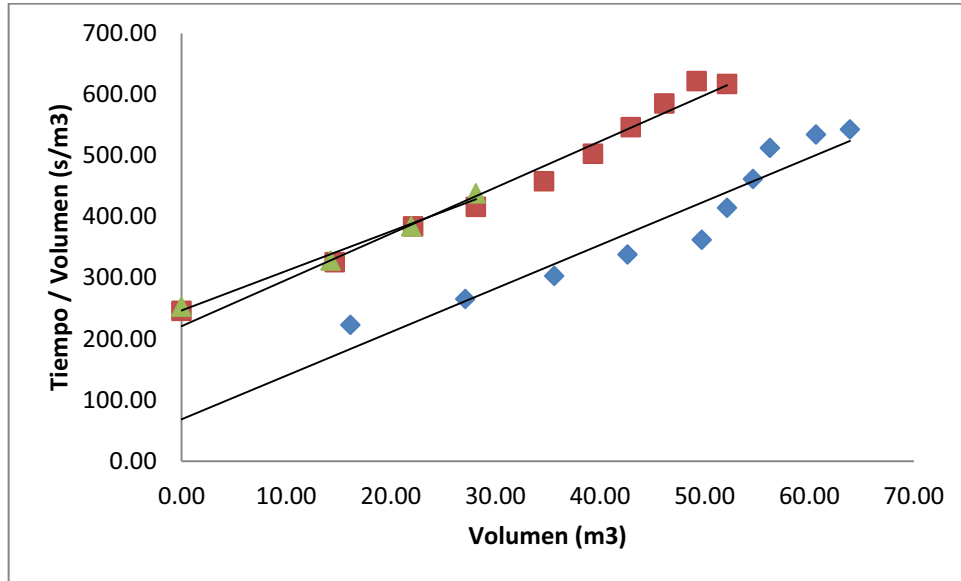
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No.1

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7 y 8 Placa No. 1

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 9,5V + 185,7$	0,987	[0 – 57]
	$t/V = 7,210V + 200,4$	0,825	[0 – 24]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7 y 8 Placa No. 1

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3, Placa No.2



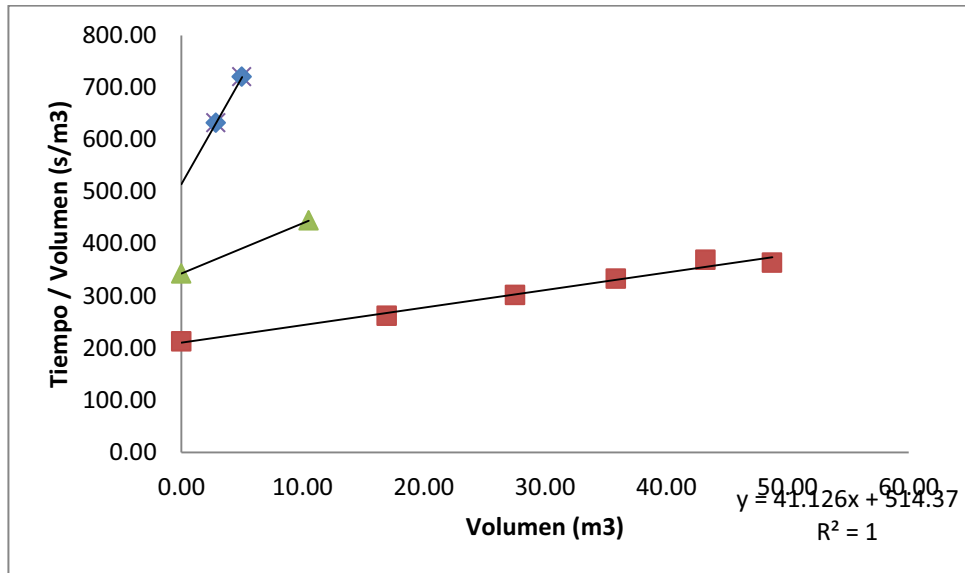
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No.1.

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3 Placa No. 2

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 7,119V + 68,70$	0,908	[0 – 64]
	$t/V = 9,569V + 102,9$	0,988	[0 – 54]
	$t/V = 10,90V + 92,92$	0,969	[0 – 24,1]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3 Placa No.2

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6, Placa No.2



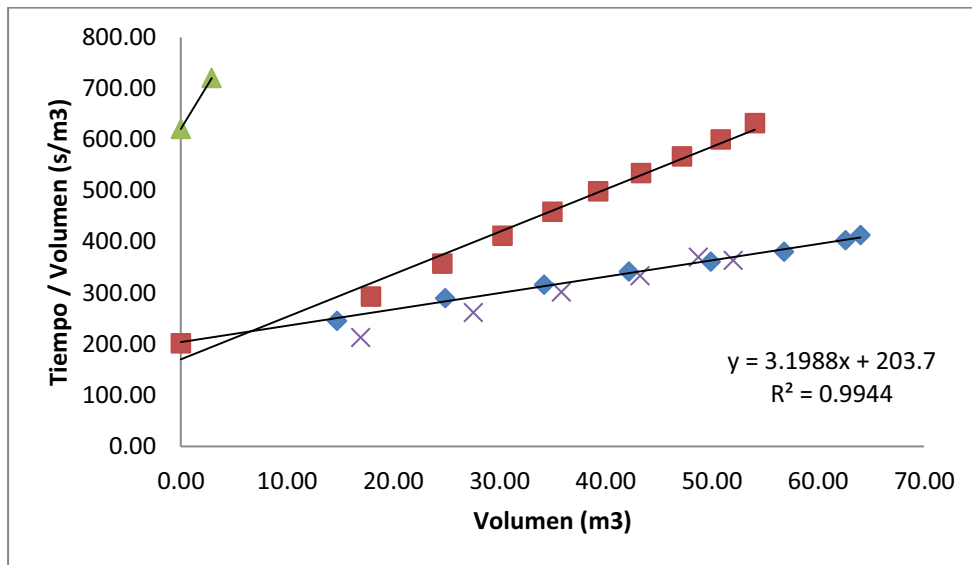
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No.1

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6 Placa No. 2

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 41,12V + 514,3$	1	[0 – 5]
	$t/V = 4,558V + 136,3$	0,988	[0 – 52]
	$t/V = 17,82V + 155,7$	1	[0 – 26,2]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6 Placa No.2

**Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7, 8 y 9,
Placa No.2**



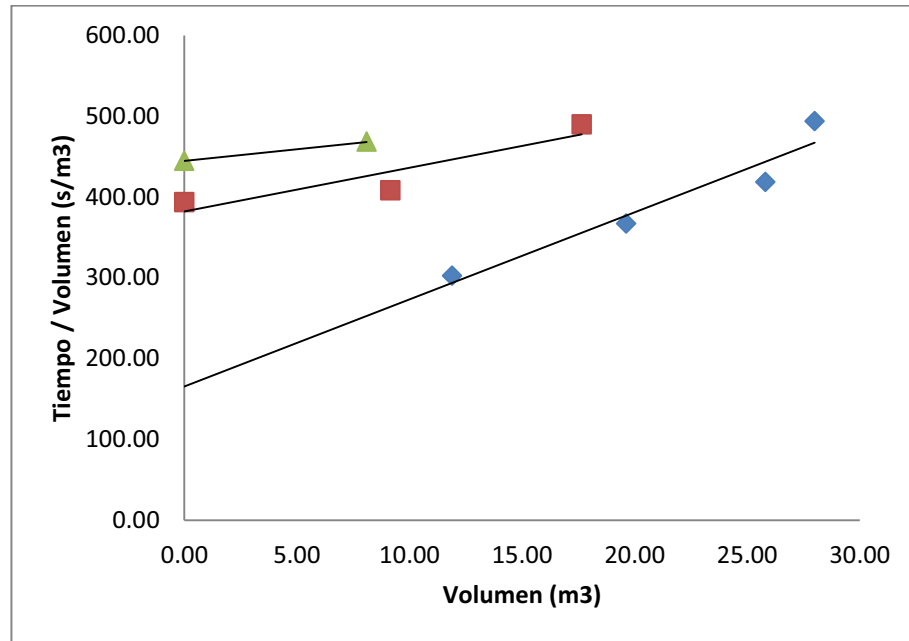
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No,1,

**Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7, 8
y 9 Placa No. 2**

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 3,198V + 203,7$	0,994	[0 – 64]
	$t/V = 10,73V + 25,87$	0,996	[0 – 57]
	$t/V = 47,29V + 483,5$	1	[0 – 5]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7, 8 y 9 Placa No.2

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3 Placa No.3



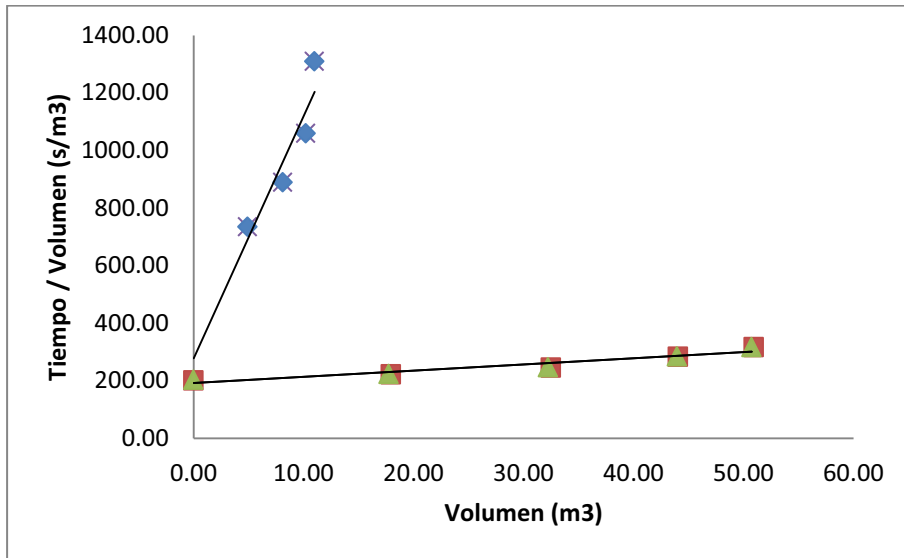
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No,1

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3 Placa No. 3

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 10,77V + 165,3$	0,923	[0 – 28]
	$t/V = 5,953V + 327,5$	0,829	[0 – 25]
	$t/V = 26,17V + 232,4$	1	[0 – 9]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3 Placa No.3

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6, Placa No.3



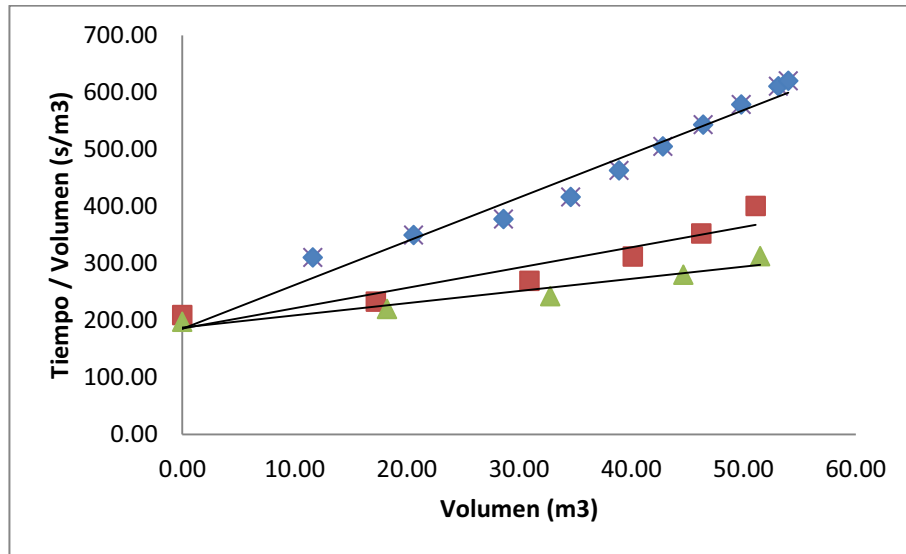
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No,1,

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6 Placa No. 3

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
Blue	$t/V = 84,16V + 278,2$	0,867	[0 – 11]
Red	$t/V = 2,847V + 137,8$	0,908	[0 – 57]
Green	$t/V = 2,882V + 139,9$	0,867	[0 – 54]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6 Placa No.3

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7, 8 y 9, Placa No.3



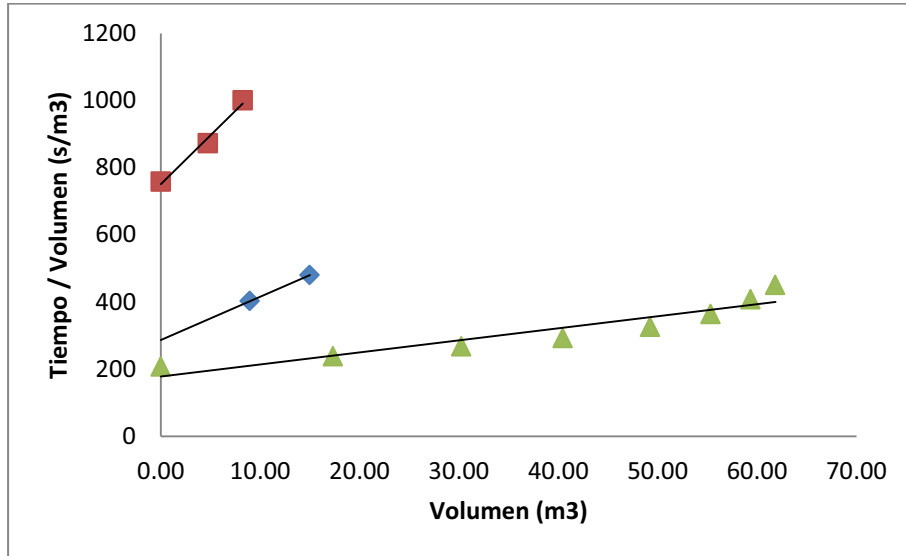
Fuente: Elaboración propia basado en ecuación No.1.

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7, 8 y 9 Placa No. 3

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 7,674V + 184,9$	0,958	[0 – 54]
	$t/V = 4,940V + 98,27$	0,879	[0 – 54]
	$t/V = 2,884V + 133,5$	0,877	[0 – 54,8]

Fuente: Elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7, 8 y 9 Placa No.3

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3, Placa No.4



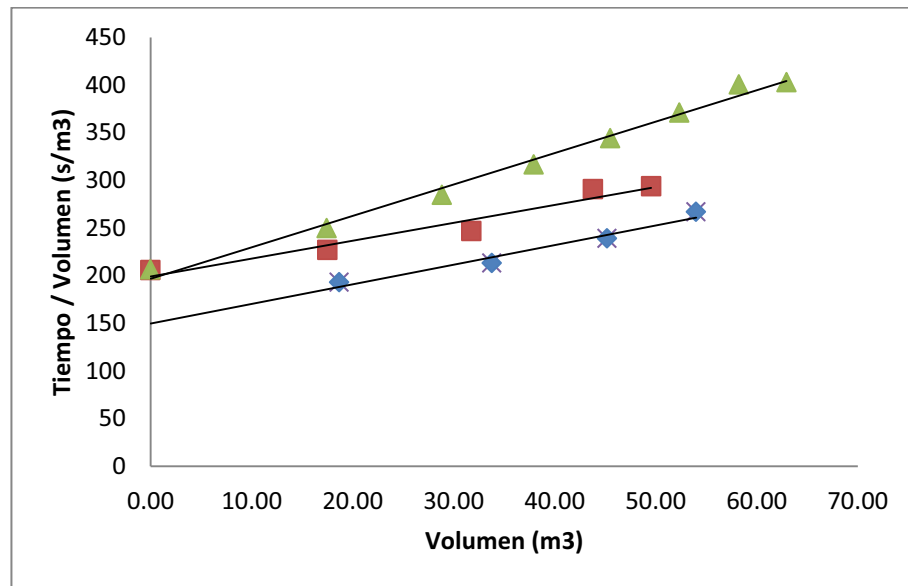
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No,1,

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3 Placa No. 4

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 12,85V + 287,1$	1	[0 – 15]
	$t/V = 49,43 V + 514,3$	0,857	[0 – 9]
	$t/V = 4,688V + 97,49$	0,862	[0 – 64]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3Placa No.4

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6 Placa No.4



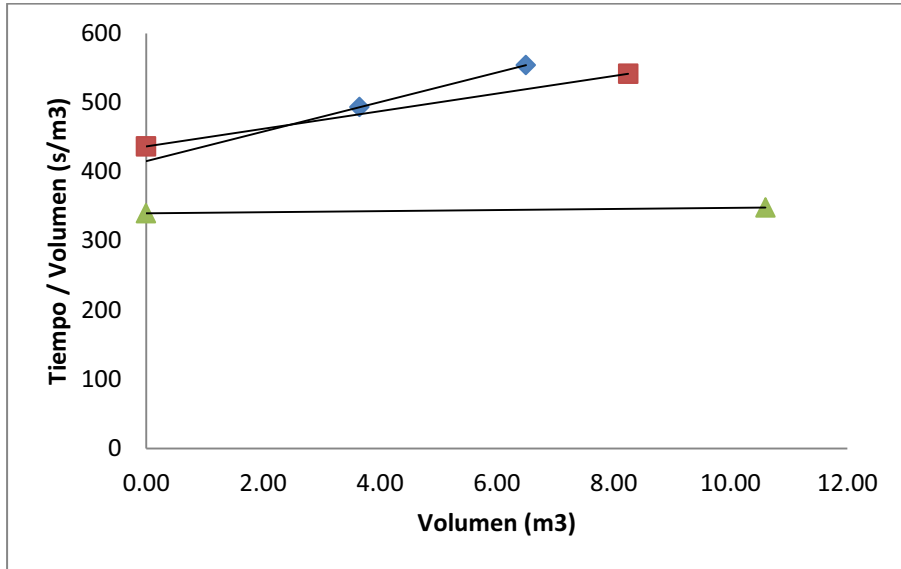
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No.1.

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6 Placa No. 4

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 2,061V + 149,6$	0,964	[0 – 54]
	$t/V = 2,627 V + 151,4$	0,878	[0 – 50]
	$t/V = 4,234V + 127,4$	0,995	[0 – 64]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6 Placa No.4

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7, 8 y 9 Placa No.4



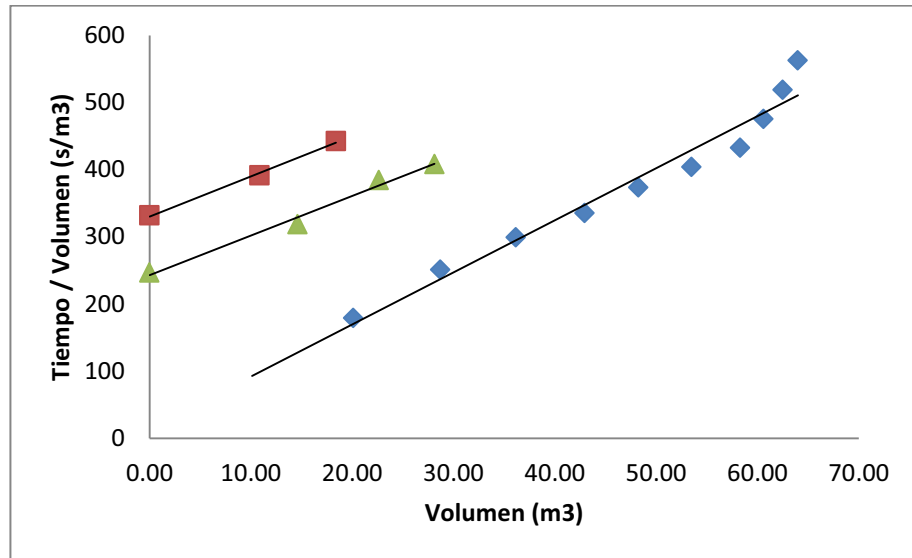
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No.1

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7, 8 y 9 Placa No. 4

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
Blue	$t/V = 21,29 V + 415,4$	1	[0 – 6,5]
Red	$t/V = 20,79 V + 264,8$	1	[0 – 13,3]
Green	$t/V = 5,983V + 276,1$	1	[0 – 12]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7, 8 y 9, Placa No.4

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3, Placa No.5



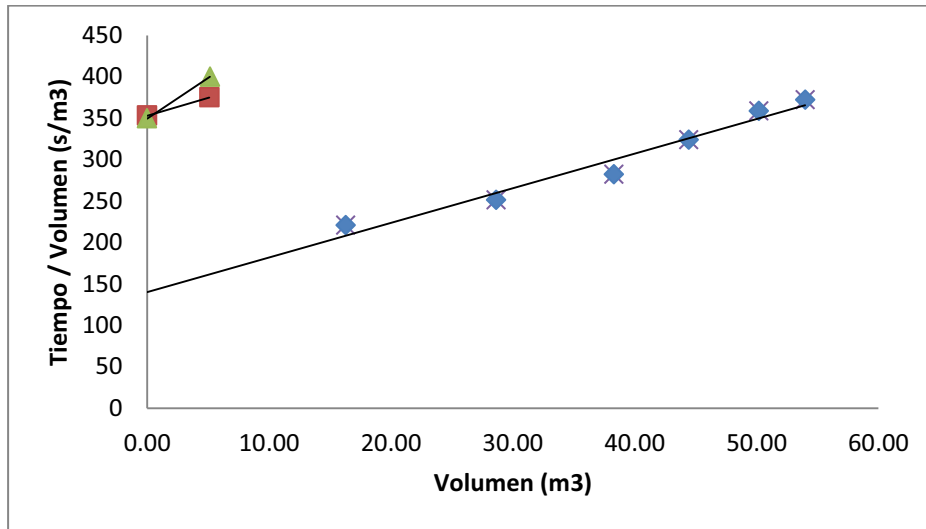
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No.1

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3 Placa No. 5

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 7,753 V + 14,6$	0,956	[0 – 64]
	$t/V = 10,21 V + 217,4$	0,945	[0 – 21]
	$t/V = 9,115V + 115,1$	0,985	[0 – 33]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 1, 2 y 3, Placa No.5

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6, Placa No.5



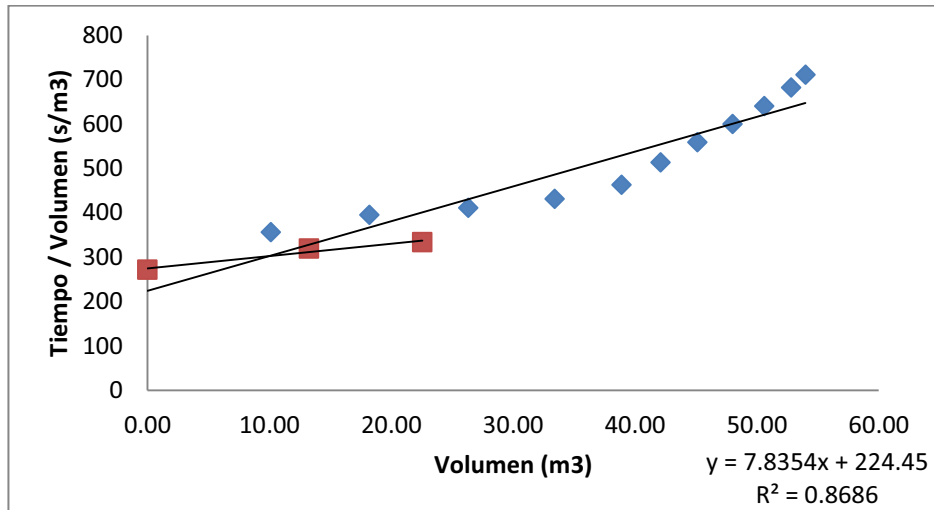
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No.1.

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6 Placa No. 5

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
Blue	$t/V = 4,173 V + 140,1$	0,962	[0 –54]
Red	$t/V = 10,50 V + 299,3$	1	[0 – 7,2]
Green	$t/V = 13,115V + 281,9$	1	[0 – 9]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 4, 5 y 6, Placa No.5

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7 y 8, Placa No.5



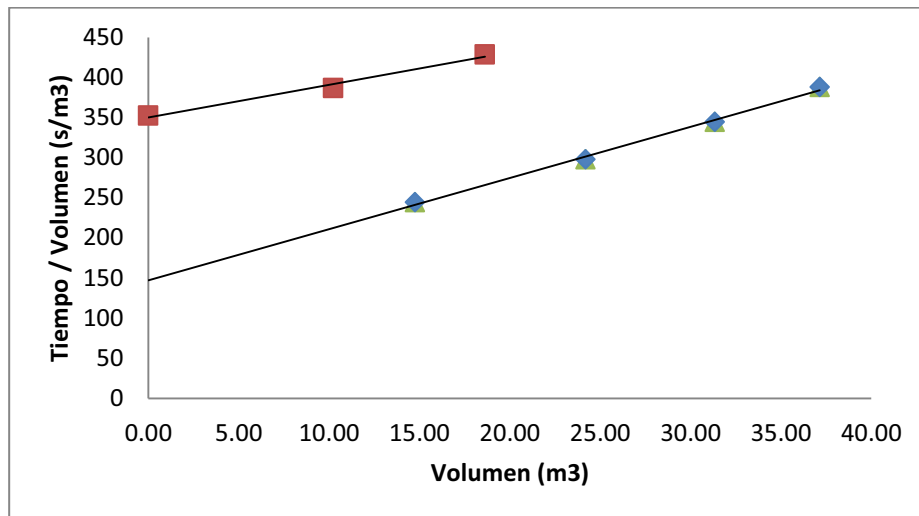
Fuente: elaboración propia basado en ecuación No.1

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7 y 8 Placa No. 5

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 7,835 V + 224,4$	0,868	[0 –54]
	$t/V = 4,579 V + 212,2$	0,989	[0 – 27]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 7 y 8, Placa No.5

Gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 9 y 10, Placa No.5



Fuente: elaboración propia basado en ecuación No.1.

Datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 9 y 10, Placa No. 5

Color	Modelo Matemático	R ²	Intervalo de Validez
	$t/V = 6,380 V + 147,0$	0,996	[0 – 37,15]
	$t/V = 6,302 V + 284,4$	0,870	[0 – 21]

Fuente: elaboración propia con datos de la gráfica Tiempo/Volumen en función del Volumen filtración 9 y 10, Placa No.5

**Resistencia específica del medio y resistencia de la torta para filtraciones
de la Placa No.1**

Número de Filtración	a (s/m ⁶)	b (s/m ³) [10 ²]	a1 (kg/m ³ s)	b1 (kg/s m ²) [10 ⁷]	α (m/kg)	R (1/m)
1	1,94	1,93	69,247	9,59	4,18	8,92
2	9,00	1,98	659,704	2,01	6,14	1,87
3	4,25	2,47	281,131	2,27	2,62	2,11
4	8,72	2,15	592,493	2,03	5,52	1,89
5	5,30	6,17	3,598,379	5,82	3,35	5,42
6	8,51	2,22	319,534	1,16	1,35	1,08
7	9,50	1,86	696,084	1,89	6,48	1,76
8	7,21	2,00	451,036	1,74	4,20	1,62
Promedio	1,28	2,60	833,451	2,23	7,53	2,08

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

**Resistencia específica del medio y resistencia de la torta para filtraciones
de la Placa No. 2**

Número de Filtración	a (s/m ⁶)	b (s/m ³) [10 ²]	a1 (kg/m ³ s)	b1 kg/s m ²) [10 ⁶]	α (m/kg) [10 ⁸]	R (1/m) [10 ⁹]
1	7,12	0,687	585,269	7,84	5,46	7,30
2	9,57	1,03	769,616	11,4	7,17	10,7
3	10,9	0,929	448,401	5,31	3,67	4,94
4	41,1	5,14	2,057,920	35,7	0,192	33,3
5	4,56	1,36	203,656	8,46	1,90	7,88
6	17,8	1,56	414,051	5,02	3,86	4,68
7	3,20	2,04	74,316	6,57	69,2	6,12
8	10,7	0,259	978,695	3,27	9,11	3,05
9	47,3	4,84	2,873,501	48,0	0,191	44,7
Promedio	16,9	1,98	933,936	14,6	7,79	13,6

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

**Resistencia específica del medio y resistencia de la torta para filtraciones
de la Placa No.3**

Número de Filtración	a (s/m6)	b (s/m3) [10 ²]	a1 (kg/m3 s)	b1 (kg/s m2) [10 ⁷]	α (m/kg) [10 ⁸]	R (1/m) [10 ¹⁰]
1	10,8	1,65	442,975	0,944	4,14	0,879
2	5,95	3,28	414,966	3,17	5,15	2,95
3	26,2	2,32	280,646	0,346	1,19	0,322
4	84,2	2,78	3,158,711	1,45	25,5E	1,35
5	2,85	1,38	152,659	1,03	1,42	0,956
6	2,88	1,40	164,838	1,11	1,53	1,03
7	7,67	1,85	534,860	1,79	4,15	1,67
8	4,94	0,983	362,007	1,00	2,97	0,931
9	2,88	1,34	56,706	0,729	0,528	0,679
Promedio	16,5	1,89	618,708	1,29	5,18	1,20

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

**Resistencia específica del medio y resistencia de la torta para filtraciones
de la Placa No.4**

Número de Filtración	a (s/m6)	b (s/m3) [10 ²]	a1 (kg/m3 s)	b1 (kg/s m2) [10 ⁷]	α (m/kg) [10 ⁸]	R (1/m)
1	12,9	2,87	482,405	1,50	2,04	1,39
2	49,4	5,14	1,060,156	1,53	4,48	1,43
3	4,69	0,975	276,492	0,799	2,57	0,744
4	2,06	1,50	117,916	1,19	1,10	1,11
5	2,63	1,51	169,031	1,35	16,8	1,26
6	4,23	1,27	227,022	0,949	2,11	0,883
7	21,3	4,15	1,141,810	3,09	10,5	2,88
8	20,8E	2,65	1,188,936	2,10	1,11	1,96
9	5,98	2,76	331,507	2,13	3,06	1,98
Promedio	1,38E+01	2,54	555,030	1,63	4,29	1,51

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

Resistencia específica del medio y resistencia de la torta para filtraciones de la Placa No.5

Número de Filtración	a (s/m ⁶)	b (s/m ³) [10 ²]	a1 (kg/m ³ s)	b1 (kg/s m ²) [10 ⁷]	α (m/kg) [10 ⁸]	R (1/m) [10 ¹⁰]
1	7,75	0,146	581,956	1,52	5,41	1,42
2	10,2	2,17	584,003	1,72	5,44	1,61
3	9,12	1,15	749,371	1,31	3,17	1,22
4	4,17	1,40	253,560	1,18	1,97	1,10
5	10,5	2,99	356,666	1,41	3,32	1,31
6	13,1	2,82	679,601	2,03	2,88	1,89
7	7,84	2,24	574,115	2,28	4,45	2,13
8	4,58	2,12	237,340	1,53	2,21	1,42
9	6,38	1,47	353,496	1,13	3,28	1,05
10	6,30	2,84	371,696	2,33	1,57	2,17
Promedio	8,00	1,94	474,180	1,51	3,37	1,40

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

Volumen óptimo, tiempo óptimo y caudal máximo para filtraciones de la Placa No.1

Número de Filtración	Volumen óptimo [m ³ 10 ⁻¹]	Tiempo óptimo [s 10 ¹]	Caudal máximo [m ³ s ⁻¹ 10 ⁻³]
1	7,18	14,0	5,18
2	3,33	6,69	5,06
3	4,85	12,1	4,05
4	3,39	7,38	4,65
5	1,37	8,58	1,62
6	3,43	7,70	4,51
7	3,24	6,13	5,38
8	3,72	7,57	4,99
Promedio	3,82	8,76	4,43

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 6, 7, 8 y 9.

**Volumen óptimo, tiempo óptimo y caudal máximo para filtraciones de la
Placa No.2**

Número de Filtración	Volumen óptimo [m³ 10⁻¹]	Tiempo óptimo [s 10¹]	Caudal máximo [m³ s⁻¹ 10⁻³]
1	3,75	2,68	0,146
2	3,23	3,41	9,76
3	3,03	2,91	0,108
4	1,56	8,12	1,94
5	4,68	6,49	7,33
6	2,37	3,79	0,138
7	5,59	11,5	4,91
8	3,05	0,889	0,379
9	1,45	7,13	2,59
Promedio	3,19	5,21	0,115

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 6, 7, 8 y 9.

**Volumen óptimo, tiempo óptimo y caudal máximo para filtraciones de la
Placa No.3**

Número de Filtración	Volumen óptimo [m³10⁻²]	Tiempo óptimo [s]	Caudal máximo [m³ s⁻¹]
1	1,98	3,29	6,05
2	7,45	2,44	3,05
3	2,20	5,13	4,30
4	3,30	9,27	3,59
5	1,22	1,69	7,25
6	1,21	1,70	7,15
7	1,50	2,77	5,41
8	2,26	2,23	10,2
9	1,27	1,70	7,49
Promedio	1,74	3,36	6,05

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 6, 7, 8 y 9.

**Volumen óptimo, tiempo óptimo y caudal máximo para filtraciones de la
Placa No.4**

Número de Filtración	Volumen óptimo [m ³ 10 ⁻¹]	Tiempo óptimo [s 10]	Caudal máximo [m ³ s ⁻¹ 10 ⁻³]
1	2,79	8,11	3,48
2	1,42	7,42	1,94
3	4,62	4,60	0,103
4	6,96	10,5	6,68
5	6,17	9,45	6,60
6	4,86	6,29	7,85
7	2,17	9,10	2,41
8	2,19	5,91	3,78
9	4,09	11,4	3,62
Promedio	3,92	8,09	5,18

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 6, 7, 8 y 9.

**Volumen óptimo, tiempo óptimo y caudal máximo para filtraciones de la
Placa No.5**

Número de Filtración	Volumen óptimo [m ³ 10 ⁻¹]	Tiempo óptimo [s 10]	Caudal máximo [m ³ s ⁻¹ 10 ⁻³]
1	3,59	6,24	0,163
2	3,13	6,89	4,61
3	3,31	3,91	8,69
4	4,90	6,96	7,13
5	3,09	9,34	3,34
6	2,76	7,89	3,55
7	3,57	8,12	4,46
8	4,67	10,0	4,71
9	3,96	5,92	6,80
Promedio	3,98	11,4	3,52

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 6, 7, 8 y 9.

Datos promedio de la resistencia específica del medio y resistencia de la torta filtrante

Número de Placa	a (s/m ⁶) [10 ⁻¹]	b (s/m ³) [10 ²]	a1 (kg/m ³ s)	b1 (kg/s m ²) [10 ⁷]	α (m/kg) [10 ⁸]	R (1/m) [10 ¹⁰]
1	1,28	2,60	833,451	2,23	7,53	2,08
2	1,69	1,98	933,936	1,46	7,79	1,36
3	1,65	1,89	618,708	1,29	5,18	1,20
4	1,38	2,54	555,030	1,63	4,29	1,51
5	1,08	1,94	474,180	1,51	3,37	1,40
Promedio	1,36	2,19	683,061	1,62	5,63	1,51

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 2, 3, 4 y 5.

Datos promedio del volumen óptimo, tiempo óptimo y caudal máximo

Número de Placa	Volumen óptimo [m ³ 10 ⁻¹]	Tiempo óptimo [s 10]	Caudal máximo [m ³ s ⁻¹ 10 ⁻³]
1	3,82	8,76	4,43
2	3,19	5,21	11,5
3	1,74	3,36	6,05
4	3,92	8,09	5,18
5	3,70	7,11	6,31
Promedio	2,96	5,90	6,70

Fuente: elaboración propia basado en ecuaciones 6, 7, 8 y 9.