



Determinación de las condiciones de operación para cumplir con la normativa ambiental de concentración de cloruros en el vertimiento de aguas residuales en la empresa Crystal S.A.S.

Camila Fernanda Jaimes López

Informe de práctica como requisito para optar al título de:
Ingeniera Química.

Asesor interno

Farlan Taborda Agudelo, Ph.D.

Asesor externo

Jorge Hernán De la Cruz Gaona, Ingeniero Químico

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química
Medellín, Antioquia

2023

Cita	(Jaimes López.2023)
Referencia	Jaimes López, C. F. (2023) <i>Determinación de las condiciones de operación para cumplir con la normativa ambiental de concentración de cloruros en el vertimiento de aguas residuales en la empresa Crystal S.A.S.</i> Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Lina María González Rodríguez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Agradezco a Dios por ser mi guía en este camino, por darme la fortaleza para no desfallecer en los momentos de debilidad.

A mis padres por ser mi sustento y apoyo incondicional, por darme todas las herramientas para desarrollarme como persona, por sus consejos y su amor.

A mis hermanos Andrea y Andrés, gracias por ser mis mejores amigos, cómplices incondicionales y por confiar en mis capacidades, por motivarme a lograr lo que ayer era un sueño, saben que son mi vida entera.

A Johan por creer en mí y ver mi potencial, por impulsarme cada día a ser mejor, por tu paciencia y amor incondicional. Gracias por ser luz en mi vida.

Agradecimientos

A la Universidad de Antioquia por permitirme crecer personal y profesionalmente; a mis profesores por compartir sus conocimientos de manera competente y ética, en especial al profesor Farlan Taborda, por la disposición para atender mis inquietudes y brindarme una guía asertiva en esta etapa final. Al profesor Luis Díaz por su compromiso y sus sabios consejos. A la empresa CRYSTAL S.A.S por la oportunidad de aprender y poner en práctica los conocimientos adquiridos, a su grupo de profesionales por la disposición para enseñarme y guiarme en el mundo de los textiles, en especial a mi asesor Jorge de la Cruz por tener siempre palabras de ánimo para mí y finalmente a mis compañeros del día a día, Gloria, Anderson, Fernando, Sandra y Edison, así como todo el equipo de tintorería por hacer agradable esta experiencia.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1 Objetivos	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2 Marco teórico	13
3 Metodología	15
3.1 Información del proceso y de las variables que afectan la concentración de cloruros	15
3.2 Recolección de datos primarios	15
3.3 Medición de la variable de respuesta	16
3.4 Modelos de Regresión	17
3.5 Evaluación de costos	18
4 Resultados y Análisis	19
5 Conclusiones	28
Referencias	29
Anexos	30

Lista de tablas

Tabla 1. Intervalo para cada uno de los factores.	21
Tabla 2. Coeficiente de determinación modelo cuadrático.	21
Tabla 3. Coeficientes y Valor-P para la regresión del modelo cuadrático.	22
Tabla 4. Coeficientes del modelo cuadrático simplificado.	23
Tabla 5. Estadísticas de la regresión del modelo cuadrático simplificado.	23
Tabla 6. Análisis de varianza para el modelo cuadrático simplificado.	23
Tabla 7. Estadísticas de la regresión del modelo cúbico simplificado.	24
Tabla 8. Costos relacionados a un día de producción.	26
Tabla 9. Matriz de costos	26

Lista de figuras

Figura 1. Cantidad de cloruro de sodio/total electrolito.....	19
Figura 2. Porcentaje Algodón de color teñido/ total fibras.	20
Figura 3. Concentración de electrolito.	20
Figura 4. Superficie de respuesta de la concentración de cloruros en función del porcentaje Algodón color y el porcentaje de cloruro de sodio.	25

Siglas, acrónimos y abreviaturas

PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
ANOVA	Análisis de varianza
PhD	Philosophie Doctor
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

Crystal S.A.S. es una empresa del sector textil que tiene entre sus procesos la tintura de fibras como el nylon, poliéster y algodón. El algodón es la única fibra natural y su teñido en colores requiere el uso de electrolitos para lograr la adherencia del colorante a la fibra, siendo el cloruro de sodio el más utilizado debido a su efectividad, disponibilidad y bajo costo. Este electrolito se separa en iones cloruro que quedan en las aguas residuales del proceso y para su vertimiento la autoridad ambiental permite una concentración máxima de 1200 mg/L. Se plantea el uso de NaSO_4 como sustituto parcial para el NaCl con el fin de reducir la concentración de cloruros en las aguas residuales. Se encontró que los factores que tienen incidencia en la concentración de cloruros son las relaciones $\text{NaCl}/\text{total electrolitos}$ y $\text{algodón de color}/\text{total fibras}$. Para explicar la dependencia de la variable de respuesta respecto a estos factores se encuentra un modelo cuadrático mediante una regresión no lineal múltiple cuyo $R^2 = 0,809$, el análisis de varianza (ANOVA) muestra que el ajuste realizado predice el comportamiento de los datos experimentales con un Valor-P menor a 0,05, logrando encontrarse las condiciones de operación de la planta de producción que permiten cumplir con la normativa ambiental. Se encontró también que el impacto económico de variar la relación $\text{NaCl}/\text{total electrolitos}$ desde el 70% hasta el 45% representa un total de COP 420.541.497 adicionales cada año para la empresa.

Palabras clave: anova, cloruros, valor-p, regresión, tintura, algodón, electrolito, aguas residuales, textil.

Abstract

Crystal S.A.S. is a company in the textile sector that dyes fibers such as nylon, polyester, and cotton among its processes. Cotton is the only natural fiber and its dyeing in colors requires the use of electrolytes to achieve adherence of the dye to the fiber, sodium chloride is the most widely used due to its effectiveness, availability, and low cost. This electrolyte separates into chloride ions that remain in the wastewater from the process and for its discharge the environmental authority allows a maximum concentration of 1200 mg/L. NaSO₄ is proposed as a partial substitute for NaCl in order to reduce the concentration of chlorides in wastewater. It was found that the factors that have incidence on the concentration of chlorides are the ratios NaCl/total electrolytes and colored cotton/total fibers. To explain the dependence of the response variable on these factors, a quadratic model is found by means of a multiple non-linear regression whose $R^2 = 0,809$, the analysis of variance (ANOVA) shows that the adjustment made predicts the behavior of the experimental data with a P-Value less than 0,05, managing to find the operating conditions of the production plant that allow compliance with environmental regulations. It was also found that the economic impact of varying the NaCl/total electrolyte ratio from 70% to 45% represents a total additional COP 420,541,497 each year for the company.

Keywords: anova, chlorides, p-value, regression, dyeing, cotton, electrolyte, wastewater, textile.

Introducción

CRYSTAL S.A.S es una empresa colombiana productora y comercializadora de marcas de vestuario y moda con cerca de noventa años de trayectoria en el mercado y cuenta con varias plantas de proceso distribuidas en Antioquia y el Eje Cafetero.

Dentro de las actividades de la empresa, se encuentra el proceso de tintura de diferentes fibras textiles, entre ellas el algodón. Esta es una fibra natural que se tiñe por agotamiento del colorante, que es un proceso por el cual se le cambia el color a la fibra a través de la absorción del colorante al interior de esta. Para el teñido de algodón con colorantes reactivos (sustancias orgánicas de intensa coloración que se adhieren al material textil por una reacción química, formando un enlace covalente entre la molécula del colorante y la de la fibra) es necesario el uso de un electrolito para permitir que el colorante sea afín al material textil y se logre una eficiente adsorción/absorción y después mediante una reacción con álcali quede fijado al material textil (Ruiz Cordova, 2016).

Uno de los electrolitos más utilizados por su economía, disponibilidad y eficiencia en el proceso, es la sal de uso común (NaCl), la cual permite la adherencia del colorante a las fibras; sin embargo, tiene la desventaja de aportar gran cantidad de iones cloruro al agua utilizada en la tintorería, los cuales posteriormente deben tratarse para cumplir con la resolución 631 del 2015 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible que regula los valores máximos permisibles para el vertimiento de aguas residuales a cuerpos de aguas superficiales y sistemas de alcantarillado, donde se establece que la industria textil debe cumplir con un máximo de 1200 mg/L en la concentración de cloruros para su vertimiento (Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Dentro de los objetivos de la empresa, el compromiso con el medio ambiente ha sido un pilar fundamental, por lo cual, este trabajo busca aportar a la disminución de la concentración de cloruros en sus vertimientos. Previamente se ha intentado utilizar el sulfato de sodio como un sustituto parcial para el cloruro de sodio, utilizándolos en diferentes proporciones, sin embargo, aún no se ha logrado establecer el impacto real que tiene este sustituto en la concentración de cloruros en el agua residual, ya que la proporción de electrolitos cambia dependiendo de los colores a teñir. Para evidenciar este impacto se realiza un ajuste matemático a partir de datos

experimentales que permita obtener una función que prediga cual será la concentración de cloruros en el agua residual al final del proceso en función de las condiciones de trabajo de la empresa. Deben tomarse en consideración varios factores del proceso como son la proporción de algodón teñido respecto a las otras fibras, la concentración de electrolito usada en el proceso de tintura y la proporción entre el cloruro de sodio y el sulfato de sodio. Con el fin de determinar cuáles de estos factores son relevantes en el ajuste matemático, se utiliza el criterio estadístico del valor P y una regresión no lineal múltiple para definir la expresión matemática que modela los datos experimentales.

Una vez obtenida una expresión matemática que modele los datos experimentales, pueden determinarse condiciones de trabajo en la empresa que permitan el cumplimiento de la normativa ambiental con una concentración de cloruros en el vertimiento menor a 1200 mg/L, y puede también evaluarse cuales son los costos asociados a la operación del proceso en las condiciones mencionadas, respecto a otras condiciones.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

- Determinar las condiciones de operación de la planta de producción que permiten cumplir la normativa ambiental de la concentración de cloruros en el vertimiento de aguas residuales y el impacto económico asociado a estas.

1.2 Objetivos específicos

- Establecer las variables del proceso que tienen incidencia en la concentración de cloruros en el vertimiento de aguas residuales.
- Generar un ajuste matemático a partir de datos experimentales que permita predecir la concentración de cloruros obtenidos en el vertimiento de aguas residuales en función de los diferentes factores que lo afectan.
- Determinar el impacto económico que tiene para la empresa disminuir la concentración de cloruros en el vertimiento de aguas residuales.

2 Marco teórico

La tintura de las fibras es uno de los procesos más importantes en la industria textil que puede llevarse a cabo por diferentes métodos que dependen del material que se desea tinturar, el tipo de colorante que se emplea y las características especiales que desee darse a las prendas. En el caso de fibras naturales como el algodón, uno de los métodos empleados es la tintura con colorantes reactivos ya que presentan una alta solidez al lavado, es decir, una mayor permanencia del color en el tejido, quedándose durante más tiempo. Para llevar a cabo éste método de tintura se establecen condiciones específicas del proceso tales como la relación de baño, la tasa de aumento de temperatura, la temperatura máxima alcanzada por el baño, el uso de un electrolito, la concentración del colorante, siendo variables que cada empresa define en función de su experiencia y bajo recomendaciones de los fabricantes de los colorantes, sin embargo, uno de los factores determinantes en el proceso es la concentración del electrolito ya que no solo impide la reversibilidad de la tintura, sino que también incrementa el agotamiento del colorante, neutralizando la carga eléctrica del algodón (catión de sodio reduce la carga negativa de la fibra) por lo que promueve el desplazamiento del colorante hacia la fibra (López Solis, 2017).

El electrolito comúnmente utilizado en la industria textil para el teñido de algodón es la sal textil (cloruro de sodio); la cantidad requerida varía en función de la intensidad de color que se desea lograr (entre más oscuro sea el tono, mayor cantidad de electrolito requiere el teñido). Debido al uso intensivo del cloruro de sodio en esta industria las autoridades ambientales regulan la cantidad de cloruros que pueden disponerse en las aguas residuales ya que una alta concentración de éstos puede ocasionar daños en las estructuras metálicas, evitar el crecimiento de las plantas y si se usa para riego deteriorar de manera importante la calidad del suelo. (México. Secretaría de Economía, 2001). La autoridad ambiental colombiana emitió la resolución 0631 de 2015 (Colombia, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2015), en la cual establece los parámetros que debe cumplir la industria textil y sitúa la concentración máxima de cloruros en 1200 mg/L por lo cual se hace imprescindible el control de este parámetro.

La medición de iones cloruro en el agua residual se puede realizar a través de diferentes métodos, uno de los más utilizados es el método de titulación que se basa en una valoración con

nitrate de plata utilizando como indicador cromato de potasio. La plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata de color blanco. En las inmediaciones del punto de equivalencia al agotarse el ion cloruro, empieza la precipitación del cromato. La formación de cromato de plata puede identificarse por el cambio de color de la disolución a anaranjado-rojizo, así como en la forma del precipitado. En este momento se da por terminada la valoración, conocida la cantidad de nitrato utilizado, es posible determinar la concentración de cloruros que hay en el agua residual (México. Secretaría de Economía, 2001).

Para mitigar la presencia del ion cloruro en las aguas de vertimiento, se han buscado sustitutos que permitan obtener un comportamiento similar en el proceso de tintura. Una de las alternativas es el uso de sulfato de sodio, sin embargo, la presencia del sodio también puede ser un inconveniente debido a su alta solubilidad y difícil separación, por lo cual, también se ha reportado el uso de sales de magnesio (cloruro, sulfato, acetato y citrato de magnesio) para disminuir las concentraciones de electrolitos solubles y compuestos coloreados en las aguas residuales. (Carrión Fité, 2004).

Para analizar los factores de producción que tienen incidencia en la concentración de cloruros en el agua residual, se realizan dos modelos de regresión, uno cuadrático y otro cúbico para definir cuál de ellos modela mejor los datos experimentales, En estos modelos la variable de respuesta (concentración de cloruros) se determina a partir de un conjunto de variables (factores significativos) que se ajustan a una función ya sea cuadrática o cúbica. La determinación de cuales de estos factores son relevantes se puede realizar mediante el método estadístico del Valor P, que arroja un valor entre 0 y 1 que permite diferenciar resultados que son producto del azar del muestreo de los que son estadísticamente significativos, en caso de que el Valor P sea inferior a 0,05 se sabe que dicho factor tiene significancia estadística y por tanto será tenido en cuenta en el modelo de regresión, de lo contrario se eliminará dicho término del modelo (Montgomery & Runger, 2014).

3 Metodología

3.1 Información del proceso y de las variables que afectan la concentración de cloruros

Inicialmente se recolecta la información del proceso de teñido de algodón para conocer las sustancias involucradas en la tintura de las fibras, sus concentraciones y las demás variables de importancia que se miden a lo largo de la curva de teñido (pH, relación de baño, dureza, entre otros), esto con la finalidad de encontrar los factores que afectan la concentración de cloruros en el vertimiento de agua residual. De acuerdo con el análisis preliminar se han identificado tres factores que tienen incidencia en la concentración de los cloruros que son:

% Cloruro de sodio / Total electrolito: Esta relación tiene gran relevancia en la variable de respuesta ya que el cloruro de sodio es el componente que aporta los cloruros.

% Algodón color teñido/ Total fibras: El algodón de color es la única fibra de todas las trabajadas que presenta electrolitos en su formulación para el proceso de teñido.

Concentración del electrolito: Mientras más elevada sea la concentración del electrolito mayor cantidad de cloruro y sulfato de sodio se debe usar.

Para la obtención de los datos correspondientes a los factores mencionados se requiere realizar un tratamiento a los datos primarios, que se recopilan a través del software empresarial, donde se almacena toda la información de los lotes de producción, la cantidad de sustancias involucradas en el proceso de tintura, la cantidad de agua gastada en el proceso, así como los datos de producción diario.

3.2 Recolección de datos primarios

Se toman los datos de cloruro de sodio y sulfato de sodio que son los electrolitos involucrados en el proceso de teñido de algodón y se saca la cantidad gastada de cada uno por día; luego se extrae la cantidad de agua gastada en los procesos de tintura y los kilos totales producidos y los kilos de algodón de color que son los que requieren el uso de electrolito.

Utilizando los datos primarios recolectados, se calculan los factores que se van a evaluar por su incidencia en la concentración de cloruros. Las ecuaciones utilizadas para este propósito se muestran a continuación:

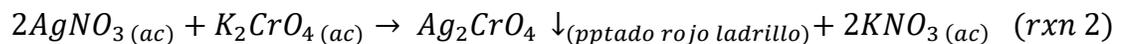
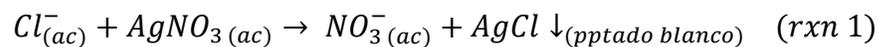
$$\% \text{ Cloruro de sodio} = \frac{\text{Kg Cloruro de sodio}}{\text{Kg Cloruro de sodio} + \text{Kg Sulfato de sodio}} \times 100 \quad (\text{Ec.1})$$

$$\% \text{ Algodón color} = \frac{\text{Total Algodón (kg)} - \text{Total Algodón Blanco (Kg)}}{\text{Total kilos producidos}} \times 100 \quad (\text{Ec.2})$$

$$[\text{Electrolito}] = \frac{\text{Kg Cloruro de sodio} + \text{Kg Sulfato de sodio}}{\text{Cantidad Agua (m}^3\text{)}} \quad (\text{Ec.3})$$

3.3 Medición de la variable de respuesta

Para medir la variable de respuesta (concentración de cloruros), se toma una muestra diaria a la salida de la planta de tratamiento a la cual se le realiza una valoración con nitrato de plata utilizando como indicador cromato de potasio. A continuación, se muestran las reacciones involucradas en la titulación:



En la primera reacción se consumen los cloruros que se encuentran en el agua para formar un precipitado color blanco que es cloruro de plata. Una vez se han agotado los cloruros se da la segunda reacción en la cual el nitrato de plata reacciona con el indicador (K_2CrO_4) para producir un precipitado de color naranja-rojizo que indica que se han agotado los cloruros y por tanto termina la titulación.

La concentración de cloruros en mg/L puede calcularse usando la siguiente expresión (México. Secretaría de Economía, 2001):

$$[mg Cl^- / L] = \frac{(A - B) * N * 35450}{mL \text{ de la muestra}} \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

A: Volumen en mL gastados del titulante $AgNO_3$ para la valoración de la muestra.

B: Volumen en mL gastados del titulante $AgNO_3$ para la valoración del blanco en mL.

N: Normalidad de $AgNO_3$.

El blanco utilizado es agua potable y se considera que $B=0$. La solución de nitrato de plata utilizada es 0,141N.

3.4 Modelos de Regresión

Dado que las mediciones de la concentración de cloruros obtenidos en la planta de tratamiento contienen todas las aguas residuales no domésticas de la empresa, provenientes de los procesos de tintura y lavados de máquina, no es representativo para la empresa realizar el análisis de las variables de forma controlada en un laboratorio ya que los valores obtenidos no corresponderían al funcionamiento de la PTAR, por lo cual, un diseño experimental no es viable. Se opta entonces por la realización de un ajuste matemático que permita establecer la relación entre la variable de respuesta y los factores que sean relevantes para el proceso. Inicialmente se requiere establecer qué factores inciden significativamente en la variable de respuesta, para lo cual, se hará uso de un modelo de regresión cuadrático que incluya los tres factores mencionados anteriormente y sus posibles interacciones, la expresión utilizada en dicho modelo es:

$$y = A_0 + AX_1 + BX_1^2 + CX_2 + DX_2^2 + EX_3 + FX_3^2 + GX_1X_2 + HX_1X_3 + IX_2X_3 \quad (\text{Ec.5})$$

Con los datos experimentales recolectados se realizará un análisis de varianza para determinar cuáles de los términos del modelo planteado son verdaderamente significativos en la

concentración de cloruros. Para validar esta significancia se hace uso del criterio estadístico del Valor P y posteriormente se recalculan los coeficientes respectivos y el coeficiente de determinación de esta regresión.

Además del modelo cuadrático se evaluará un modelo cúbico, para establecer cuál de los dos presenta un mejor ajuste de los datos experimentales y se usará para modelar el comportamiento de la variable de respuesta. La ecuación utilizada para el modelo cúbico se describe a continuación:

$$y = A_0 + AX_1 + BX_1^2 + CX_1^3 + DX_2 + EX_2^2 + FX_2^3 + GX_3 + HX_3^2 + IX_3^3 + JX_1X_2 + KX_1X_3 + LX_2X_3 + MX_1^2X_2 + NX_1^2X_3 + OX_2^2X_1 + PX_2^2X_3 + QX_3^2X_1 + RX_3^2X_2 + SX_1X_2X_3 \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

y = Cloruros (mg/L) → Variable de respuesta

X₁ = % Algodón/Total Fibra

X₂ = Concentración electrolito (g/L)

X₃ = % Sal/Total electrolito.

3.5 Evaluación de costos

Para determinar cuál es el impacto económico de operar en condiciones donde se cumpla con la restricción de cloruros respecto a otro en el que no, solo se puede variar un factor para que los datos sean comparables. El costo total se evalúa por día de producción de acuerdo con la expresión:

$$\text{Costo Total} = \sum \text{Costo Unitario}_i * \text{Cantidad}_i \quad (\text{Ec.7})$$

Donde

Costo Unitario i: representa el costo por Kg de cada materia prima utilizada en ese día

Cantidad i: representa la cantidad en Kg de cada materia prima consumida en ese día

4 Resultados y Análisis

Los valores para los tres factores que se están evaluando en el modelo (**Anexo 2**) fueron obtenidos a partir de los datos primarios (**Anexo 1**) de acuerdo con el modelo de cálculo presentado en la metodología, se grafican en función del tiempo para determinar cuál es el rango de trabajo en el que se mueve cada una de estas variables. A continuación, se presentan los gráficos correspondientes.

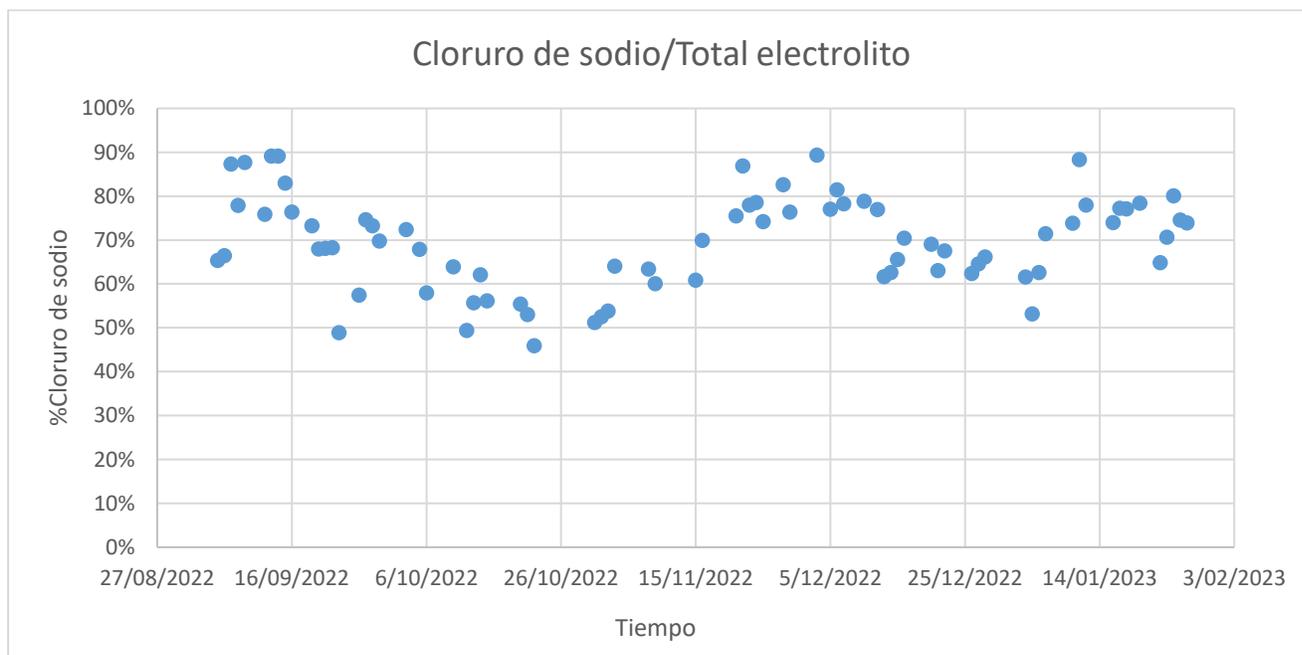


Figura 1.
Cantidad de cloruro de sodio/total electrolito.

Tabla 1.*Intervalo para cada uno de los factores.*

Factor	Valor mínimo	Valor máximo
% Cloruro de sodio/ Total electrolito:	45%	85%
% Algodón color teñido/ Total fibras	45%	70%
Concentración del electrolito (g/L)	1	3

Estos intervalos se tuvieron en cuenta para filtrar los datos que se encuentran por fuera de los rangos establecidos, estos corresponden al dominio de cada una de las variables y será la región de aplicación del ajuste matemático; los datos que se encuentran fuera del intervalo no fueron tenidos en cuenta ya que no son comunes en el desarrollo de la producción.

Se procede entonces a establecer si alguno de los factores evaluados en el modelo tiene incidencia en la variable de respuesta, de acuerdo con las siguientes pruebas de hipótesis:

H₀: Al menos uno de los factores afecta la variable de respuesta.

H_a: Ninguno de los factores afecta la variable de respuesta.

Se hace uso de la herramienta de análisis de datos de Excel para obtener el coeficiente de determinación del modelo cuadrático, el cual se muestra a continuación:

Tabla 2.*Coefficiente de determinación modelo cuadrático.*

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,92346707
Coefficiente de determinación R ²	0,84275073
R ² ajustado	0,80921906
Error típico	98,3151116
Observaciones	64

Para el modelo cuadrático el coeficiente de determinación (R²) arroja un valor distante a 1 (0,809), por lo cual, si bien el ajuste matemático puede modelar los datos, tendrá una incertidumbre asociada a este. El distanciamiento del coeficiente de determinación respecto a la unidad se debe a diferentes circunstancias como el hecho de que los datos son tomados a escala de planta, lo que dificulta el control de las variables, así mismo, el agua fluye permanentemente a través de la planta

de tratamiento y esto conlleva a que la medición de los cloruros presente una variación intrínseca, sin embargo, el ajuste obtenido da una buena aproximación.

La herramienta de análisis de datos de Excel también arroja los valores de los coeficientes de regresión junto a su correspondiente Valor-P. Los resultados obtenidos para el modelo cuadrático se muestran a continuación:

Tabla 3.

Coefficientes y Valor-P para la regresión del modelo cuadrático.

<i>Coefficientes</i>	<i>Valores de los Coeficientes</i>	<i>Valor P</i>
A ₀	4949,04529	3,19353E-05*
A	-5784,4587	0,029375699*
B	3069,23381	0,10891045
C	258,016667	0,330474909
D	-75,330377	0,080202062
E	-10261,991	6,81636E-06*
F	6112,55491	0,000155944*
G	-194,09045	0,650600277
H	6225,45511	0,001045061*
I	383,438517	0,164362511

*Valor p < 0,05

Los valores marcados con * son aquellos que tienen relevancia en el modelo de regresión ya que su valor p es <0,05, los demás términos de la ecuación no son tenidos en cuenta, por lo cual, el modelo planteado se simplifica considerablemente. El modelo simplificado obtenido es, por tanto:

$$y = A_0 + AX_1 + EX_3 + FX_3^2 + HX_1X_3 \quad (\text{Ec.8})$$

Es de resaltar que ninguno de los coeficientes relacionados con el factor X₂ (Concentración del electrolito) fue significativo, por lo tanto, puede decirse que dicho factor no es relevante para la variable de respuesta, es decir, para la concentración de los cloruros en el agua residual.

Una vez determinados los términos de la ecuación que se tomarán en cuenta en el ajuste, los valores de los coeficientes de la ecuación deben ser recalculados, este procedimiento se realiza con la herramienta de análisis de datos de Excel obteniéndose los siguientes valores:

Tabla 4.

Coefficientes del modelo cuadrático simplificado.

<i>Coefficientes</i>	<i>Valores de los Coeficientes</i>	<i>Valor P</i>
A ₀	3939,71416	3,1815E-05
A	-2084,8141	0,05352599
E	-9573,2244	5,8352E-05
F	6385,51727	0,00015096
H	5768,54227	0,00099301

La ecuación matemática que representa el ajuste realizado será entonces:

$$[Cl^-] = 3939,7 + -2084,8 X_1 - 9573,2 X_3 + 6385,5 X_3^2 + 5768,5 X_1 X_3 \quad (\text{Ec.9})$$

A continuación, se presenta la tabla que contiene el coeficiente de determinación del ajuste cuadrático simplificado.

Tabla 5.

Estadísticas de la regresión del modelo cuadrático simplificado.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,89990369
Coefficiente de determinación R ²	0,80982665
R ² ajustado	0,79693354
Error típico	106,90535
Observaciones	64

Con el modelo cuadrático simplificado se obtiene el análisis de varianza que se muestra a continuación:

Tabla 6.

Análisis de varianza para el modelo cuadrático simplificado.

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	2871397,28	717849,319	62,8108133	1,3519E-20
Residuos	59	674296,472	11428,7538		
Total	63	3545693,75			

Dado que el valor crítico de F representa la significancia global del modelo de regresión y este es menor a 0,05 es posible concluir que el modelo tiene significancia estadística y que además se acepta la hipótesis nula planteada previamente, es decir, al menos uno de los factores

considerados afecta la variable de respuesta (Montgomery & Runger, 2014).

Se procede ahora a evaluar el modelo cúbico sin considerar el factor X_2 (Concentración de electrolito) dado que ya se encontró que no es relevante para la variable de respuesta, por lo cual, todos los términos del modelo cúbico presentado en la metodología que contengan el factor X_2 no serán tenidos en cuenta en la regresión, entonces el modelo cúbico simplificado es:

$$y = A_0 + AX_1 + BX_1^2 + CX_1^3 + GX_3 + HX_3^2 + IX_3^3 + KX_1X_3 + NX_1^2X_3 + QX_3^2X_1 \quad (\text{Ec.10})$$

Con el modelo cúbico simplificado se hace uso de la herramienta de análisis de datos de Excel para obtener el coeficiente de determinación correspondiente, el cual se muestra a continuación:

Tabla 7.
Estadísticas de la regresión del modelo cúbico simplificado.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,90187911
Coefficiente de determinación R^2	0,81338593
R^2 ajustado	0,78228359
Error típico	115,344586
Observaciones	64

Al comparar ambos modelos (**Tabla 5** y **Tabla 7**) se evidencia que el modelo cúbico presenta un mejor ajuste a los datos experimentales dado que el coeficiente de determinación es más próximo a uno, sin embargo, esa pequeña mejora respecto al modelo cuadrático simplificado no compensa la complejidad del modelo, por lo cual, se selecciona el modelo cuadrático para hacer el ajuste matemático de los datos.

Usando el ajuste matemático encontrado, es posible determinar que combinaciones de los diferentes factores permiten obtener condiciones de operación donde se cumpla la normativa ambiental de concentración de cloruros.

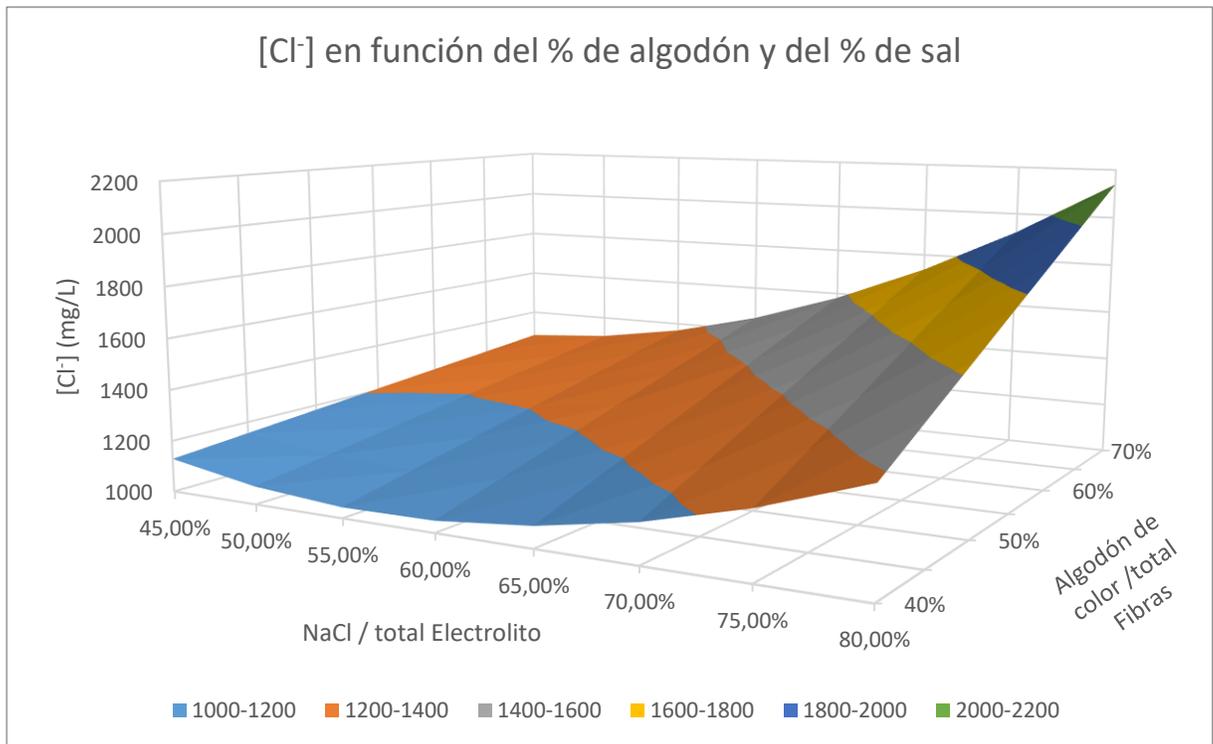


Figura 4.

Superficie de respuesta de la concentración de cloruros en función del porcentaje Algodón color y el porcentaje de cloruro de sodio.

El gráfico muestra que a medida que se incrementa el porcentaje de NaCl respecto al total de los electrolitos utilizados, mayor es la concentración de cloruros en el agua residual, así mismo, al aumentar el porcentaje de algodón de color respecto a las otras fibras la concentración de cloruros también aumenta. La zona de color azul celeste es la que muestra la combinación de factores en los que es posible operar la planta de producción cumpliendo la normativa ambiental.

Para el análisis de costos es necesario conocer los costos asociados a la producción de la empresa, así como de las cantidades gastadas. La **Tabla 8** resume el costo unitario de las principales materias primas utilizadas en un día de producción (“otros” hace referencia a los demás auxiliares de tintura utilizados en el proceso).

Tabla 8.*Costos relacionados a un día de producción.*

Concepto	Cantidad (Kg)	Costo Unitario (COP)
Algodón color (Kg)	5880,96	COP 25.655
Fibra (Kg)	3737,67	COP 19.930
Cloruro de sodio (Kg)	1417,27	COP 753
Sulfato de sodio (Kg)	1424,72	COP 2.650
Otros (Kg)	1574,88	COP 37.173

Considerando que las cantidades totales de fibras, de electrolitos y de otros permanecen constantes y únicamente se varía la relación algodón color/Total fibras y NaCl/Total electrolito, puede realizarse una matriz de costos para diferentes combinaciones de los factores encontrados y de este modo analizar el efecto económico diario que tiene para la empresa cambiar las condiciones de operación.

Tabla 9.*Matriz de costos*

		Algodón de color /Total Fibras						
		40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%
NaCl/Total electrolito	45%	\$257.130.759	\$264.671.606	\$272.212.453	\$279.753.300	\$287.294.147	\$294.834.994	\$302.375.841
	50%	\$256.861.181	\$264.402.028	\$271.942.875	\$279.483.722	\$287.024.569	\$294.565.416	\$302.106.263
	55%	\$256.591.603	\$264.132.450	\$271.673.297	\$279.214.144	\$286.754.991	\$294.295.838	\$301.836.685
	60%	\$256.322.025	\$263.862.872	\$271.403.719	\$278.944.566	\$286.485.413	\$294.026.260	\$301.567.108
	65%	\$256.052.447	\$263.593.294	\$271.134.141	\$278.674.988	\$286.215.836	\$293.756.683	\$301.297.530
	70%	\$255.782.869	\$263.323.716	\$270.864.564	\$278.405.411	\$285.946.258	\$293.487.105	\$301.027.952
	75%	\$255.513.292	\$263.054.139	\$270.594.986	\$278.135.833	\$285.676.680	\$293.217.527	\$300.758.374
	80%	\$255.243.714	\$262.784.561	\$270.325.408	\$277.866.255	\$285.407.102	\$292.947.949	\$300.488.796
	85%	\$254.974.136	\$262.514.983	\$270.055.830	\$277.596.677	\$285.137.524	\$292.678.371	\$300.219.218

Los valores destacados en negrita corresponden a la zona en la cual se da el cumplimiento de la normativa ambiental con una concentración de cloruros menor a 1200 mg/L. La diferencia de costos se analiza, variando uno de los factores a la vez en la zona de cumplimiento de la normativa ambiental. Para evaluar el efecto del porcentaje de NaCl/total electrolito se tomará el 40% de algodón color y se comparan la cantidad de cloruro de sodio entre el 45% y el 70%, obteniéndose una diferencia de COP 1.347.889 por día, lo que corresponde a COP 35.045.125 al mes y a COP 420.541.497 al año.

El manejo de la relación porcentaje de NaCl/total electrolito puede hacerse a voluntad en la planta, sin embargo, el porcentaje de Algodón color/total fibras depende de los pedidos que deba entregar la empresa, los cuales se priorizan con base al cliente y al tiempo de entrega establecido y jugar con esta variable puede volverse complejo, por lo cual, se requiere una programación rigurosa de la producción para mantenerse en el rango de trabajo que permite cumplir con la normativa ambiental y a su vez con las entregas de los pedidos.

5 Conclusiones

Entre los factores evaluados, la concentración del electrolito no es un factor estadísticamente significativo que afecte la concentración de cloruros en el agua residual, mientras que las relaciones de NaCl/ total electrolito y Algodón color/ total fibras si lo son.

El ajuste matemático que explica la relación entre la concentración de cloruros en el agua residual y los factores significativos es una regresión cuadrática con un $R^2=0,809$.

Si se opera la planta con una producción de 40% Algodón color teñido/ Total fibras, puede usarse una relación 70% cloruro de sodio/Total electrolito y cumplir con la normativa ambiental de concentración de cloruros (1200). Si se quiere operar al 50% Algodón color teñido/ Total fibras, entonces debe usarse una relación del 60% cloruro de sodio/Total electrolito.

No es factible operar la empresa por encima del 50% Algodón color teñido/ Total fibras y al mismo tiempo cumplir con la normativa ambiental, por tanto, la programación de la producción debe realizarse de tal modo que permita mantenerse en los rangos establecidos para el cumplimiento de la norma.

El impacto económico de variar la relación NaCl/total electrolitos desde el 70% hasta el 45% representa un total de COP 420.541.497 adicionales cada año para la empresa.

Referencias

- Carrión Fité, F. J. (2004). Influencia de las sales magnésicas en la tintura del algodón con colorantes reactivos. (B. I. Industrial, Ed.) *Universitat Politècnica de Catalunya*, 29-33.
- Colombia. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015 (marzo 17): por lo cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial*.
- López Solís, S. M. (2017). Implementación de puntos críticos de control en el proceso de teñido de telas de algodón en el área de tintorería y acabado de industria textil de los altos S.A. (*Tesis de pregrado*). Universidad Rafael Landívar, Ciudad de Guatemala.
- México. Secretaría de Economía. (2001). Análisis de agua - determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- método de prueba. *Diario Oficial*.
- Montgomery, D., & Runger, G. (2014). *Applied statistics and probability for engineers*. Arizona: Wiley.
- Ruiz Cordova, M. (5 de Enero de 2016). Obtenido de <https://apttperu.com/estampado-con-colorantes-reactivos/>

Anexos

Anexo 1.

Datos primarios para la realización de este trabajo.

Fecha	Algodón Color (kg)	Total Fibras (kg)	NaCl (kg)	NaSO ₄ (kg)	Cantidad de agua (m3)
5/09/2022	7402,3	14713,3	1754,4	931,6	1294
6/09/2022	7473,9	13730,2	1590,0	804,3	1109
16/09/2022	6868,7	12328,0	1361,4	421,2	1250
19/09/2022	5434,0	11030,9	1407,2	513,7	1534
20/09/2022	5703,0	11331,1	1473,8	757,9	1021
21/09/2022	5714,3	11404,8	1182,3	555,0	1262
22/09/2022	7477,5	12617,9	1406,5	654,2	1264
23/09/2022	8335,5	12233,6	1043,6	1091,2	1395
26/09/2022	4928,4	10839,6	996,8	739,9	1521
29/09/2022	5715,2	12230,0	1506,6	653,0	1289
3/10/2022	6757,5	13777,5	1845,3	703,6	1187
4/10/2022	6599,5	13381,9	1086,3	1047,4	1306
5/10/2022	5847,3	12448,6	1683,4	797,8	1500
6/10/2022	7454,3	12098,8	1792,7	1301,9	1295
10/10/2022	6820,8	11990,5	1929,5	1089,5	1452
12/10/2022	6036,1	13634,5	1078,4	1106,6	836
13/10/2022	8095,5	14092,9	1115,9	886,8	1424
14/10/2022	6663,6	13675,2	1409,0	980,1	1282
18/10/2022	9207,7	12436,4	1938,7	1247,6	1315
19/10/2022	11299,5	13836,1	2339,7	1757,7	1466
20/10/2022	8002,6	13683,6	1842,3	1482,3	1606
21/10/2022	10028,7	15518,8	2165,0	1918,6	1448
25/10/2022	8649,6	11032,8	1736,0	1687,7	1487
31/10/2022	6905,7	12957,6	1669,3	1590,9	1287
1/11/2022	9113,4	13232,9	1782,7	1615,4	1457
2/11/2022	9906,7	16173,6	1702,0	1461,9	1380
3/11/2022	8554,4	14286,3	2566,2	1440,5	1439
4/11/2022	8678,2	14062,8	1731,1	1391,5	1176
5/11/2022	5881,0	9618,6	1417,3	1424,7	1306
8/11/2022	6413,0	11625,3	2187,1	1265,9	1026
9/11/2022	7629,1	13394,0	1811,5	1206,9	1288
10/11/2022	5585,9	10951,6	848,7	1040,3	1333
15/11/2022	8345,4	12922,8	1671,9	1077,2	1580
16/11/2022	8140,4	16093,3	1914,2	967,6	1360

19/11/2022	5239,5	10474,6	1949,2	581,0	1351
21/11/2022	9553,7	13997,8	3983,6	1296,3	1509
23/11/2022	9020,9	14338,9	2093,6	592,6	1335
24/11/2022	6567,5	12643,8	1973,2	539,2	812
25/11/2022	5555,0	12622,0	2068,4	720,0	1300
30/11/2022	6696,9	10690,9	2456,4	664,8	1795
5/12/2022	9577,4	14243,2	2593,3	774,0	1513
7/12/2022	4730,4	7855,1	2016,0	559,8	813
9/12/2022	8180,8	13141,7	2127,6	851,4	1381
10/12/2022	5771,9	9163,4	1517,5	408,0	949
12/12/2022	7607,7	13770,4	2157,9	646,8	1410
13/12/2022	8725,0	14969,3	1830,1	1138,3	1653
14/12/2022	7251,3	13121,1	1727,1	1033,8	1239
19/12/2022	5457,5	9477,3	1995,3	822,5	1391
20/12/2022	7010,1	12883,9	2603,6	1167,6	1304
21/12/2022	6805,3	11785,8	1699,6	998,2	1954
28/12/2022	6891,8	13477,0	1992,2	1020,5	1141
3/01/2023	7416,0	11641,9	1538,3	961,3	1261
5/01/2023	6573,2	12144,9	2046,7	1223,3	1273
6/01/2023	6260,3	11170,5	1799,3	720,7	1224
12/01/2023	5112,1	10812,1	1637,7	463,2	1270
16/01/2023	5262,0	10503,4	2294,0	807,0	1471
17/01/2023	5422,1	10938,0	2119,1	624,0	1088
18/01/2023	7861,9	11919,4	2538,3	755,3	1311
20/01/2023	6292,2	11092,3	2316,7	638,9	1317
23/01/2023	4844,9	8409,0	1005,6	545,7	1127
24/01/2023	6628,4	11793,6	1903,8	793,2	1263
25/01/2023	5005,5	10957,3	1388,3	346,3	1360
26/01/2023	5155,8	10445,1	1728,5	590,4	1189
27/01/2023	5274,2	9963,5	1397,1	494,5	1177

Anexo 2.

Datos procesados y filtrados para el análisis.

Fecha	Algodón /Total Fibras	Concentración Electrolito (g/L)	NaCl/Total electrolito	Cloruros en agua residual
5/09/2022	50,31%	2,08	65,32%	1200
6/09/2022	54,43%	2,16	66,41%	1320
16/09/2022	55,72%	1,43	76,37%	1350
19/09/2022	49,26%	1,25	73,26%	1250
20/09/2022	50,33%	2,20	67,97%	1400
21/09/2022	50,10%	1,38	68,05%	1300
22/09/2022	59,26%	1,63	68,25%	1450
23/09/2022	68,14%	1,53	48,88%	1250
26/09/2022	45,47%	1,14	57,40%	1025
29/09/2022	46,73%	1,68	69,76%	1250
3/10/2022	49,05%	2,15	72,40%	1375
4/10/2022	49,32%	1,63	50,91%	1200
5/10/2022	46,97%	1,65	67,85%	1250
6/10/2022	61,61%	2,39	57,93%	1350
10/10/2022	56,89%	2,08	63,91%	1250
12/10/2022	44,27%	2,61	49,36%	1100
13/10/2022	57,44%	1,41	55,72%	1150
14/10/2022	48,73%	1,87	58,98%	1200
18/10/2022	74,04%	2,42	60,84%	1350
19/10/2022	81,67%	2,79	57,10%	1700
20/10/2022	58,48%	2,07	55,41%	1250
21/10/2022	64,62%	2,82	53,02%	1250
25/10/2022	78,40%	2,30	50,71%	1500
31/10/2022	53,29%	2,53	51,20%	1150
1/11/2022	68,87%	2,33	52,46%	1330
2/11/2022	61,25%	2,29	53,79%	1300
3/11/2022	59,88%	2,78	64,05%	1500
4/11/2022	61,71%	2,66	55,44%	1250
5/11/2022	61,14%	2,18	49,87%	1150
8/11/2022	55,16%	3,37	63,34%	1350
9/11/2022	56,96%	2,34	60,02%	1250
10/11/2022	51,01%	1,42	44,93%	1250
15/11/2022	64,58%	1,74	60,82%	1250
16/11/2022	50,58%	2,12	69,89%	1400
19/11/2022	50,02%	1,87	77,04%	1500
21/11/2022	68,25%	3,50	75,45%	1800

23/11/2022	62,91%	2,01	77,94%	1980
24/11/2022	51,94%	3,09	78,54%	1550
25/11/2022	44,01%	2,14	74,18%	1480
30/11/2022	62,64%	1,74	78,70%	1950
5/12/2022	67,24%	2,23	77,01%	2050
7/12/2022	60,22%	3,17	78,27%	2000
9/12/2022	62,25%	2,16	71,42%	1700
10/12/2022	62,99%	2,03	78,81%	2050
12/12/2022	55,25%	1,99	76,94%	1550
13/12/2022	58,29%	1,80	61,65%	1400
14/12/2022	55,26%	2,23	62,56%	1350
19/12/2022	57,58%	2,03	70,81%	1650
20/12/2022	54,41%	2,89	69,04%	1650
21/12/2022	57,74%	1,38	63,00%	1350
28/12/2022	51,14%	2,64	66,13%	1500
3/01/2023	63,70%	1,98	61,54%	1250
5/01/2023	54,12%	2,57	62,59%	1250
6/01/2023	56,04%	2,06	71,40%	1500
12/01/2023	47,28%	1,65	77,95%	1510
16/01/2023	50,10%	2,11	73,98%	1500
17/01/2023	49,57%	2,52	77,25%	1600
18/01/2023	65,96%	2,51	77,07%	1750
20/01/2023	56,73%	2,24	78,38%	1650
23/01/2023	57,62%	1,38	64,82%	1200
24/01/2023	56,20%	2,14	70,59%	1400
25/01/2023	45,68%	1,28	80,04%	1400
26/01/2023	49,36%	1,95	74,54%	1500
27/01/2023	52,94%	1,61	73,86%	1500