



## Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx)

### **Análisis exploratorio de datos de la acidez del azufre para implementar un sistema de neutralización**

#### **Exploratory data analysis of the sulfur acidity to implement a neutralization system**

**Álvarez-Pérez, L., Hernández-Márquez, J., Pérez-Pastenes, H.\* , Núñez-Correa, S., Medorio-García, H.P.**

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana. C.P. 6535, Coatzacoalcos, Veracruz, MÉXICO.  
[lucalvarez@uv.mx](mailto:lucalvarez@uv.mx); [jaquewinter@outlook.es](mailto:jaquewinter@outlook.es); [huperez@uv.mx](mailto:huperez@uv.mx)\*; [sarnunez@uv.mx](mailto:sarnunez@uv.mx); [hmedorio@uv.mx](mailto:hmedorio@uv.mx)

**Innovación tecnológica:** Análisis exploratorio de datos con RStudio de los parámetros medidos en el azufre prilado.

**Área de aplicación industrial:** Industria Química y de Procesos para la obtención de azufre.

Recibido: 07 junio 2024

Aceptado: 11 abril 2025

#### **Abstract**

Prilled sulfur is the raw material for a smelting plant, which typically exceeds the specification limits, particularly the allowed acidity levels, for direct use in the process. Excessive acidity in the raw material is aggressive to the melting process equipment, making it crucial to analyze the changes in sulfur properties over time to address the issue. This paper presents an exploratory data analysis (EDA) using RStudio on the parameters obtained from prilled sulfur, as well as sulfur from gas-sweetening plants. The EDA was employed as a tool to establish the foundation for designing a neutralization system for processed sulfur. The analysis revealed that the acidity of prilled sulfur exceeds the maximum allowed acidity specification by 1000 to 2000 ppm, based on the historical average. A proposed neutralization system using hydrated lime achieved 98.86% efficiency in neutralizing  $H_2SO_4$ , enabling the prilled sulfur to meet the specified acidity limits. A comparative analysis with Claus sulfur demonstrated that the latter meets the acidity specifications and serves as a reference for designing the proposal. Based on the EDA results, the impact of the proposed solution on the sulfur melting process was evaluated, and appropriate recommendations were made for ensuring the proper operation of the melting process.

**Keywords:** Exploratory data analysis, EDA, Prilled sulfur or sulfur prills, Sulfur acidity neutralization, Rstudio, Sulfuric acid production.

## Resumen

El azufre prilado es la materia prima para una planta de fundición, el cual generalmente sobrepasa los valores límites marcados por la especificación para ser usado directamente en el proceso, principalmente el límite permitido para la acidez. El exceso de acidez en la materia prima deteriora de manera agresiva a los equipos del proceso de fundición, por lo que es importante analizar los cambios en las propiedades del azufre con respecto al tiempo para poder resolver el problema. En el presente artículo se realiza un análisis exploratorio de datos (EDA) usando Rstudio de los parámetros medidos en el azufre prilado, así como del azufre procedente de plantas dulcificadoras de gas. El EDA se utilizó como herramienta para obtener las bases del diseño de un sistema de neutralización del azufre procesado. Con el EDA se encontró que el promedio histórico de la acidez del azufre prilado supera entre 1000 y 2000 ppm a la acidez máxima permitida por la especificación. Se propuso un sistema de neutralización con cal hidratada que consiguió una eficacia del 98,86% en la neutralización del  $H_2SO_4$  presente, lo que permitió que el azufre prilado cumpliera con los límites de acidez especificados. Además, el análisis comparativo con el azufre de Claus mostró que este último cumple con las especificaciones de acidez y es una referencia en el diseño de la propuesta. Considerando los resultados de EDA, se evaluaron los efectos de la aplicación de la propuesta en la fundición de azufre y se realizaron las recomendaciones pertinentes para el buen funcionamiento del proceso de fundición.

**Palabras Clave:** Análisis exploratorio de datos, EDA, Azufre prilado, Neutralización de la acidez del azufre, Rstudio, Producción de ácido sulfúrico.

## 1. Introducción

El azufre es un no metal abundante en la naturaleza de color amarillo característico (Klein & Hulburt, 2018), el cual se usa en múltiples aplicaciones industriales (caucho, plástico, fertilizantes, fungicidas, papel, tintes y pigmentos, etc.), y que especialmente se utiliza en la producción de ácido sulfúrico (Iglesias et al., 2024).

En las plantas de producción de ácido sulfúrico generalmente se utiliza como materia prima el azufre fundido generado por el proceso de Claus (Cruz-Ortiz et al., 2017). El proceso de Claus modificado es la principal tecnología utilizada para la recuperación de azufre elemental a partir de  $H_2S$  y  $SO_2$ . Además, existen varias tecnologías comerciales para la recuperación de azufre de gases ácidos, que incluyen procesos de limpieza de gases de cola capaces de alcanzar

eficiencias de recuperación entre el 99% y el 99.9%, incluyendo el azufre recuperado en la unidad de Claus. Entre estos procesos destacan Amoco (adsorción en lecho frío), Sulfreen, Beavon, Wellman-Lord y SCOT (tratamiento de gases residuales), siendo este último el más confiable y flexible en términos de eficiencia de recuperación de azufre, fiabilidad y ventajas operativas (Eow, 2002). Sin embargo, el transporte de esta materia prima es complicado, ya que es necesario el uso de autotanques con sistemas de calentamiento que eviten la solidificación (Marqués Sancho, 2009), además de que las dimensiones de estos vehículos son otra limitante para la producción de ácido sulfúrico (Perales Vilar, 2015).

El azufre prilado, formado por esferas regulares no mayores a 7 mm de diámetro, es una manera práctica de transporte a largas

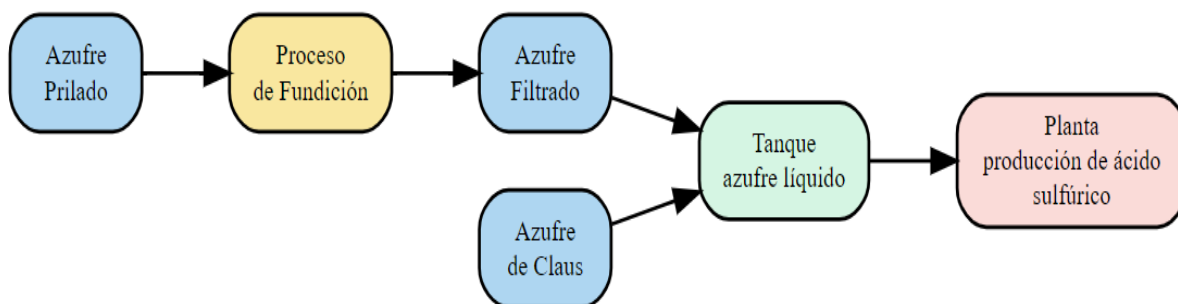
distancias, evitando las complicaciones de su manejo en estado líquido. Inicialmente, el azufre se obtiene de diferentes procesos de extracción siendo posteriormente tratado para generar los prills (Quera Miro, 1994). En las plantas de fundición se recibe el azufre prilado en auto-tolvas, el cual requiere cumplir con las especificaciones para evitar daños en los equipos usados en la fundición, como son los fundidores, filtros, bombas, agitadores y equipos de instrumentación de la planta (Santander Araya, 2014). Por otro lado, se ha demostrado que los prills presentan una mayor uniformidad en comparación con las partículas de azufre granulado, aunque su resistencia mecánica es inferior (Momoniat & Rahmanian, 2022).

Por lo anterior, se deben realizar constantes análisis de laboratorio en el azufre recibido (Negro Cabrera, 2017). En este caso de estudio, se considera que los parámetros estándar para el azufre como materia prima deben ser: mínimo 99.5% de pureza en base seca, máximo 500 ppm (0.05% peso) de cenizas, 250 ppm de carbono, 3% de humedad, 500 ppm de  $H_2SO_4$  (acidez), y debe tener una apariencia de color amarillo característico sin partículas extrañas a la vista.

En más del 50% de los análisis realizados al azufre prilado, los resultados muestran desviaciones importantes respecto a los parámetros estándar, particularmente en el contenido de acidez, cuyos valores superan

los 500 ppm permitidos por especificación, lo que se atribuye a las condiciones de transporte y almacenamiento. El contenido de ácido en el azufre es una variable crítica para la planta debido a que la corrosión por acidez puede consumir lentamente los materiales, lo que conduce al debilitamiento de partes vitales de un equipo y, finalmente, a una falla (Londoño Beltrán, 2023). Por lo tanto, se requiere una comprensión de las implicaciones de la desviación de los parámetros del azufre, así como una solución para neutralizar la acidez del azufre prilado (Aduviri, 2018).

Para tener las bases de diseño del sistema de neutralización se debe realizar una búsqueda de los datos disponibles; tanto de los obtenidos del azufre prilado como del azufre de Claus. Para el caso de azufre prilado, en cada descarga de auto-tolva se toma una muestra del azufre prilado y es enviado al laboratorio, en donde se analiza: la pureza en base seca, el porcentaje de humedad, la acidez por contenido de  $H_2SO_4$  o  $H_2S$ , su apariencia y, los contenidos de carbono, cenizas, hierro y cloruros. Para el azufre de Claus, en cada descarga de pipa (auto-tanque) se toma también una muestra del azufre fundido, se envía al laboratorio en donde se analiza: el porcentaje de humedad, los contenidos de cenizas, Cl, Ca, Al, Fe, Na, K, As y Se, además de la acidez por  $H_2SO_4$  y  $H_2S$  (Katz, 2011). En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo de la procedencia del azufre prilado y de Claus.



**Figura 1.** Diagrama de la procedencia del azufre en una planta de producción de ácido sulfúrico.

El Análisis Exploratorio de Datos (EDA, por sus siglas en inglés de Exploratory Data Analysis) es una etapa fundamental en el trabajo de un científico de datos. El EDA permite investigar un conjunto de datos y resumir sus principales características, a menudo empleando métodos de visualización de datos (Rodríguez et al., 2024), además de que proporciona una base sólida para futuros análisis y toma de decisiones, al permitir una comprensión más profunda de los datos y de su potencial para aplicaciones posteriores (Bagnato, 2020). Existen varios programas comerciales que pueden realizar análisis de datos (SPSS, SAS, Minitab, entre otros); sin embargo, RStudio es un software libre con un entorno de desarrollo integrado para R (un código abierto), en donde se maneja, almacena y analiza información para realizar modelos estadísticos que pueden ser sencillos, tales como regresiones y análisis de varianza, o modelos más complejos como es el análisis multivariado, según sea la necesidad del usuario (López Telenchana et al., 2024).

En este trabajo, se realiza un EDA con el programa RStudio, para obtener una comprensión del comportamiento de los parámetros, poniendo especial atención en la tendencia de los valores de la acidez del azufre. Con los resultados obtenidos del análisis de los datos, se planteó una propuesta de neutralización de la acidez del azufre prilado, ya que el azufre de Claus procede de

las plantas endulzadoras de gas, por lo que se puede considerar un azufre de alta pureza. Se pretende que el producto final (azufre fundido) de la planta de fundición cumpla los estándares de acidez, iguales o mejores que los del azufre de Claus.

## 2. Metodología

Durante la fase inicial del EDA, se examinaron los datos recopilados, en un archivo CSV, recolectados entre los años 2022 y 2023 de una planta de producción de ácido sulfúrico, con el objetivo de comprender su naturaleza y contenido. Lo anterior se realizó para identificar posibles patrones, reconocer distribuciones estadísticas relevantes y obtener una visión general de la información presente en los datos.

El experimento se realizó en dos etapas, limpieza de datos y procesamiento de estos en Rstudio (Quispe, 2023). Para la primera etapa, se utilizó una base de datos de los análisis de laboratorio realizados tanto al azufre prilado como al azufre de Claus, a los cuales se le realizó una limpieza, tomando en cuenta el volumen de información y seleccionando aquellas variables con las que se realizó el análisis. La segunda etapa consistió en el procesamiento de datos con el programa Rstudio con el lenguaje de programación R de acuerdo con la Figura 2.

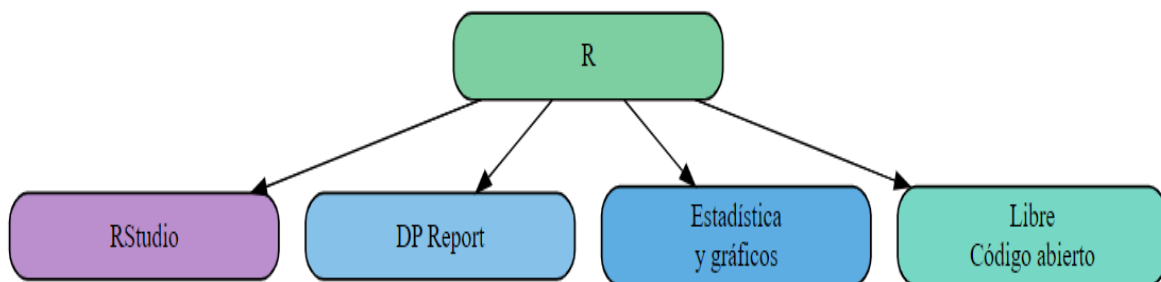


Figura 2. R para EDA.

En lenguaje R se programaron dos objetos, uno de nombre “claus” que contiene toda la base de datos del azufre proveniente del proceso de Claus, y otro de nombre “pril”, referente al azufre prilado. Estos objetos se crearon en el entorno de R como se muestra en la Figura 3.

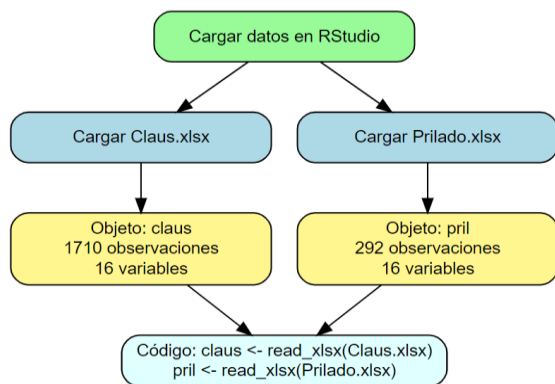


Figura 3. Creación de objetos con la base de datos.

El EDA en Rstudio permite observar uno o más conjuntos de datos y comprender la estructura subyacente de la información que contienen, mediante la metodología mostrada en la Figura 4 (Quispe, 2023).

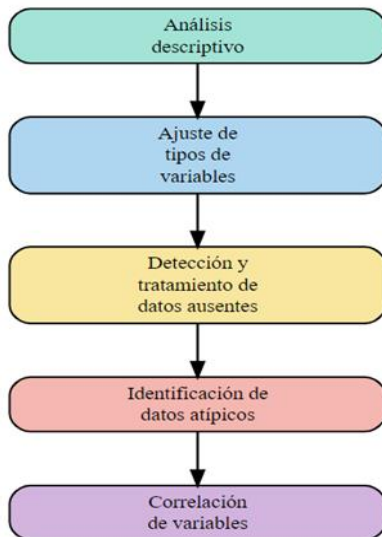


Figura 4. Metodología para EDA.

### A. Análisis Descriptivo.

Para obtener una vista descriptiva de los datos se utilizan los comandos *Summary (Claus)* y *Summary (pril)* los cuales generan un resumen general de las variables de la base de datos, mostrando los valores: mínimo, máximo, media, mediana, primer y tercer cuartil para las variables numéricas (ver Figura 5).

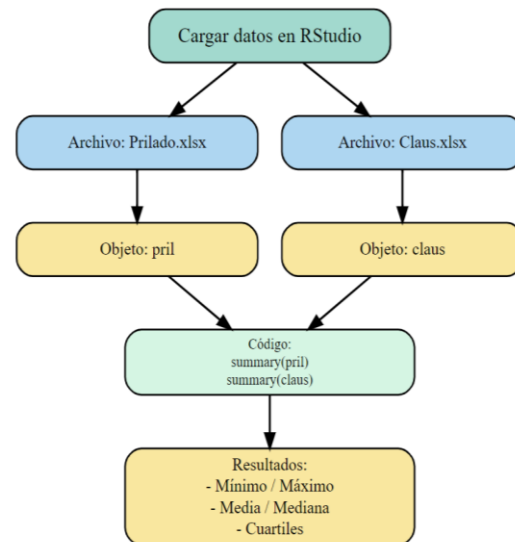


Figura 5. Análisis descriptivo en Rstudio.

### B. Ajuste de tipos de variables.

Para esta parte es necesario generar un Data Profiling Report (Informe del perfil de los datos) mediante los comandos *DataExplorer:create\_report(claus)* y *DataExplorer: create\_report(pril)*.

La generación de los objetos claus y pril en RStudio permitió identificar un total de 16 variables en cada conjunto de datos. Estas variables fueron clasificadas mediante el paquete *DataExplorer* según su tipo: carácter, fecha y numéricas.

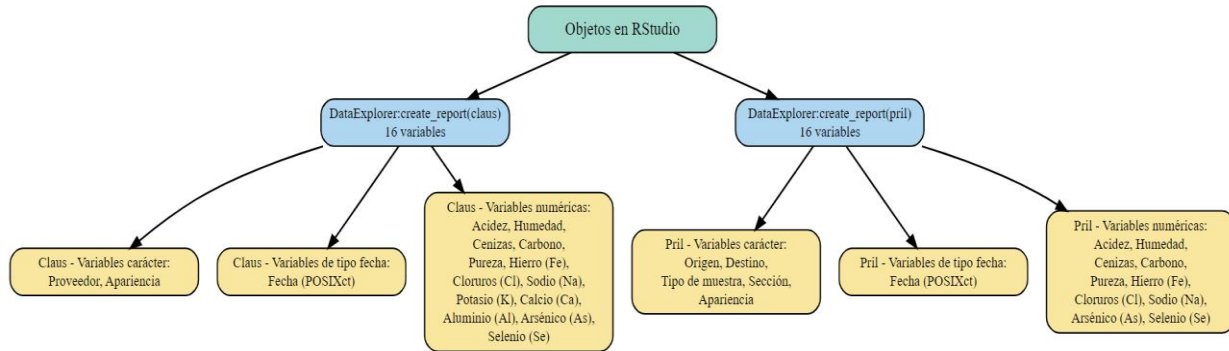


Figura 6. Ajuste del tipo de variables.

En el diagrama del azufre de Claus (Figura 6) se observa que se cuenta con un total de 16 variables, de las cuales los objetos denominados “proveedor” y “apariciencia” están almacenadas como parámetros tipo carácter, las fechas están como “POSIXct”, el cual es un tipo de variable de tiempo en R, y el resto de las variables son numéricas, por lo que todas están almacenadas en forma numéricamente correcta y no se requiere ajustarlas. En lo que se refiere al azufre prilado se puede observar que se cuenta con un total de 16 variables de las cuales los objetos Origen, Destino, Tipo de muestra y

Sección están almacenadas como carácter, las fechas como “POSIXct”, y el resto de las variables son numéricas, por lo que tampoco requieren algún tipo de ajuste.

### C. Detección y tratamiento de datos ausentes.

En el Data Profiling Report, también podemos obtener el diagrama “Missing Data Profile” donde se presentan los datos ausentes (NA) de cada variable, así como aquellas que se recomiendan eliminar del análisis debido a la ausencia de datos (Figura 7).

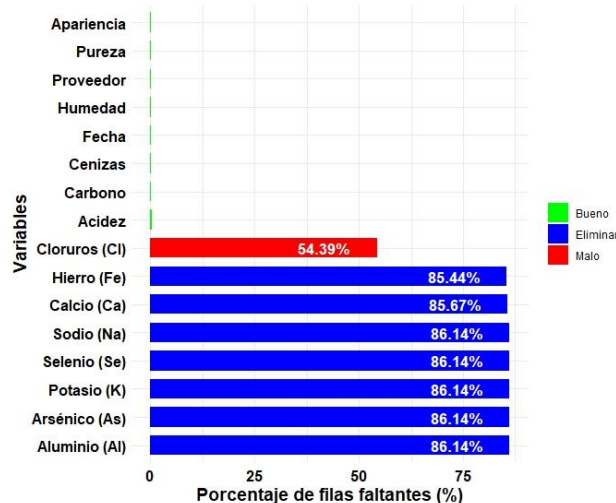
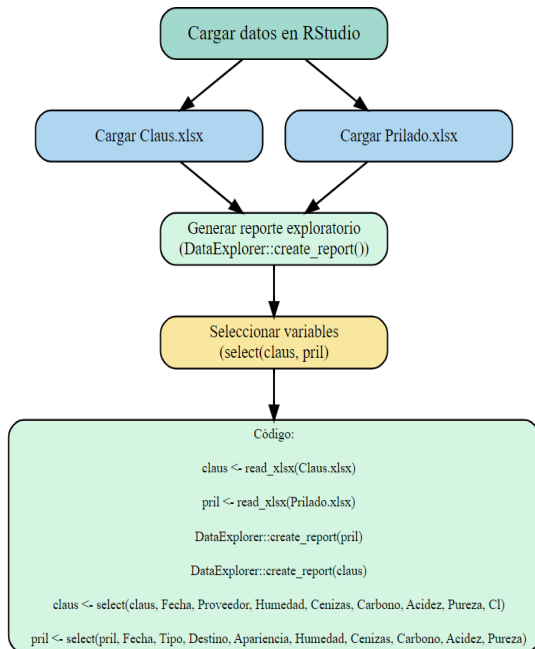


Figura 7. Porcentaje de datos ausentes en la base de datos del azufre de Claus.

De los datos del azufre de Claus, se eliminan las variables Fe, Ca, K, Se, As, Na y Al, tal como recomienda el programa. Por otro lado, se genera un nuevo objeto que contendrá la

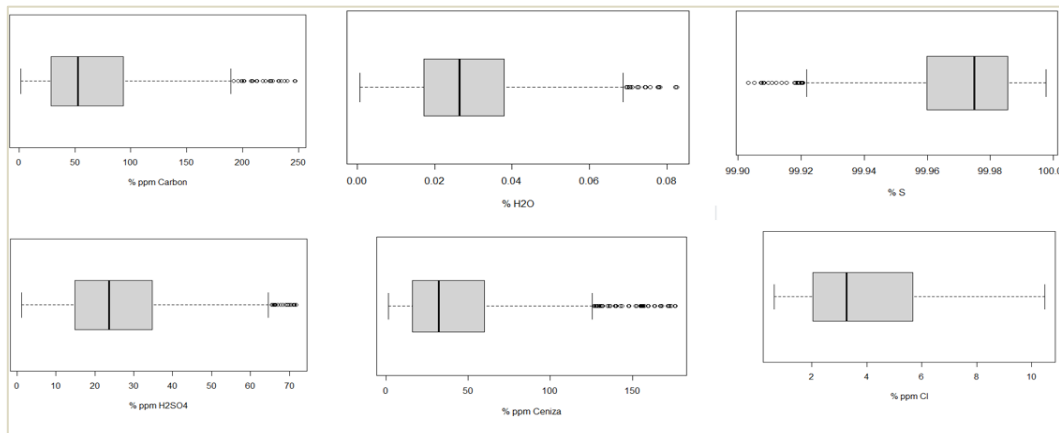
base de datos con la que se seguirá trabajando como se muestra en la Figura 8. Únicamente tendrá las variables que no se eliminaron. Se realiza el mismo tratamiento para la base del

azufre prilado, en este caso seleccionan las variables: Fecha, Tipo, Destino, Apariencia, Humedad, Acidez, Carbono, Ceniza y Pureza. Para el caso del azufre prilado, el análisis de datos ausentes mostró que las variables seleccionadas no presentaron valores faltantes, por lo que no fue necesario presentar un diagrama similar al del azufre de Claus (Figura 7).



**Figura 8.** Eliminación de variables con datos ausentes.

#### D. Detección y tratamiento de datos atípicos.



**Figura 9.** Diagramas de caja y bigote del azufre de Claus.

La presencia de datos atípicos para cada una de las variables se puede visualizar en los histogramas del Data Profiling Report. Sin embargo, para que sean procesados en R y su eliminación posterior, se debe generar un objeto con la información en un diagrama de caja y bigote, como se muestra en la Figura 9. En este caso se realizó el análisis para el azufre de Claus, que, por su origen, no es común que presente valores muy desviados de sus parámetros y hay que tomar en cuenta que los valores atípicos pueden ser debidos a defectos en la medición. Se contaban con 1698 observaciones, de las cuales el programa identificó 358 como atípicas, lo que representó el 21.08% del total. Estos registros mostraron desviaciones extremas en relación con el comportamiento general de los datos, por lo que su exclusión se consideró adecuada y no compromete la validez del análisis. Después de la eliminación de datos atípicos, la base de datos del azufre de Claus queda con 1340 observaciones. En los diagramas de caja y bigote, la marca central representa la mediana de los datos, mientras que el tamaño de las cajas está definido por el rango intercuartílico (IQR), delimitado por el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil (Q3). Los valores extremos, o atípicos, se identifican como aquellos que se encuentran a más de 1.5 veces el IQR, por encima o por debajo de los cuartiles.

Se decidió realizar el mismo tratamiento para los datos del azufre prilado, con el cual se encontró que la pérdida de datos no fue significativa ya que, de 292 datos iniciales, con la eliminación de datos atípicos quedaron un total de 260 observaciones. Es posible que estos valores atípicos sean causados por errores en la calibración de los equipos de medición, fallas en el proceso de muestreo o variaciones en las condiciones ambientales durante el almacenamiento y transporte. Estos factores pueden introducir variaciones no controladas en los resultados, generando datos fuera de los parámetros esperados. Para minimizar este tipo de errores, se deben establecer procedimientos estrictos de calibración y verificación de los equipos, así como garantizar condiciones controladas en cada fase del proceso. Aun así, la eliminación de estos valores atípicos no afectó significativamente los resultados generales del análisis.

### E. Correlación de variables.

El Data Profiling Report incluye una representación gráfica con los valores de correlación entre cada una de las variables y como ya se realizaron las etapas anteriores del EDA es adecuado elaborar un nuevo reporte mediante los comandos:

I.DataExplorer::create\_report(claus\_b)

II.DataExplorer::create\_report(pril\_b)

Estos reportes contendrán:

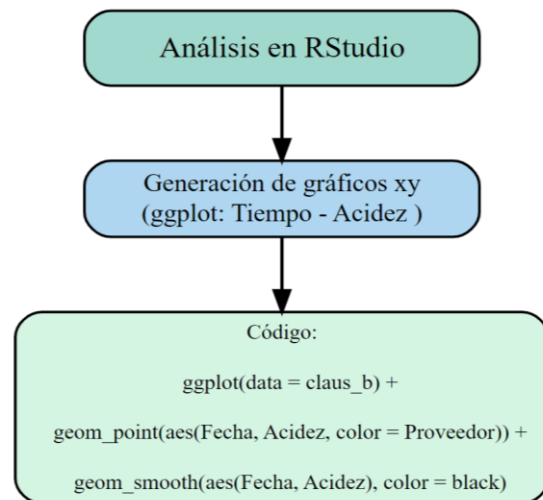
I. Histogramas de las variables analizadas: Son representaciones gráficas que muestran la distribución de varias variables, indicando la frecuencia con la que ocurren diferentes valores dentro de intervalos específicos.

II. Diagrama QQplot de las variables: Comparan la distribución de los datos de las variables estudiadas contra la distribución normal de datos.

III. Bar Chart: Es un gráfico estadístico que nos permite representar la distribución de frecuencias de variables cualitativas y cuantitativas discretas.

IV. Análisis de correlación de variables: Es un gráfico de una matriz, coloreando las regiones según el nivel de correlación entre las variables representadas.

Adicional al EDA, se realizan gráficos xy para comprender mejor el comportamiento de las variables utilizando la librería ggplot. La finalidad de estos gráficos es observar la tendencia de los valores de acidez con respecto al tiempo (Figura 10).



**Figura 10.** Obtención del diagrama del comportamiento de la acidez en el azufre.

### 3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados EDA de los parámetros medidos en el azufre de Claus y el azufre prilado usando Rstudio. Se estimaron los valores mínimos y máximos de cada una de las variables, los cuales reflejan el rango completo de las 1340 muestras de azufre de Claus y las 260 muestras de azufre prilado, mostrando la variabilidad extrema de cada una de las variables. Estos valores no deben confundirse

con los límites de especificación establecidos por los controles internos de calidad de la planta (límite inferior y límite superior), que determinan si los resultados cumplen o no con los parámetros permitidos. En el caso del azufre de Claus la pureza presenta la mayor parte de sus valores entre 99.96% y 99.99% de S, lo cual cumple con la especificación de

mínimo 99.93%. En el caso del carbono, sus valores rondan entre los 28 y 93 ppm, lo cual también cumple con la especificación de máximo 150 ppm. La presencia de cenizas, acidez, cloruros, humedad, arsénico, sodio y selenio también cumplen con la especificación (ver Tabla 1).

**Tabla 1.** Variables analizadas en el azufre de Claus (N=1340).

Especificaciones	Límite Inferior	Límite Superior	Unidades	Mín.	Cuartil 1	Mediana	Media	Cuartil 3	Máx.
Pureza	99.93	–	% S	99.900	99.960	99.980	99.970	99.990	100.000
Carbón	–	150	ppm C	1.550	28.710	52.700	66.240	93.300	246.730
Cenizas	–	115	ppm	1.267	15.964	31.929	43.932	59.903	176.047
Humedad	–	5	% H <sub>2</sub> O	0.001	0.017	0.026	0.029	0.038	0.083
Acidez	–	94	ppm H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.135	14.785	23.670	26.503	34.815	71.720
Cloruros	–	10	ppm Cl	0.624	2.030	3.257	4.040	5.683	10.475
Hierro	–	15	ppm Fe	1.200	6.420	13.430	25.350	27.220	249.200
Arsénico	–	0.3	ppm As	0.300	0.300	0.300	0.389	0.500	0.500
Sodio	–	2	ppm Na	0.500	0.500	1.160	1.633	2.000	14.000
Selenio	–	1	ppm Se	0.500	0.500	0.500	0.738	1.000	1.000
Calcio	–	–	ppm Ca	0.500	4.450	7.479	16.177	12.035	968.000
Aluminio	–	–	ppm Al	0.500	0.500	0.500	0.733	0.500	10.940
Potasio	–	–	ppm K	0.500	0.500	0.500	0.839	0.500	10.000

En las variables calcio, aluminio y potasio no se tiene una especificación establecida por norma. Sin embargo, se observó que, en el caso del calcio, aunque no hay un límite definido, su valor medio fue de 16.177 ppm y su máximo alcanzó los 968 ppm, lo cual representa una presencia considerable. Por su parte, el aluminio y el potasio presentaron valores bajos en promedio y mediana, lo que indica una concentración menor en el azufre de Claus. En cuanto al hierro, no se cumple con la especificación de máximo 15 ppm, ya

que la media fue de 25.350 ppm.

El azufre prilado presenta la mayor parte de sus valores de pureza en un rango entre 98.63% y 99.79%, además de que tiene por lo menos el 50% de sus valores fuera de la especificación. Esto se debe a que la mediana de pureza (99.32%) está por debajo del límite inferior de especificación (99.5%), lo que indica que más de la mitad de las muestras no cumple con el estándar mínimo, como se observa en la Tabla 2.

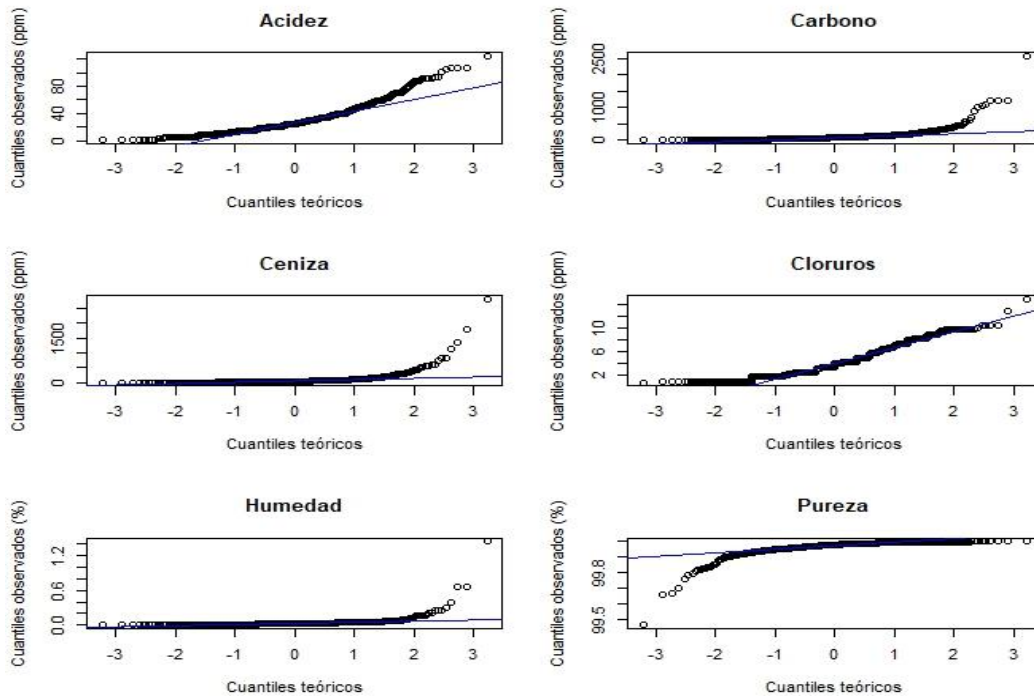
**Tabla 2.** Variables analizadas en el azufre prilado (N=260).

Especificaciones	Límite Inferior	Límite Superior	Unidades	Mín.	Cuartil 1	Mediana	Media	Cuartil 3	Máx.
Pureza	99.5	–	% S	97.050	98.630	99.32	99.1600	99.79	99.980
Carbón	–	250	ppm C	9.571	154.790	239.6	244.3690	325.30	621.458
Cenizas	–	500	ppm	7.976	97.465	171.43	205.4700	288.30	640.000
Humedad	–	3	% H <sub>2</sub> O	0.004	0.734	1.33	1.3926	2.02	3.897
Acidez	–	500	ppm H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10.000	627.400	1015.20	1121.9000	1526.50	3238.000
Cloruros	–	10	ppm Cl	0.796	1.592	2.00	2.6059	3.26	8.140
Hierro	–	15	ppm Fe	9.278	26.145	39.06	143.7280	73.79	9623.000
Arsénico	–	0.25	ppm As	0.300	0.300	0.30	0.3000	0.30	0.300
Sodio	–		ppm Na	1.000	1.000	1.46	42.2590	9.50	1315.000
Selenio	–	2	ppm Se	0.500	0.625	1.00	0.8684	1.00	1.000

El contenido de carbono sobrepasa el mínimo aceptable (250 ppm C) ya que sus valores están en un rango entre 154 y 325 ppm C. Las cenizas, los cloruros y la humedad se mantienen dentro de la especificación. La acidez presenta la mayor parte de sus valores en un rango de entre 627 y 1526 ppm, muy por encima del valor máximo permitido (500 ppm). Los valores del hierro también se encuentran fuera del máximo permitido. Esta situación es un punto relevante que se tendrá que revisar en otro trabajo, ya que el hierro es arrastrado hasta las camas del convertidor y puede afectar la eficiencia del catalizador que es utilizado en esta parte del proceso. En el caso del arsénico, sodio y selenio, no hay un requisito específico, pero están presentes en el azufre prilado. El calcio, aluminio y potasio no son monitoreados en el azufre prilado. Los datos presentados muestran distribuciones

asimétricas, con la mayoría de las variables presentando un sesgo positivo o negativo, por lo que ninguna de las variables sigue una distribución normal.

En la Figura 11 se presentan los diagramas QQplot de correlación de las variables estudiadas en el azufre de Claus y en la Figura 12 las del azufre prilado. En el caso del azufre de Claus, el carbón y la ceniza muestran un sesgo positivo, indicando mayor peso de datos en valores más pequeños. La acidez también presenta un sesgo positivo, pero con una mayor parte de los datos con una distribución normal. Respecto a los cloruros y la humedad, se presentan una mayor cantidad de datos distribuidos normalmente. Por otro lado, la pureza presenta un sesgo negativo con la mayor parte de los datos en valores más altos (Figura 11).



**Figura 11.** Diagrama QQplot de las variables analizadas en el azufre de Claus.

En el caso del azufre prilado (Figura 12), se observa mayor normalidad en la distribución de los datos de la acidez, el carbono y la humedad, con un ligero sesgo positivo. En el diagrama de las cenizas es más evidente el sesgo y el de la pureza presenta un sesgo negativo. Las gráficas QQplot permiten evaluar visualmente si los datos de una variable siguen una distribución normal. En ellas, el eje horizontal representa los cuantiles teóricos de una distribución normal, mientras que el eje vertical muestra los cuantiles observados en los datos. Si los puntos se alinean aproximadamente sobre una línea recta, se puede considerar que los datos se ajustan a la normalidad. Por el contrario,

desviaciones sistemáticas respecto a esta línea indican la presencia de sesgos o no normalidad en la distribución. Un sesgo positivo se identifica en los diagramas QQplot cuando los puntos en los extremos se desvían hacia arriba, indicando que hay una acumulación de valores mayores que la media en la cola derecha de la distribución. Esto implica que, aunque la mayoría de los datos están alrededor de la media o en valores más pequeños, hay algunos valores altos que afectan la forma de la distribución. Identificar estos sesgos es importante porque puede reflejar la presencia de condiciones atípicas o variaciones en el proceso que generan una mayor dispersión de los datos.

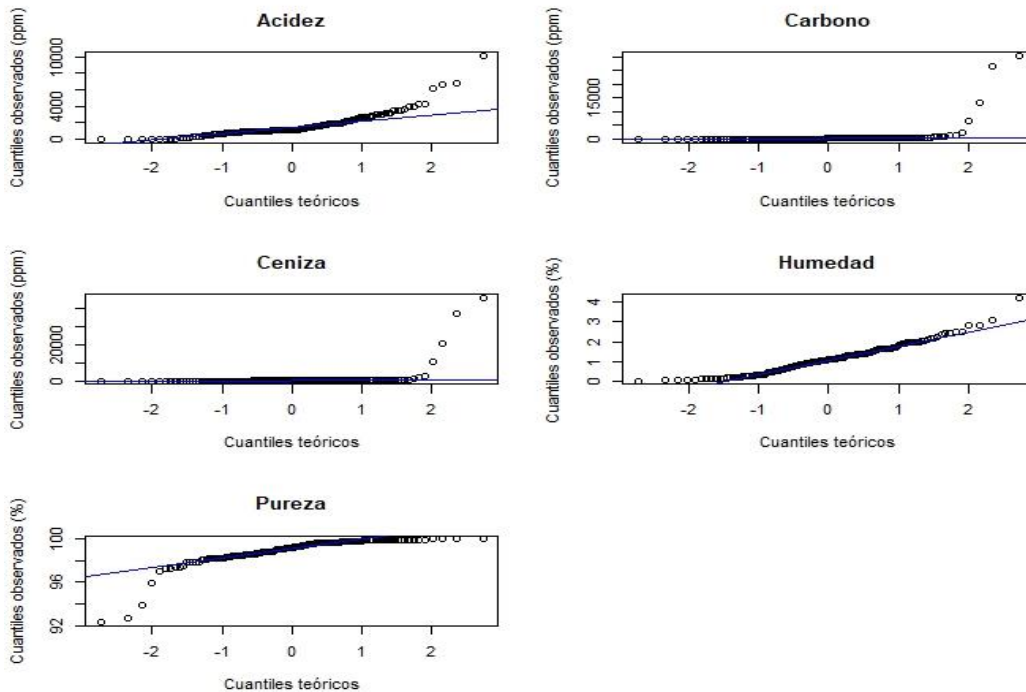


Figura 12. Diagrama QQplot de las variables analizadas en el azufre prilado.

Algunos puntos importantes para analizar son las variables tipo carácter (Destino, Tipo y Apariencia) en el caso del azufre prilado. En la Figura 13 se observa que las muestras de la base de datos en su mayoría son provenientes de la descarga de auto-tolvas de la planta fundidora.

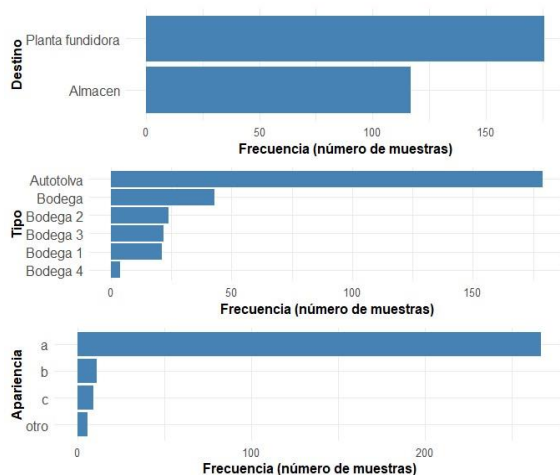


Figura 13. Bar Chart del azufre prilado.

La gráfica “Tipo” se refiere a si es de Auto-tolva o Bodega, pero también se toma en

cuenta el número de bodega. Los datos de “Bodega” (sin numeración) se refieren a aquellos de las que no se tiene información de la bodega de procedencia, o bien, a que son muestras compuestas entre las bodegas numeradas. El gráfico “Apariencia” como su nombre lo indica, está referido a la apariencia de la muestra de azufre observada por el analista al momento de realizar los análisis de laboratorio. Se observa que la mayoría de los datos presenta la apariencia del tipo “a” y pocos son los que presentan apariencia “b”, “c” y “otro”. La apariencia “a” es color amarillo característico sin partículas extrañas a la vista, la apariencia “b” es color amarillo característico con partículas metálicas a la vista y la apariencia “c” color amarillo característico con partículas extrañas de color blanco.

En cuanto al azufre de Claus, también se tiene un registro de la apariencia del azufre descargado. Sin embargo, no se presenta la gráfica de este análisis ya que en el 100% de los registros disponibles, el azufre presenta

una apariencia de tipo “a”. Cuando el azufre presenta una apariencia anormal, el operador de la descarga tiene instrucciones de no procesar el material, aunque esta situación ocurre de manera excepcional.

Otro punto importante es el análisis de correlación de variables. En la Figura 14, se presenta el diagrama de correlación del azufre de Claus, donde se observa que existe una correlación entre el contenido de ceniza y el de carbón en el azufre. Adicionalmente, hay una correlación inversa entre la pureza con los contenidos de carbón, ceniza y humedad. De lo anterior, para los análisis del azufre de Claus, se puede predecir que, al tener un alto contenido de carbón y humedad, la pureza será menor.

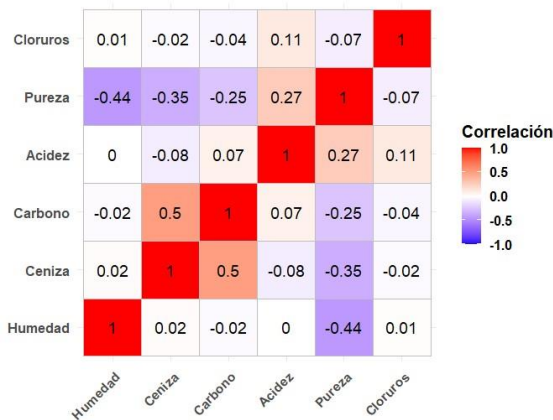


Figura 14. Análisis de correlación de variables en el azufre de Claus.

En la Figura 15, se presenta el análisis de las variables del azufre prilado. En este caso, también existe una correlación entre el contenido de carbón y el de ceniza en el azufre. Por otro lado, se observa que la acidez es más de 20 veces mayor que en el azufre de Claus, por lo que la pureza presenta una correlación inversa con la acidez y la humedad del azufre.

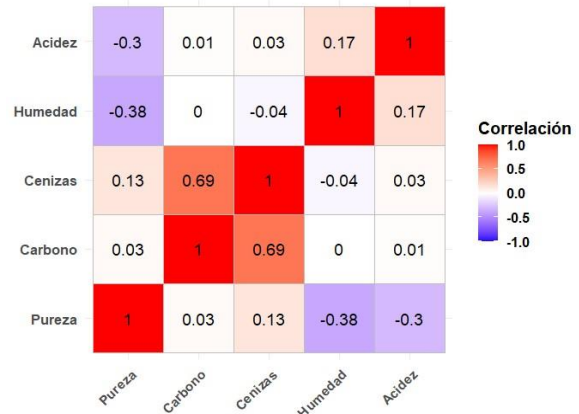


Figura 15. Análisis de correlación de variables en el azufre prilado.

Por otro lado, en la Figura 16 se observa que la tendencia de la acidez en el azufre de Claus disminuyó aproximadamente 20 ppm promedio en el tiempo analizado. El análisis de la gráfica sugiere que no existe una relación directa entre el proveedor y las fluctuaciones de los niveles de acidez, dado que todos los proveedores presentan una tendencia similar. Esto indica que las variaciones observadas en la acidez no están determinadas por el tipo de proveedor, sino que podrían estar relacionadas con otros factores inherentes al proceso de producción.

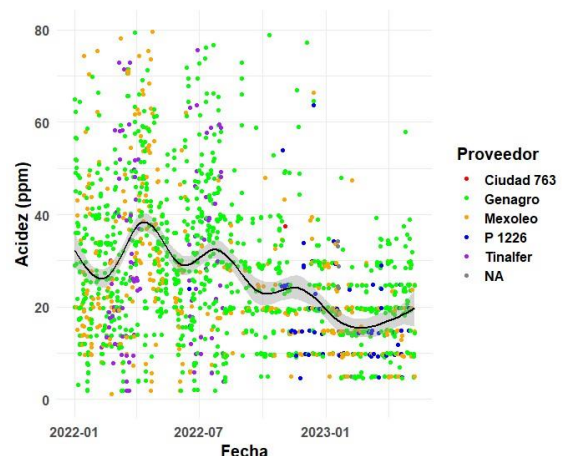
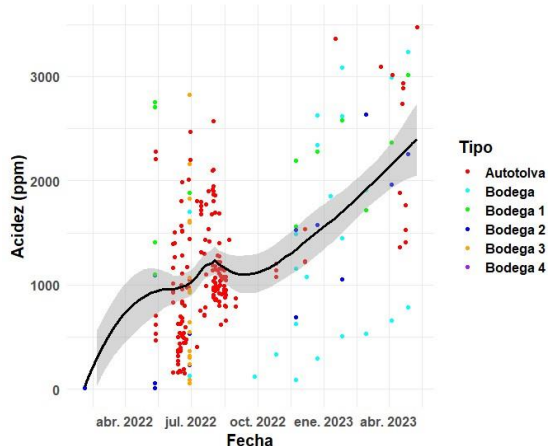


Figura 16. Línea de Tendencia de la acidez en el azufre de Claus respecto al tiempo.

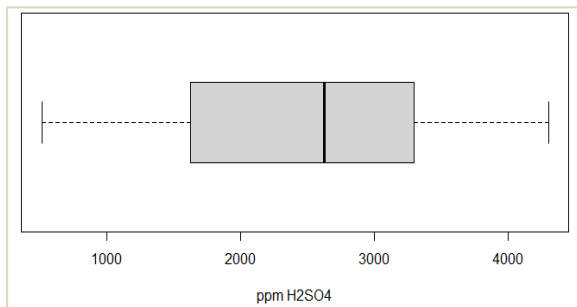
En relación a la acidez del azufre prilado es notable una clara tendencia de aumento

durante el tiempo analizado, desde valores por debajo de las 10 ppm correspondientes a las muestras tomadas de la descarga del barco hasta valores por arriba de 3000 ppm (Figura 17).



**Figura 17.** Línea de tendencia de la acidez en el azufre prilado respecto al tiempo.

Los valores de acidez se encuentran principalmente en un rango de entre 1669 y 3268 ppm de  $H_2SO_4$  y la mediana se encuentra en 2625 ppm (Figura 18). El valor mínimo encontrado en el año 2023 de 510 ppm supera el máximo marcado por la especificación de 500 ppm.



**Figura 18.** Diagrama de caja y bigote de acidez del azufre prilado en el año 2023.

Así, con los resultados del EDA realizados a los datos de azufre se determinó que es necesario hacer una propuesta de neutralización de la acidez del azufre prilado, debido a que en la mayor parte de los análisis se encuentran fuera de especificación, y que

es necesario contrarrestar los problemas antes mencionados en el proceso de fundición.

#### 4. Propuesta de neutralización de acidez.

El objetivo de la propuesta de neutralización es obtener azufre en los fundidores y equipos subsecuentes dentro de las especificaciones de acidez. Para ello es necesario realizar un monitoreo constante de los valores de acidez con los que llega el azufre prilado y realizar los ajustes necesarios en la neutralización. La media actual de la acidez del azufre prilado es de 2485 ppm y se debe disminuir a un máximo de 94 ppm de  $H_2SO_4$ . El compuesto que se utiliza para neutralizar es cal hidratada (cal) a un mínimo de 75% de acuerdo con la especificación del proveedor (Ávila et al., 2014). La cal se considera un material sin riesgo químico, no inflamable y no tóxico. Sin embargo, no es recomendable que la adición del neutralizante se realice de manera manual por lo que fue necesario contactar a un proveedor de dosificadores de materiales en polvo.

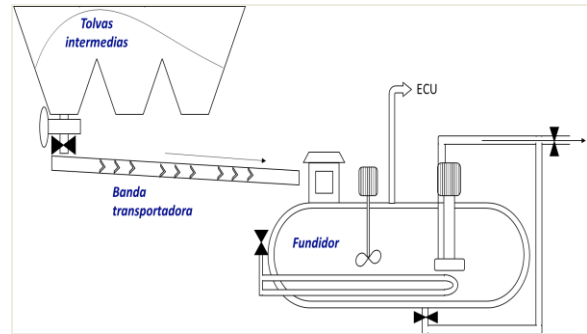
El ácido contenido en el azufre es especialmente corrosivo a altas temperaturas, por lo que es crucial ingresar el azufre junto con la cal en los fundidores para evitar daños a los equipos. Además, durante el proceso de fundición, el control de las emisiones de gases como  $SO_2$  y  $H_2S$  es regulado por la Unidad de Control Ambiental (Environmental Control Unit, ECU), la cual asegura que los niveles de gases emitidos se mantengan dentro de los límites establecidos (Figura 19).

Para cumplir con las condiciones de operación de la planta se consideró inicialmente instalar el dosificador en la banda principal, lo cual ofrecía la ventaja de transportar el azufre de manera uniforme y medible según la velocidad de la banda. Además, al utilizar una sola banda, solo se

requeriría un dosificador, lo que simplificaría el proceso. No obstante, esta alternativa fue descartada porque el azufre tendría que descargarse en las tolvas intermedias, lo que generaría un contacto sólido-sólido entre la cal y el azufre. Esto podría provocar que la cal se escurriera hacia la parte inferior de las tolvas, impidiendo que todo el azufre que ingresa al fundidor reciba la cantidad adecuada de cal para su neutralización.

También se evaluó la posibilidad de dosificar la cal en la caída de la banda central. Sin embargo, se observó que la distribución de la cal no sería homogénea hacia las tres tolvas intermedias, lo que podría generar un exceso de cal en algunos fundidores y deficiencia de neutralización en otros. Además, la acumulación de cal en la parte inferior de las tolvas podría obstruir la salida del azufre. Del mismo modo, dosificar la cal directamente en las tolvas intermedias presentaba los mismos inconvenientes, lo que llevó a descartar esta opción.

Finalmente, se consideró instalar el dosificador en las bandas intermedias ubicadas entre la plataforma de descarga y el fundidor (Figura 19). Esta opción resultó más viable, ya que la incorporación de la cal se realiza de forma adecuada, garantizando que el azufre se neutralice adecuadamente antes de ingresar al fundidor. Además, la instalación en estas bandas específicas evita la acumulación de cal en las tolvas intermedias, previniendo obstrucciones y deficiencias en la neutralización. Por lo tanto, se decidió colocar los dosificadores en las bandas intermedias, ya que esta configuración requiere menos potencia que un solo dosificador en la banda central y cumple con todas las condiciones necesarias para un proceso controlado.



**Figura 19.** Diagrama de fundición de azufre.

La reacción de neutralización con cal hidratada es la siguiente:



Se realizaron los cálculos sobre la cal necesaria para neutralizar el azufre, tomando como base las 2485 ppm de acidez (0.2485% peso) en 1 tonelada (TM) de azufre prilado, por lo que, de acuerdo con la Ecuación 1, se utilizaron 1.877 kg de cal por cada tonelada de azufre para ese valor de acidez. En este caso, se requieren 2.503 kg de cal al 75% por cada tonelada de azufre prilado. De la misma forma, para una acidez de 5000 ppm se necesitan 5.036 kg por cada tonelada.

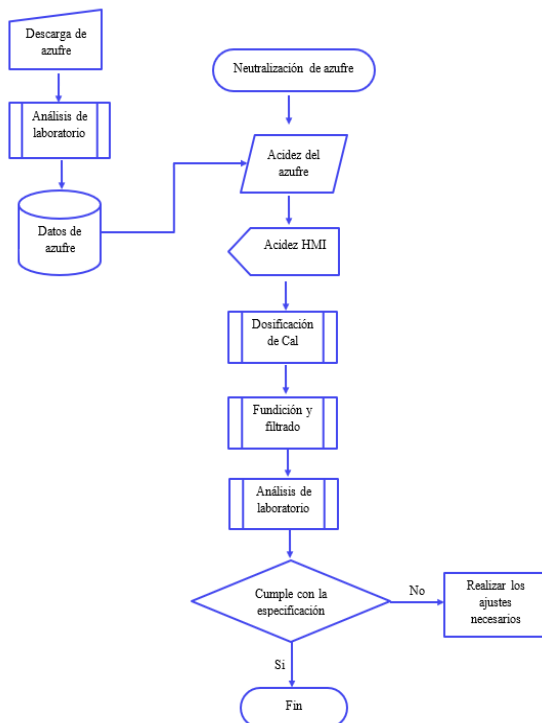
Para que la propuesta de neutralización funcione de manera adecuada se diseñó un esquema de trabajo de acuerdo con la Figura 20. En primera etapa, se requiere que en cada descarga de auto-tolva se tome una muestra de azufre. Se debe hacer por lo menos 2 análisis completos del azufre descargado al día y un análisis únicamente de la acidez, de modo que cada 3 meses se tendrán 180 datos de todos los parámetros medidos en el azufre y 270 de la acidez.

Los valores de los análisis realizados al azufre se registran en una base de datos. Para determinar el valor de la acidez que se requiere neutralizar se considerarán aquellos valores de acidez que no superen los 3 meses de antigüedad y tomando en cuenta que el comportamiento de la acidez no haya

cambiado bruscamente en ese periodo. De ser así, se deberán tomar datos con menor antigüedad.

El valor de acidez obtenido será ingresado en un HMI (interface hombre máquina) y se mantendrá en ese valor a menos que sea cambiado por el operador responsable. Con esa información, la lógica registrada en un PLC (controlador lógico programable) coordinará la dosificación de cal. El azufre con cal ingresará al fundidor en donde terminará de neutralizarse al fundirse y agitarse, para después pasar a la fase de filtrado y finalmente a la fosa receptora.

Se debe hacer por lo menos un análisis completo de azufre filtrado diario que incluya la acidez, de esta forma se monitoreará que el azufre fundido se encuentre dentro de la especificación.



**Figura 20.** Proceso de neutralización de azufre.

Neutralizar el azufre tendrá un impacto general en el proceso de fundición: al añadir cal serán mayores los residuos producidos por

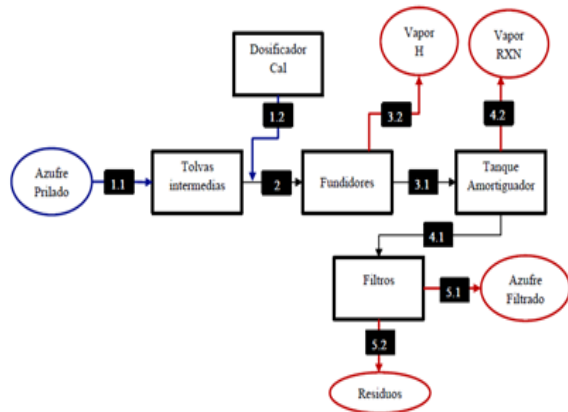
la filtración y será más frecuente la limpieza y regeneración de los filtros.

Para aprobar esta metodología se realizaron pruebas de fundición con dosificación de cal, con el objetivo de verificar la eficacia de la cal como neutralizante y el comportamiento de la filtración. Para estas pruebas, se dosificaron cantidades de cal directamente en la banda alimentadora del fundidor durante el traslado del material, simulando el dosificador de cal. Se realizaron un total de 9 pruebas de filtrado y se tomó una muestra de azufre en cada prueba. En la Tabla 3 se muestra el promedio del calculado en R de los componentes presentes en el azufre filtrado. Las impurezas presentes y la acidez cumplen con la especificación para usarse como materia prima en la planta de ácido sulfúrico. De las 2485 ppm de  $H_2SO_4$  promedio en el azufre prilado, el azufre filtrado quedó con 28.26 ppm promedio, lo que indica una neutralización del 98.86% de efectividad.

**Tabla 3.** Valores promedio del azufre filtrado (N =9).

Parámetro	Resultado
Carbón	48 ppm
Cenizas	46 ppm
Humedad	0.055%
Acidez	28.26 ppm

Con los resultados del azufre filtrado y el EDA del azufre prilado se realizó el respectivo balance de materia tomando como base una tonelada de azufre prilado. En la Figura 21 se muestra el diagrama del proceso de fundición, con las corrientes del balance de materia. Se tomó en cuenta la ubicación propuesta para el dosificador, por lo que la corriente de cal se ubicó en el trasiego de las tolvas intermedias y el fundidor.



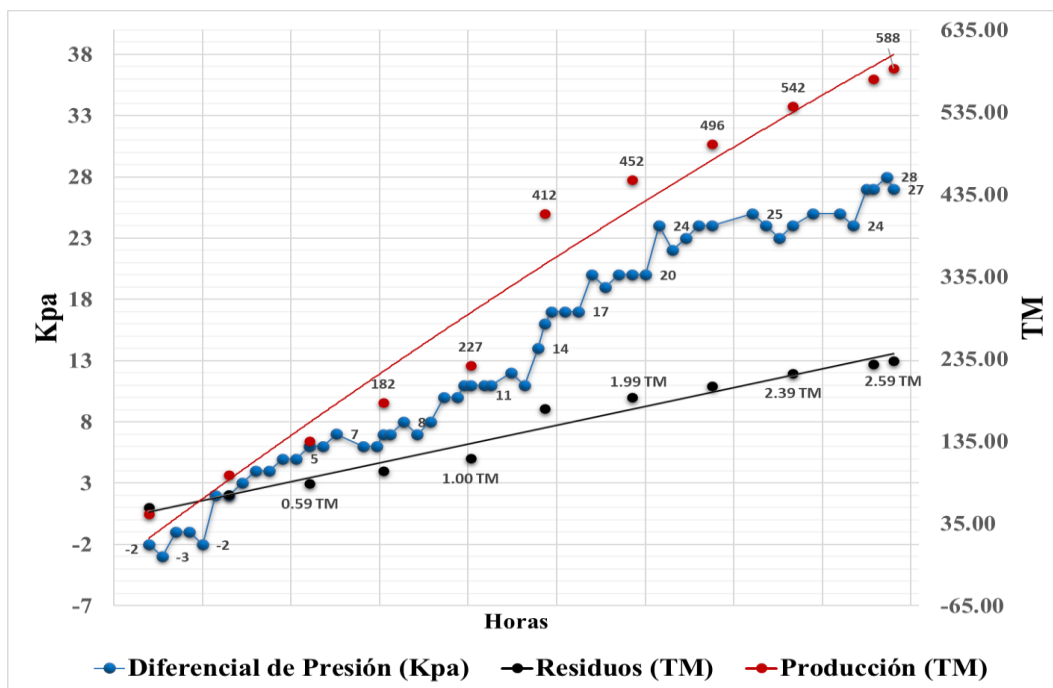
**Figura 21.** Diagrama de Proceso de la fundición de azufre con neutralización.

Del balance de materia realizado se obtiene la composición del azufre en cada una de las corrientes. Se determinó que por cada tonelada de azufre prilado y 2.5 kg de cal se obtienen 983.8 kg de azufre filtrado con una pureza del 99.932%, y que se desprenden 14.288 kg de agua en forma de vapor, el cual es producto de la humedad que contenía el azufre y el agua formada por la reacción de neutralización.

Se calcularon 4.414 kg de residuos por cada

TM procesada, los cuales tienen su mayor proporción en  $\text{CaSO}_4$  (77.36%) producido durante la neutralización y del residuo de la cal (14.17%). Por lo tanto, al aplicar la neutralización se incrementa considerablemente la producción de residuos y por tanto una reducción del tiempo de ciclo de los filtros. Dado que el incremento de los sólidos suspendidos es primordial en la operación de los agitadores y bombas, se debe garantizar que se efectúe un mezclado adecuado y que todos los sólidos sean captados en los filtros y no se acumulen en los tanques.

Finalmente, en la descripción de la operación de la planta de fundición de azufre, se conoce que el filtro trabaja hasta alcanzar una presión diferencial de 276 Kpa. En caso de llegar a este punto, sería necesario limpiarlo y regenerar la precapa. En la Figura 22, se presenta el gráfico de cómo se fue comportando la diferencial de presión en el filtro en relación con la producción y la cantidad de residuos acumulados, durante las pruebas realizadas.



**Figura 22.** Ensuciamiento filtros de hoja en el proceso de fundición de azufre.

Durante las pruebas se procesaron un total de 588 TM de azufre en un período de 2 semanas. Como se observa en el gráfico, la presión diferencial dentro del filtro fue incrementando, llegando a un valor máximo de 28 kPa, y se acumularon 2.59 TM de residuos más los 66 kg de ayuda filtrante. La capacidad máxima de producción es de 8 TM/hora por cada fundidor, lo que implica 576 TM diarias. Con la producción diaria a las condiciones actuales del azufre no se alcanza a tapar el filtro en un día, por lo tanto, el impacto de la neutralización sería perfectamente soportada por la capacidad de la planta.

## 5. Conclusiones

Este estudio ofrece una solución innovadora para el problema de acidez en el azufre prilado, mediante la implementación de un sistema de neutralización con hidróxido de calcio, a partir del análisis exploratorio de datos (EDA) con RStudio, con el que se obtuvo información clara y precisa de los parámetros clave del azufre, identificando desviaciones importantes en los niveles de acidez, carbono y cenizas.

Respecto al azufre de Claus, se concluyó que la mayoría de los parámetros se encuentran dentro de las especificaciones, a excepción del contenido de hierro, que podría generar taponamientos en las camas del convertidor de sulfúrico. En cuanto al azufre prilado, se detectaron niveles elevados de carbono y cenizas, pero principalmente un incremento continuo en el contenido de acidez, que supera los límites establecidos en más de 1000 ppm, lo que constituye un riesgo significativo en el proceso.

La implementación del sistema de neutralización basado en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  resultó ser altamente efectiva, logrando una neutralización del 98.86% del ácido sulfúrico presente en el azufre. A pesar de que este

proceso genera un aumento en los residuos de filtración, compuestos principalmente por sulfato de calcio y otras impurezas, el estudio demostró que la planta puede operar en toda su capacidad sin necesidad de paradas frecuentes para la limpieza de los filtros.

El uso de RStudio y las técnicas avanzadas de análisis de datos no solo facilitaron la identificación de problemas, sino que también sentaron las bases para el desarrollo de una solución escalable y reproducible. La metodología empleada puede ser replicable en otras plantas con desafíos similares, proporcionando una mejora significativa en la calidad del azufre producido y optimizando el proceso operativo.

Finalmente, se recomienda seguir monitoreando el comportamiento de la acidez en el azufre prilado, ajustando el proceso de neutralización según sea necesario, y mejorar las condiciones de almacenamiento y transporte para evitar que el producto final quede fuera de las especificaciones de calidad.

## 6. Referencias

- Aduviri, O. (2018). *Técnicas de prevención y control de la generación ácida en minería*. Revista de Medio Ambiente y Minería, (4), 24-31.
- Ávila, J. H., Rodríguez, E. S., Piñón, A. B., & Sáenz, E. C. (2014). Carbonato de calcio en México. Universidad autónoma del estado de Hidalgo – Conacyt – aactym (México). Universidad técnica de esmeraldas “Luis Vargas Torres” – facultad de ingenierías y tecnologías (ecuador). ISBN: 978-84-942118-6-7 DL: B-27133-2014 DOI: <http://dx.doi.org/oms.239>
- Bagnato, J. I. (2020). Aprende Machine Learning en español: teoría + práctica Python. Amazon Italia Logística.

Cruz-Ortiz, B. R., Díaz-Jiménez, L., Cortés-Hernández, D. A., & Múzquiz-Ramos, E. M. (2017). *Catalizadores de TiO<sub>2</sub> utilizados en procesos Claus: causas de desactivación y actividad catalítica*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(1), 229-236.

Eow, J. S. (2002). *Recovery of sulfur from sour acid gas: A review of the technology*. *Environmental Progress*, 21(3), 143-162. <https://doi.org/10.1002/ep.670210312>

Iglesias, G., Reyes, Y., & Manso, Y. (2024). *Asimilación y puesta en marcha de una planta industrial de ácido sulfúrico concentrado*. *Revista Científica Ciencias Ingenieriles*, 4(1), 24-29. <https://doi.org/10.54943/ricci.v4i1.379>

Katz, M. (2011). *Materiales y materias primas. Minerales de Hierro*, 9-25. Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Klein, C. & Hulburt, C.S. (2018) *Manual de Mineralogía*, 4ta. Edición, Reverte.

Londoño Beltrán, W. (2023). *Análisis y caracterización de causas de falla en tubería de serpentines de tanques tipo reactor para planta de aceites y grasas vegetales*. [Universidad Antonio Nariño] <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/9040>.

López Telenchana, L. S., Yanqui Avilés, M. V., & Quintana López, X. A. (2024). *Determinación de dependencia estadística de la temperatura de trabajo de rodamientos rígidos en procesos industriales mediante ANOVA en RStudio*. *ConcienciaDigital*, 7(1), 82-99. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i1.2904>

Marqués Sancho, J. M. (2009, June 25).

Unidad de recuperación de azufre (Proyecto/Treball Final de Carrera). UPC, Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú, Departament d'Expressió Gràfica a l'Enginyeria. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2099.1/8002>

Momoniati, F., & Rahmanian, N. (2022). *Characterization of sulphur particles: prills vs. granules*. *Particulate Science and Technology*, 40(4), 391-400. <https://doi.org/10.1080/02726351.2021.1942342>

Negro Cabrera, C., Abián Vicén, M., Anía, L., & Uxué, M. (2017). *Estudio de la oxidación de H<sub>2</sub>S para la minimización de contaminantes en el proceso Claus*. Escuela de Ingeniería y Arquitectura Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente.

Perales Vilar, F. A. (2015). *Impacto de la reactivación de la fábrica de ácido sulfúrico COSSMIL, en la producción del sector industrial*. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ciencias Económicas y Financieras, Carrera de Economía.

Quera Miró, M. (1994, February 11). *Modelo numérico de cálculo y simulación de torres de Prilling* (Tesi doctoral). UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Terrassa. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/93199>

Quispe, A.M. (2023). *Análisis estadístico con R*. UTEC Press. <https://hdl.handle.net/20.500.12815/317>

Rodríguez, K. O., Oviedo, B. J., & Fernández, E. A. (2024). *Introducción a la visualización de datos con ggplot2: Introduction to data visualization with ggplot2*. *Mathematics, Education and Internet Journal*, 24(2).

Santander Araya, C. (2014). Recuperación de ácido sulfúrico desde una solución de ácido débil de planta de ácido sulfúrico usando extracción por solventes (Tesis de postgrado, Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Química). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología.

[https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/130](https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/130322)

322