

**EFFECTO DE LAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS EN LA TURBIEDAD DEL
EFLUENTE DEL CLARIFICADOR DE LA PLANTA DE SERVICIOS
INDUSTRIALES DE LA UNIDAD DE BALANCE Y SU IMPACTO EN LA
REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA, ECOPETROL S.A.**

DAVID ALEXANDER PÉREZ ESPINOSA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2016**

**EFFECTO DE LAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS EN LA TURBIEDAD DEL
EFLUENTE DEL CLARIFICADOR DE LA PLANTA DE SERVICIOS
INDUSTRIALES DE LA UNIDAD DE BALANCE Y SU IMPACTO EN LA
REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA, ECOPELROL S.A.**

DAVID ALEXANDER PÉREZ ESPINOSA

**Trabajo de aplicación para optar por el título de
Magíster En Ingeniería Química
(Modalidad Profundización)
Convenio UIS - Ecopetrol S.A.**

**Director
Dr. JULIO ANDRÉS PEDRAZA AVELLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2016**

DEDICATORIA

Dedico al Dios Todopoderoso este triunfo, por escucharme, iluminarme y no desampararme en ningún instante.

Dedico este logro a mis padres, quienes me han dado las pautas y valores para vivir, quienes me han acompañado en cada uno de mis logros y descensos, y me han ayudado a buscar el gran sentido que tiene la vida.

A ellos he logrado edificarme, fortalecerme y ser un maestro; a reconocer los mundos interpretativos y despertar ese deseo de ayudar a otros, de servir para vivir y de estar siempre agradecido.

De igual manera dedico este triunfo a mi media naranja, Marianela, quien es mi luz y mi esmeralda, aunque debo reconocer que en realidad son tres mis amores: Marianela, María Angélica y María Salomé.

Por último, a mi hija María Angélica quien ha sido mi maestra, mi profesora y mi mentora, quien cada día me enseña sus ideas y planteamientos, los cuales me hacen reflexionar y replantear mis proyectos.

David Alexander

AGRADECIMIENTOS

Primero agradecer a Dios por la vida, por permitirme conocerlo y por todo lo que me ha brindado.

A George E. Davis, Arquímedes, Robert Boyle, Antoine Lavoisier, Frederic Wohler, Julius Robert Mayer, Herman Von Helmutz, Arthur Little, William H. Walker, Warren Lewis, Ernest Thiele, Ponchon, Savarit, Hougen, Watson, Dr Bird, Steward, Lighfoot, Fritz Haber, George Granger Brown, Robert E. Treybal, Walter L. Badger, Bancharo, Urlich, William E. T, Jhonson, Reklaitis, David Himmenblau, Richard Felder y otros que no he mencionado pero que han contribuido con su grano de arena y quienes han hecho cada vez más completa e interesante la ingeniería química.

A mi esposa Marianela y mis hijas por el tiempo que les quité durante mis estudios.

A mis padres, hermanos y amigos.

A mi director Julio Pedraza quien siempre estuvo ahí para acompañarme y pulir mi trabajo de investigación.

A mis maestros Dionisio Laverde, Luis Mariano Idarraga, Julio Pedraza, Geovanni Morales, Humberto Escalante, Fernando Viejo, Crisóstomo Barajas, Gustavo Ramírez, Arlex Chaves, Carlos Muvdi, Paola Maradei, Sonia Giraldo, Viviana Sánchez, Ramiro Martínez, Débora Nabarlatz, Luis Javier López y Fredy Avellaneda por enseñar con el más alto nivel de calidad y excelencia.

Al Dr. Marcos San Juan de la Universidad del Norte por compartir sus conocimientos en control de procesos y enseñarme que cada día se puede ser mejor.

Al Dr. David Fuentes y el Dr. Julián Jaramillo del Departamento de Ingeniería Mecánica UIS por sus enseñanzas en mecánica de fluidos, flujo bifásico y transferencia de calor.

A Ecopetrol por brindarme la oportunidad de estudiar.

A la Universidad Industrial de Santander por despertar ese gran interés por las Ciencias y la Investigación.

Al Ingeniero Orlando Díaz Montoya Gerente General de la Refinería de Barrancabermeja, a Ernesto Gómez Gerente de Producción, Ángela Corrales Líder de Excelencia Operacional, Edisson Campos Jefe de Departamento de

Refinación de Crudos y Jesús Joaquín Méndez por creer en mí, por hacer de Ecopetrol una mejor empresa y llevar a cabo este proyecto de Maestría.

A la firma de tratamientos químicos Clariant por el apoyo en la parte experimental. También agradezco a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la elaboración de éste trabajo; a los operadores y supervisores de plantas de aguas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2. OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GENERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. MARCO CONCEPTUAL	19
3.1.1 CML de suspensión hidráulica.	20
3.1.2 CML de suspensión mecánica.	22
3.2 PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA EN LA UNIDAD DE BALANCE	22
4. MARCO REFERENCIAL	22
5. DISEÑO METODOLÓGICO	25
5.1 VARIABLES DE ESTUDIO	28
5.2 MEDICIÓN DE LAS VARIABLES	28
5.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS EXPERIMENTALES EN EL PROYECTO	28
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
6.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	31
6.2 ESTADÍSTICA INFERENCIAL	40
6.2.1 Análisis exploratorio.	40
6.2.2 Ajuste del modelo,	45

6.2.3	Bondad del ajuste.	49
6.2.3.1	Error Estándar Residual (RSE).	49
6.2.3.2	Tabla de Anova.	49
6.2.3.3	Coeficiente de Determinación R^2	50
6.2.4	Diagnóstico del modelo.	50
6.2.4.1	Normalidad.	50
6.2.4.2	Homocedasticidad.	50
6.2.4.3	Incorrelación.	51
6.3	EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN	54
7.	CONCLUSIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA	59
	ANEXOS	62

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variables de estudio.	28
Tabla 2. Estadísticos descriptivos para la variable TURB_ENTRA.	31
Tabla 3. Estadísticos descriptivos para la variable HIERRO.	32
Tabla 4. Estadísticos descriptivos para la variable PH.	33
Tabla 5. Estadísticos descriptivos para la variable ALCALINIDAD.	33
Tabla 6. Estadísticos descriptivos para la variable COLOR.	34
Tabla 7. Estadísticos descriptivos para la variable Polímero.	36
Tabla 8. Estadísticos descriptivos para la variable LAGO.	37
Tabla 9. Estadísticos descriptivos para la variable TURB_SALE.	38
Tabla 10. Resumen de los estadísticos descriptivos de todas las Variables de estudio.	39
Tabla 11. Correlaciones parciales entre las variables.	42
Tabla 12. Variables iniciales en el Modelo de regresión.	45
Tabla 13. Resumen del Modelo 1.	46
Tabla 14. Resumen del Modelo 3.	47
Tabla 15. Estimación de los Intervalos de Confianza de Modelo 3.	49
Tabla 16. Resumen del Modelo 4.	53
Tabla 17. Comparativo de los estadísticos de error del Modelo 3 y el Modelo 4.	53
Tabla 18. Resumen de Valor Presente Neto.	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema del clarificador para el proceso del agua.	21
Figura 2. Secuencia gráfica del proceso de clarificación del agua.	23
Figura 3. Matriz de correlaciones y diagramas de dispersión entre las variables de estudio.	44
Figura 4. Diagramas de cajas de las variables independientes vs la variable dependiente categorizada en 4 niveles.	43
Figura 5. Variable respuesta vs variables predictores del Modelo 1.	48
Figura 6. Gráficas básicas de diagnóstico del Modelo 3.	51
Figura 7. Valor presente Neto	54

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A, Elaboración del procedimiento de puesta en servicio del Clarificador.	54

RESUMEN

TÍTULO:

EFFECTO DE LAS VARIABLES FISICOQUÍMICAS EN LA TURBIEDAD DEL EFLUENTE DEL CLARIFICADOR DE LA PLANTA DE SERVICIOS INDUSTRIALES DE LA UNIDAD DE BALANCE Y SU IMPACTO EN LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA, ECOPETROL S.A.

AUTOR:

David Alexander Pérez Espinosa **

PALABRAS CLAVES:

Turbiedad del agua
Clarificador
Variables fisicoquímicas
Regresión lineal multivariante

DESCRIPCIÓN:

La carencia de investigaciones en sistemas de clarificación en Colombia hace necesario realizar un estudio que contemple un análisis de las variables fisicoquímicas de entrada a los clarificadores con respecto a la turbiedad efluente en los clarificadores de manto de lodos superpulsadores con el fin de optimizar estos sistemas y conocer un modelo de predicción.

Esta investigación se obtiene con el análisis de regresión lineal múltiple donde se incluye el ajuste del modelo, bondad del ajuste, diagnóstico del modelo y evaluación de los modelos a través del estudio de ocho variables que correlacionan significativamente con la variable dependiente, turbiedad de salida, siendo esa relación positiva con el porcentaje de agua de lago, concentración de hierro, concentración de polímero, color del agua, turbiedad de entrada y mostrando coeficientes superiores a 0,5; en el caso de las variables alcalinidad y pH correlacionan de forma negativa exhibiendo coeficientes iguales o inferiores a -0.20. Sin embargo es de relevancia mencionar que también se consideraron 265 datos correspondientes a cuando la concentración del polímero es igual a cero y el modelo deja activas las mismas variables hierro, PH y turbulencia de entrada y el ajuste ($R^2= 0,940$).

Finalmente los hallazgos encontrados se resumen en la importancia de las variables: Hierro, pH y turbiedad de entrada para el proceso de clarificación las cuales son el eje central del proceso, por otra parte el análisis estadístico está considerando que se puede utilizar la unidad sin el uso de polímero, obteniendo turbiedades de salida entre 4-5 NTU; también sustenta que captando aguas entre 90 a 110 NTU se lograrían turbiedades de salida inferiores a 2 NTU y de igual manera se lograrían ahorros significativos para la empresa.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Maestría en Ingeniería Química. Dr. Julio Pedraza Avella.

ABSTRACT

TITLE:

EFFECT OF PHYSICOCHEMICAL VARIABLES IN EFFLUENT TURBIDITY THE CLARIFIER SERVICES INDUSTRIAL PLANT UNIT OF BALANCE AND ITS IMPACT ON BARRANCABERMEJA REFINERY, ECOPETROL SA *

AUTHOR:

David Alexander Pérez Espinosa **

KEY WORDS:

WATER TURBIDITY
CLARIFIER
PHYSICOCHEMICAL VARIABLES
MULTIVARIATE LINEAR REGRESSION

DESCRIPTION:

The lack of research in Colombia clarification systems necessary to conduct a study that includes an analysis of physicochemical input variables regarding clarifier effluent turbidity clarifiers superpulsadores sludge blanket in order to optimize these systems, and make a prediction model.

This research is obtained with multiple linear regression analysis where the model fit, goodness of fit, model diagnostics and evaluation of the models through the study of eight variables that significantly correlated with the dependent variable, turbidity output is included, It is this positive relationship with the percentage of lake water, iron concentration, polymer concentration, water color, turbidity and showing input coefficients greater than 0.5; in the case of alkalinity and pH variables negatively correlated exhibiting equal or lower than -0.20 coefficients. However, it is relevant to mention that data for 265 were also considered when the polymer concentration is zero and the model leaves the same variables active iron, PH and turbulence input and adjustment ($R^2 = 0.940$).

Finally the findings are summarized in the importance of variables: iron, pH and turbidity input to the process of clarifying which are the backbone of the process, otherwise the statistical analysis is given that you can use the unit without the using polymer, turbidity obtaining output 4-5 NTU; it also supports capturing waters between 90-110 NTU turbidity lower output would be achieved a 2 NTU and equally significant savings for the company would be achieved.

* Project of degree.

** Physicochemical Faculty of Engineering. Master of Chemical Engineering. Dr. Julio Pedraza Avella.

INTRODUCCIÓN

El agua industrial es un solvente de uso industrial y en las refinerías en términos de costos es la sustancia más viable a usar y por su capacidad calorífica hay mayor aprovechamiento de la energía con el agua. Por lo tanto es la sustancia número uno a usar en las industrias, en el caso de Ecopetrol las aguas captadas como son río y ciénaga las clarifica en clarificadores de manto de lodos superpulsadores y lo hace a través de clarificadores de manto de lodos los cuales manejan alto flujo y alta carga lo cual permite manejar un amplio rango en términos de sólidos en el agua.

Su uso en la industria y específicamente en las refinerías es para ser utilizada como agua de enfriamiento para equipos industriales, agua de enfriamiento para los sellos de los equipos, para producir agua potable y como agua de suministro a calderas.

Los clarificadores de manto de lodos son equipos con láminas inclinadas de 60 grados con el fin de estimular la autolimpieza de las placas o láminas inclinadas que permiten generar un manto de lodos y al cual están integrados los procesos de coagulación, floculación y decantación para realizar una operación sólido líquido.

Por ende la utilización de los clarificadores de manto de lodos es de vital importancia para obtener una mejor calidad del agua y a su vez garantizar una separación sólido líquido, alta remoción de turbiedad y de partículas que generan algún tipo de ensuciamiento a los equipos, afectando la transferencia de calor y generando más partículas en el sistema que se ven reflejados en los costos del proceso.

Por lo cual esta tesis se ha organizado en 6 capítulos cuyos contenidos se describen brevemente a continuación:

En el primer capítulo, *PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA*, se exponen las dificultades que se presentan con el agua utilizada en el proceso y las principales razones que motivaron la realización de este estudio

En el segundo capítulo, *OBJETIVOS*, se enuncia el objetivo general que se desea alcanzar con este estudio, así como los objetivos más específicos que se desprenden de él.

En el tercer capítulo, *MARCO CONCEPTUAL*, se realiza una síntesis de los aspectos más importantes sobre el desarrollo y funcionamiento de los clarificadores de manto de lodos en el que se combinan varios procesos en la unidad de tratamiento.

El cuarto capítulo, *MARCO REFERENCIAL*, contiene una revisión de algunos estudios a nivel nacional donde se analizan las variables químicas.

En el quinto capítulo, *DISEÑO METODOLÓGICO*, se describe el desarrollo de la investigación, la selección de las variables de estudio, las pruebas experimentales y mediciones de campo, las técnicas y procedimientos para la recolección de los datos y análisis de la información.

El sexto capítulo, *RESULTADOS Y DISCUSIÓN*, presenta los resultados de los análisis estadísticos descriptivos (univariantes y multivariantes) realizados a las variables de estudio, así como también, los resultados de los análisis de la estadística inferencial y la evaluación técnica económica generada por el proceso de clarificación.

En el séptimo capítulo, *CONCLUSIONES*, se precisan los resultados más importantes obtenidos en este estudio que puedan suscitar interés en la continuación de futuras investigaciones.

Finalmente se presentan las referencias citadas en el estudio.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Planta de Servicios Industriales de la Unidad de Balance de la Refinería de Barrancabermeja ECOPETROL S.A. (U2900) capta agua del Río Magdalena y la Ciénaga de San Silvestre y la clarifica para ser utilizada como agua de enfriamiento en la Unidad de Balance y como agua de sello en las bombas de toda la refinería.

Para llevar a cabo este procedimiento se utilizan tres clarificadores de manto de lodos Superpulsator (Degremont, Francia), en los cuales los procesos de mezcla, coagulación, floculación y sedimentación se realizan todos en la misma unidad.

Los Clarificadores de Manto de Lodos (CML) son sistemas de potabilización no convencionales que integran los principios básicos de la sedimentación en placas inclinadas, el manto de lodos y el contacto de sólidos para obtener la separación sólido-líquido con máxima eficiencia y bajo costo operacional. Son propicios por la economía, el alto desempeño que presentan y el poco espacio que requieren para su funcionamiento. Su primordial desventaja reside en el mayor control al que obliga la operación en comparación con un sistema convencional.

Uno de los problemas con la Unidad de Balance de la Refinería radica en que no se cuenta con análisis estadísticos de las variables del proceso que permitan conocer su comportamiento y ofrezcan información para tomar mejores decisiones. Por ende, se presentan cortocircuitos hidráulicos en los clarificadores generando altas desviaciones y violación a las ventanas de operación, en especial a la turbiedad del efluente, incrementando los costos del proceso del departamento en más de \$ 500.000'000.000 de pesos por año.

Por tal motivo es importante realizar esta tesis para observar y analizar el comportamiento de las variables fisicoquímicas, optimizar el proceso, garantizar calidad en el agua a entregar a los clientes y certificar que el proceso es sostenible en el tiempo.

Con el fin de aportar al conocimiento de estos sistemas, contribuir positivamente en la problemática de la unidad, lograr una operación efectiva y productiva, el presente estudio busca establecer el efecto de las variables fisicoquímicas en la turbiedad efluente del clarificador de la planta de servicios industriales de la unidad de balance y su impacto en la refinería de Barrancabermeja, Ecopetrol S.A.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es establecer el efecto de las variables fisicoquímicas en la estabilidad de la turbiedad efluente del clarificador de la planta de servicios industriales de la unidad de balance y su impacto en la refinería de Barrancabermeja, Ecopetrol S.A.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar estadísticamente el comportamiento de las variables del proceso y establecer el modelo que más se ajuste al sistema.
- Analizar la correlación entre la turbiedad de salida (variable dependiente) en función de las variables de entrada en el proceso (variables independientes), e identificar aquellas que más inciden sobre la turbiedad efluente del clarificador.
- Evaluar el impacto financiero que genera el proceso de la clarificación.

3. MARCO CONCEPTUAL

El agua es el recurso más abundante del planeta, debido a que ocupa las tres cuartas partes de su superficie. El agua existe en los tres estados de la materia, aunque comúnmente la conocemos en estado líquido. Por lo tanto, el agua es un importante recurso natural, que se encuentra en riesgo debido a la mala utilización y al aumento de la población mundial, que trae consigo una demanda exagerada. A continuación se hará una breve descripción de propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas de interés en este estudio.

- **Propiedades fisicoquímicas.**

Color: Es el resultado de presencia de elementos de origen vegetal como los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, turba, plancton y de ciertos metales como hierro, manganeso, cobre y cromo disueltos o en suspensión. El color es debido a compuestos orgánicos complejos resultantes de la degradación de la materia orgánica. El color es función del pH, aumenta con el aumento del pH del agua. La mayoría de coloides causantes del color son electronegativos y pueden removerse en un clarificador. Son más pequeños que los coloides de la turbiedad y por tanto requieren mayores dosis de cargas positivas para su precipitación. El color interfiere en la cloración debido a que produce alta demanda de cloro, interfiere con la coagulación de la turbiedad por formar complejos de hierro y aluminio y contribuye a la corrosividad del agua por ser nutriente de microorganismos. La determinación se realiza mediante la comparación del agua a analizar con soluciones de platino-cobalto de diferentes concentraciones. El color de estas soluciones se expresa por la concentración de platino en mg/l, 1mg/l pt = 1 unidad de color (UC).

Turbiedad: Es debida a la presencia de materia en suspensión y coloides de carga negativa en un estado finamente dividido que puede ser interpretado como una falta de nitidez o claridad del agua. Es una medida de la trasmisión de la luz a través de una muestra. El material suspendido generalmente es arcilla, aunque crecimientos de alga y materia orgánica también contribuyen a causar turbiedad en el agua. La turbiedad dificulta los procesos de desinfección, debido a que el biocida no actúa con todos los microorganismos, causa problemas operacionales, incrementa los costos del proceso de filtración y la apariencia no es estética. Para la determinación de la turbiedad se estableció un patrón:
1 mg SiO₂ (1ppm) = 1 unidad de turbiedad

Las unidades más usadas son:

JTU: Jackson Turbidity Units

NTU: Nephelometric Turbidity Units

pH: Es un factor muy importante para analizar la tendencia del agua a ser corrosiva e incrustante. Se define como el antilogaritmo de la concentración de

protones, es una propiedad que afecta las reacciones químicas y es un indicador de la acidez o basicidad de una sustancia. Por ende el pH se usa en el cálculo de carbonato, bicarbonato, dióxido de carbono, índice de estabilidad y juega un papel muy importante en los tratamientos químicos.

Alcalinidad: Es la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. Esta determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. Y algunas sales como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos. En la práctica estas especies no se determinan de forma individual y se titulan con fenolftaleína (P) y metil naranja (M) como indicadores del punto final de neutralización. La titulación al punto final P (pH=8.3) mide todos los hidróxidos más la mitad de los carbonatos. La titulación el punto final M (pH=4.3) mide la alcalinidad total carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. La alcalinidad total es importante en el agua cruda para la coagulación de los sólidos suspendidos cuando se utilizan sales metálicas (Sulfato de aluminio, cloruro férrico). Igualmente lo es en el agua tratada porque está relacionada con el carácter corrosivo o incrustante del agua.

Dureza: La dureza en el agua es causada por las sales de calcio y de magnesio. En las aguas crudas es la característica que más contribuye al contenido mineral del agua.

Otras impurezas o características también suelen ser magnesio, sulfatos, sílice, aluminio, gases como el dióxido de carbono, sólidos disueltos, etc.

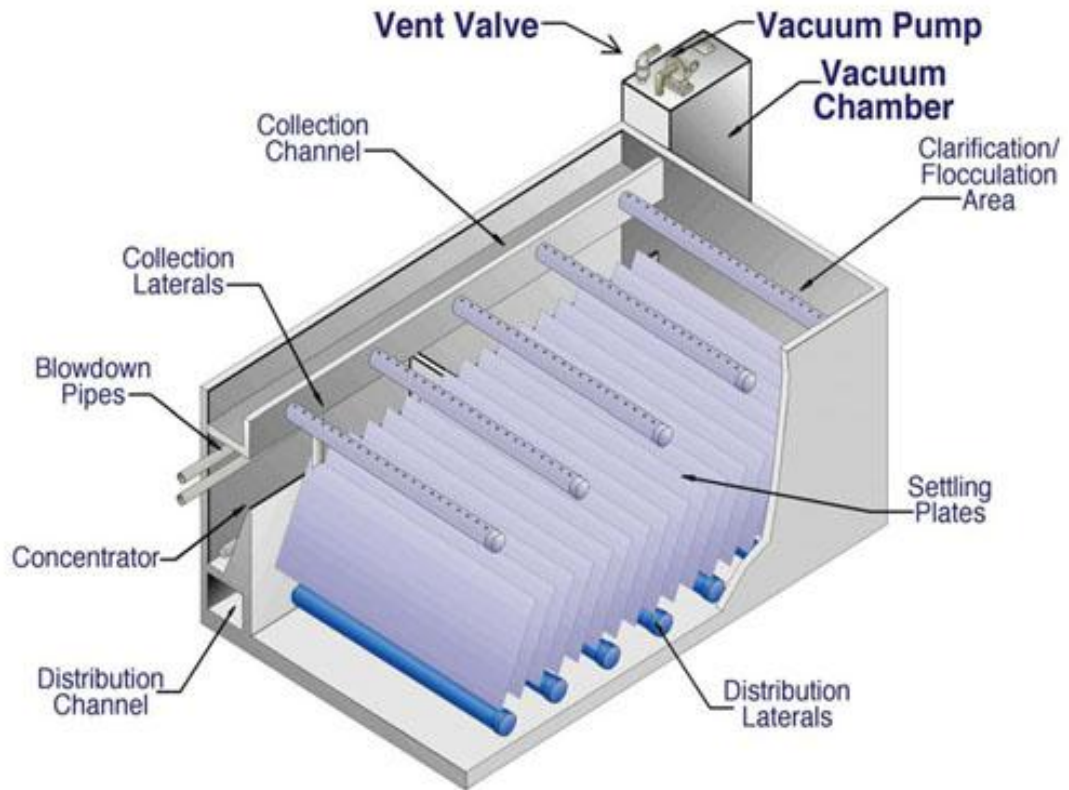
3.1 CLARIFICADORES DE MANTO DE LODOS

Desde 1869 Sillar y Wigner habían observado que el lodo recientemente coagulado al ser agregado a un agua turbia, tenía el poder de hacer precipitar las partículas en suspensión, y que este proceso podía “repetirse cinco o seis veces”.

La primera aplicación de este descubrimiento, cuya explicación racional se desconocía, fue hecha por Mueller-Nohnsen en 1880, en un tanque de sedimentación que construyó en Dortmund, en la zona del Rin, en Alemania. Este modelo de unidad, que vino a ser bastante usada, en especial en la industria del papel, y que nunca fue patentada, se conoció con el nombre de tanque Dortmund.

Este tipo de unidad fue de uso común en Europa hasta principios del siglo (1910). Desde el comienzo, los constructores se dieron cuenta que la recirculación de los lodos sedimentados, mejoraba el proceso de separación de sólidos y así aparecieron los primeros equipos patentados de esta clase, como el precipitador acelerado de Archbutt y Deeley (1892) y el acelerador por lodos de Declerq (1905), en los que los sedimentos del fondo eran succionados con bombas de vacío e inyectados de nuevo al agua que entraba.

Figura 7. Esquema del clarificador para el proceso del agua.



Fuente: Tomada de <http://sistemajpii.blogspot.com.co/2011/03/superpulsator-infilco-degremont.html>

En los clarificadores los procesos de mezcla, coagulación, floculación y sedimentación se realizan en la misma unidad. Estos sistemas combinan los principios de la sedimentación en placas inclinadas, el manto de lodos y el contacto de sólidos para la separación sólido-líquido, ofreciendo máxima eficiencia y un óptimo uso del espacio disponible a un costo mínimo de funcionamiento.

Los CML pueden clasificarse básicamente en dos tipos: los de manto de lodos de suspensión hidráulica y los de manto de lodos de suspensión mecánica.

3.1.1 CML de suspensión hidráulica. En los CML de suspensión hidráulica las partículas de lodo quedan suspendidas debido a la fuerza de arrastre del agua que asciende hasta la canal de salida. En el caso de las unidades con manto de lodos de suspensión hidráulica están:

- Clarificador con fondo cónico
- Sedimentador De Bacchus Marsh
- Sedimentador de Brno

3.1.2 CML de suspensión mecánica. En los CML de suspensión mecánica es el mismo sistema de agitación mecánica el que produce la turbulencia necesaria para mantener cierta proporción de sólidos en suspensión. En las unidades con manto de suspensión mecánica se encuentran:

- Pulsantes o de vacío (Pulsador Degremont)
- De separación dinámica (El Acclator Infilco)
- De agitación simple (Permutet)

3.2 PROCESO DE CLARIFICACIÓN DEL AGUA EN LA UNIDAD DE BALANCE

En el proceso de clarificación, el agua cruda (combinación de proporción variable río/ciénaga según la época del año), ingresa a la zona de mezcla rápida donde se le agrega el coagulante: sulfato de aluminio líquido tipo B (Sulfoquímica) y luego pasa a la zona de mezcla lenta donde se le adiciona un polímero aniónico como floculante: poliacrilamida (Clariant W9504).

Posteriormente, el agua pasa a una cámara cerrada (campana de vacío) de la cual se extrae aire por medio de una bomba (6.5 KW), ocasionando el aumento progresivo del nivel de agua hasta alcanzar una altura comprendida entre 0,6 m y 1,0 m por encima del nivel del agua en el decantador. En seguida se efectúa la apertura de la válvula, rompiendo el vacío y permitiendo que el agua ingrese por el fondo al decantador a través del tubo distribuidor a gran velocidad. Este tubo presenta una sección transversal de gran área con el fin de minimizar la pérdida de carga, y orificios en la parte inferior, a una distancia tal que permitan formar un manto de lodos homogéneos en la mitad inferior del decantador. Esta sección cuenta con una serie de placas inclinadas con el propósito de acelerar la decantación de las partículas en el manto de lodos.

Así mismo, con el objeto de homogeneizar el manto de lodos, éste permanece en movimiento alternativo vertical (expansión y contracción) garantizando una

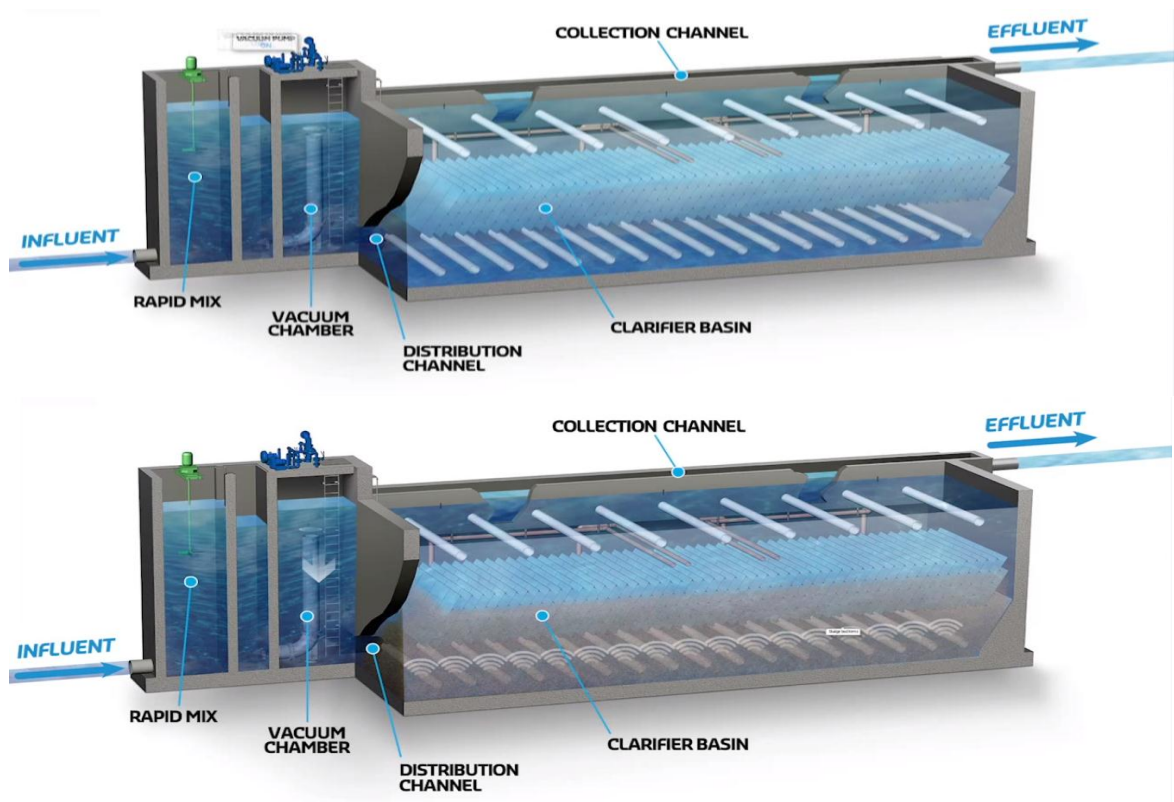
filtración real y remoción de impurezas desde la campana donde se genera el vacío. Por consiguiente, el manto alcanza una altura que coincide con el nivel del vertedero de los concentradores de lodos, eliminando el exceso de lodos por los vertederos por medio de válvulas de purgas que son accionadas de forma manual o automática renovando el lodo y garantizando un manto pulsante.

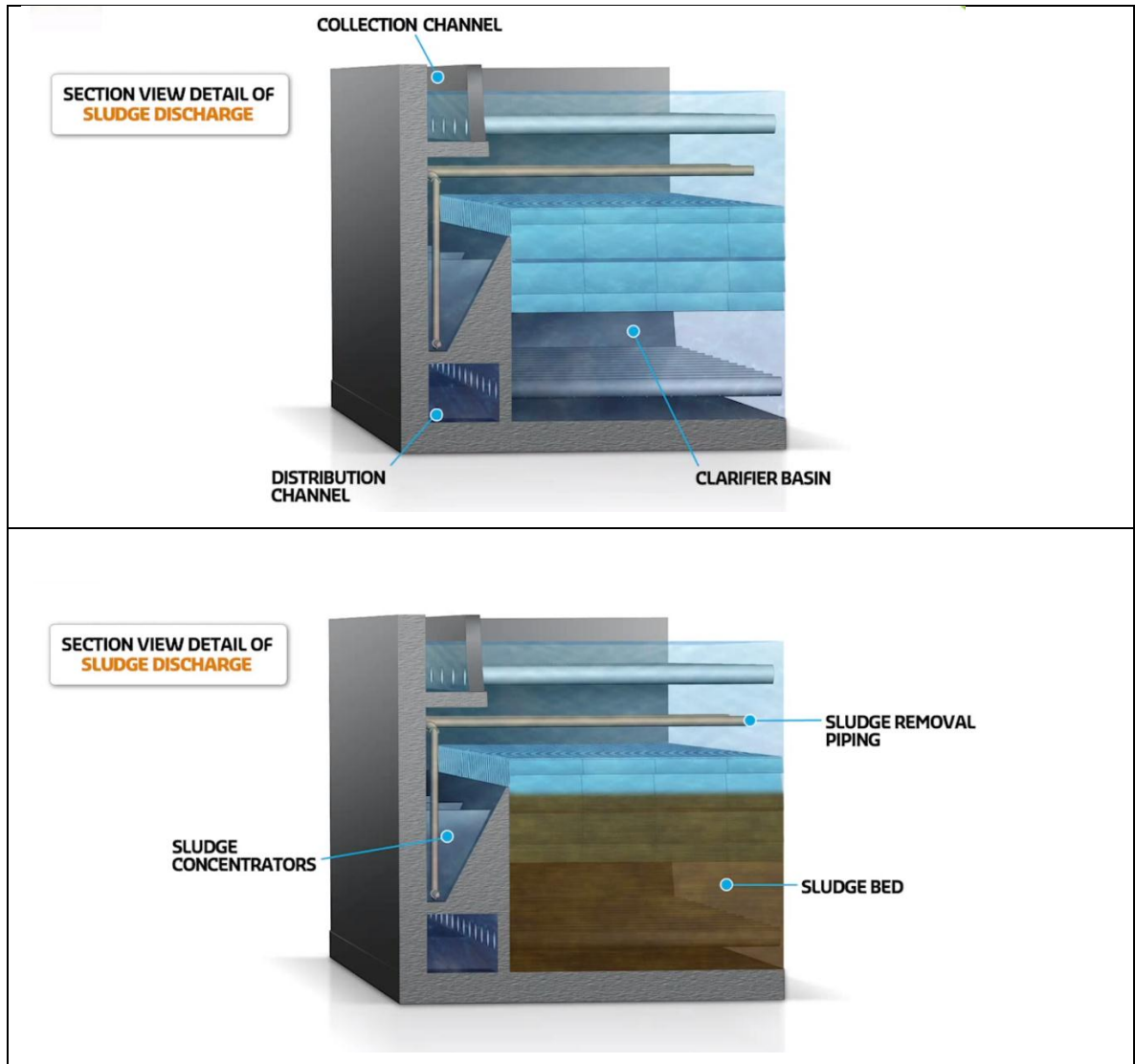
En consecuencia el agua clarificada y los sólidos remanentes (algunos finos) que no son retenidos por el manto de lodos, ascienden hasta los tubos colectores y luego se dirigen por medio de una canaleta a una piscina denominada *pozo claro*, desde donde el agua clarificada es succionada por una bomba para prestar los servicios que requiere la refinería.

Durante el trabajo las dificultades encontradas se genera inicialmente en la veracidad y verificación de los datos, segundo en correr en los software los modelos hasta obtener el modelo más preciso para la unidad y por último escoger la dosificación más eficiente y menos costosa para el proceso.

En la Figura 2 se puede ver una secuencia gráfica del proceso de clarificación tomada de: <https://www.youtube.com/watch?v=UNhygQov69Q>

Figura 8. Secuencia gráfica del proceso de clarificación del agua.





Fuente: SUPERPULSATOR Clarifier combines basic. Recuperado 03 de febrero de 2014.
Disponible en: achemical <http://datab.us/UNhygQov69Q#SUPERPULSATOR>

4. MARCO REFERENCIAL

A pesar de las ventajas que se ofrecen en el proceso de clarificación del agua, los clarificadores de manto de lodos han sido poco estudiados en Colombia, y por consiguiente, el conocimiento que se tiene de ellos es limitado. En la literatura se recogen algunos estudios de CML realizados en el exterior que se han enfocado a la modelación. A continuación se consideran algunas de estas investigaciones.

Head, Hart y Graham¹ presentaron un modelo matemático del proceso del CML a partir de resultados en clarificadores a escala real, utilizado para simular los efectos que tienen los cambios de las condiciones de funcionamiento en la concentración del manto de lodos y la calidad del agua tratada.

Pavón, Chávez y Garrido² realizaron en México un estudio para determinar el buen funcionamiento y las posibles modificaciones al diseño de un sistema piloto compacto, aplicable a pequeñas comunidades, compuesto por unidades de coagulación, floculación, decantación por manto de lodos, filtración y desinfección. Ocampo y Salazar³ trabajaron en la evaluación de la eficiencia y remoción de turbiedad, sólidos suspendidos, color real y absorbancia ultravioleta, en clarificadores de filtración gruesa ascendente en capas a escala piloto y en CML a escala real en la planta de tratamiento de agua potable de Puerto Mallarino, en Cali, Colombia; tratando el agua del Río Cauca con adición de sulfato de aluminio como coagulante.

Chen, Su y Lee⁴ Monitorearon los cambios en las concentraciones, potenciales zeta, tamaños y tiempos de succión capilar de los flóculos de sólidos en el agua de ocho clarificadores de manto de lodos de la compañía Pingsan de Taiwan Water Supply Company con agua cruda de baja turbiedad (<10 NTU) y de alta turbiedad (> 100 NTU). Para los primeros, se adoptó una etapa de tratamiento de coagulación-sedimentación que arrojó un manto bastante inestable. Completado el lavado era notable que la dosis de policloruro de aluminio era insuficiente. En el tratamiento de la alta turbiedad del agua cruda, por otro lado, se aprobó el proceso de tratamiento combinado, es decir, el agua cruda se coaguló y se estableció en

¹ HEAD, Richard, HART, Jem, y GRAHAM, Nigel. Simulating the effect of blanket characteristics on the floc blanket clarification process. En: Water Science and Technology. 1997. Vol 36, no. 4. p. 80.

² PAVÓN, T., CHÁVEZ, C., y GARRIDO, S. Planta potabilizadora para pequeñas comunidades. En: Memorias XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Perú: Lima (1998).

³ OCAMPO, Jesús, y SALAZAR, Martha. Comparación de la clarificación de agua en filtración gruesa ascendente en capas y en clarificadores de manto de lodos. Cali, 1999. Trabajo de Grado (Ingeniería Sanitaria). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería.

⁴ CHEN, L. C., SUNG, S. S., LIN, W. W., LEE, D. J., HUANG, C. JUANG, R. S., y CHANG, H. L. Observation of blanket characteristics full-scale floc blanket clarifiers. Water Science and Technology. 2002. Vol 47, no. 1. pp 197-204.

un tanque de pre-sedimentación primero, después, su efluente se coaguló nuevamente y se envió a los clarificadores. Los flóculos resultantes formaron un manto en red que se mantuvo relativamente estable a la carga de la turbiedad del agua cruda.

Su, Wu y Lee⁵ desarrollaron un modelo cimentado en una ecuación de onda unidimensional para simular las características dinámicas del manto de lodos en un lecho suspendido con flujo ascendente. Las predicciones del modelo fueron confirmadas mediante experimentos a escala de laboratorio, con agua cruda sintética coagulada con policloruro de aluminio en un lecho suspendido. El resultado de la investigación arrojó que un cambio del coagulante afecta el manto de lodos y el tiempo de respuesta del clarificador, las distribuciones de las partículas y la turbiedad.

Kovo⁶ implementó una ecuación modelo a través de un modelo matemático de predicción para la remoción de turbiedad en relación con la turbiedad, pH, temperatura y alcalinidad del agua, teniendo en cuenta el alto costo de los análisis químicos y la calidad del agua. El resultado luego de obtener dos modelos y hacer pruebas fue el modelo:

$T = T_0 (-1.36729 + 0.037101 * 10^{\wedge}pH + 0.048928 * \text{temperatura} + 0.00741387 * \text{alcalinidad})$
El cual presentó mejor predicción.

Sung, Lee y Huang⁷ (2005) investigaron los efectos de la turbiedad y la concentración de ácidos húmicos en el comportamiento del estado estacionario del manto de lodos, utilizando policloruro de aluminio (PACl) como coagulante. Y llegan a la conclusión de que la formación del manto es más efectivo con baja cantidad de ácidos húmicos con el fin de tener un manto de lodos estable para el clarificador.

Chen, Lee y Chou⁸ han realizado diversos estudios en los CML de Water Supply Company de Taiwán. En estas investigaciones han seguido la respuesta de los clarificadores a los diversos cambios de las condiciones del agua cruda y con diferentes escenarios de operación expresando que cuando se integra el proceso de coagulación-floculación se produce una mejor calidad de agua clarificada aun

⁵ SU, S. T., WU, R. M., y LEE, D. J. Blanket dynamics in upflow suspended bed. Water Research. Vol 38, no. 1. 2004, pp. 89-96.

⁶ Kovo, Modelling of Water Turbidity Parameters in a Water Treatment Plant, Chemical Engineering Department, Federal University of Technology, Minna, Nigeria (2005)

⁷ SUNG, S. S., LEE, D. J., y HUANG, C. Steady-state humic acid-containing blanket in upflow suspended bed. Water Research. 2005. Vol. 39, no. 51. pp 831-838.

⁸ CHEN, L. C., LEE, D. J. y CHOU, S. S. Change reversal effect on blanket in full-scale floc blanket clarifier. Journal of Environmental Engineering. 2006. Vol 132, no. 11. pp.1523-1526

trabajando a su máxima capacidad. Por otra parte que se prepara al operador en las industrias para que cuando se incrementa la turbiedad de agua cruda incrementa inmediatamente la dosis de polímero pero en algunos casos se evidenció que se incrementó mucho la dosis de polímero que produjo dispersión en lugar de ayudar a la coagulación generando inestabilidad en el manto de lodos; así mismo se evidencia en otras observaciones caídas bruscas de pH cambiando totalmente las características fisicoquímicas del manto y su inestabilidad e incremento de la turbiedad efluente.

Yang⁹ y sus colaboradores simularon el comportamiento hidrodinámico del flujo en tres CML diferentes, aplicando un modelo de flujo multifase en tres dimensiones.

Wills, Castro y Correa¹⁰ realizan una evaluación de un clarificador de manto de lodos en escala laboratorio a partir de un diseño de experimentos en el cual integraron las variables: turbiedad del agua cruda, la carga hidráulica, tipo de coagulante empleando dos tipos de coagulante: sulfato de aluminio y un polímero catiónico utilizando agua de baja turbiedad y de alta turbiedad.

Los resultados obtenidos permiten establecer que cuando el sistema se operó con agua tipo I y una carga hidráulica de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ se generó el manto de lodos de mejores características y la turbiedad en el efluente alcanzó valores por debajo de 2 ntu. Y recomiendan tener en cuenta otros factores no incluidos como son la variación de la dosis de coagulante aplicada, la purga del manto de lodos, el empleo de ayudantes de floculación; otras características fisicoquímicas del manto de lodos formado, distribución del tamaño de partícula tanto del agua cruda como del manto de lodos.

Montoya, Loaiza y Torres¹¹ investigan el efecto del incremento del agua cruda en la planta Mallarino sobre la eficiencia de procesos convencionales en la potabilización analizando la correlación entre la turbiedad del agua cruda y la dosificación de productos químicos. Encontrando que dicho fenómeno afectó la eficiencia del tratamiento y la calidad del agua tratada, siendo la filtración la etapa más vulnerable, además se identificó alta correlación lineal entre la turbiedad máxima del agua cruda y la dosificación de productos químicos utilizados en el tratamiento de agua (Coagulante y desinfectante).

⁹ YANG, W. J.; WANG, C. C.; HSU, R. Y. and WU, R. M. (2008). Two-phase flow simulation of reactor clarifiers. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, Vol. 39, No. 3 Mayo, p. 275-280.

¹⁰ WILLS, CASTRO Y CORREA. Evaluación de un clarificador de manto de lodos a escala de laboratorio. Revista EIA. Escuela de Ingeniería de Antioquía, Medellín (Colombia). No 14, p.53-65.

¹¹ MONTOYA, LOAIZA Y TORRES. Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. Revista EIA. Escuela de Ingeniería de Antioquía, Medellín (Colombia). No. 16, p 137-148.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 VARIABLES DE ESTUDIO

Para la selección de las variables de estudio se tuvieron en cuenta seis variables fisicoquímicas y las variables polímero_W70 y porcentaje de agua de lago (LAGO) que con su respectiva unidad de medida se presentan en la Tabla 1.

De todas la variables que maneja la unidad se escogen la turbiedad de entrada, el hierro, el pH, la alcalinidad, el color, la dosis de polímero y el porcentaje de flujo de lago porque son las variables más representativas, que engloban a las otras variables fisicoquímicas del agua y además son las que de una u otra manera producen cambios en el agua de salida.

Tabla 19. Variables de estudio.

VARIABLES DE ESTUDIO		UNIDAD DE MEDIDA
VARIABLES FISICOQUÍMICAS DE ENTRADA	TURB_ENTRA	----- (NTU)
	HIERRO	----- (PPM)
	pH	
	ALCALINIDAD	----- (PPM)
VARIABLES DE PROCESO	COLOR	----- Pt-Co
	POLÍMERO	Partes por millón (PPM)
	LAGO	Porcentaje (%)
VARIABLE DE RESPUESTA	TURB_SALE	----- (NTU)

5.2 MEDICIÓN DE LAS VARIABLES

Para la medición de variables se utilizó aproximadamente cuatro meses en la recolección de los datos, con equipos de laboratorio de Ecopetrol y la firma Clariant como son turbidímetro, espectrofotómetro, pHmetro, al igual que los reactivos de la firma Hach, de igual forma se contó con la participación del personal de la firma de tratamiento químicos Clariant donde se tomaron muestras aleatorias en diferentes turnos de trabajo y se llevó a un registro para luego consolidar, organizar y analizar la información.

5.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS EXPERIMENTALES EN EL PROYECTO

Los procedimientos utilizados para el análisis de datos se encuentran asociados a los objetivos planteados en esta investigación, así como a las escalas de medida en que han sido recogidos los datos.

En el proceso de recoger y tratar datos estadísticos, se pueden producir distintos tipos de errores, por eso, el primer paso en el análisis de los datos fue hacer una depuración de los mismos para poder identificar datos anómalos, existencia de duplicados o formatos incorrectos para evitar fallos en la ejecución de los programas y mejorar la calidad de la información recolectada.

Con la información obtenida sobre cada una de las variables de estudio se realizaron análisis descriptivos exploratorios: univariantes, utilizando las principales medidas de tendencia central y variabilidad, y multivariantes, para mirar la relación existente entre las distintas variables.

Como el interés de este estudio se centra en observar la posible relación entre la variable dependiente turbiedad de entrada (medida en forma métrica) y las demás variables independientes (medidas también en forma métrica), la técnica estadística apropiada fue la regresión múltiple. Este método de análisis es de gran valor cuando se desea conocer o predecir los cambios en la variable dependiente en respuesta a los cambios de las variables explicativas o independientes.

En el análisis se ajustaron modelos de Regresión Lineal Múltiple en los que se valoraron la significación de los coeficientes, la bondad del ajuste y la magnitud del error de estimación para evaluarlos y seleccionar el que ofreció mejores resultados.

La regresión estadística multivariable es un método bastante complejo que se utiliza cuando hay datos cuantitativos como en este caso y en el cual es un aproximación bastante cercana al proceso el cual se quiere representar para llevar a cabo ajustes que mejoren y optimicen la planta industrial.

A nivel un variante se presentan los principales estadísticos descriptivos: media, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación (CV), mínimo, máximo y rango, así como los histogramas de frecuencia y diagramas de cajas para las variables: Polímero, pH, Alcalinidad, Turb_Entra, Hierro, Color, Lago y Turb_Sale.

Dada la estructura del trabajo de investigación se usó la técnica estadística de Análisis de Regresión Múltiple que es un método bastante complejo y de gran aplicación cuando se está interesado en predecir o explicar la magnitud de una variable dependiente medida en forma cuantitativa que se supone está

relacionada con más variables independientes medidas también en forma cuantitativa.

Todo modelo de Regresión Lineal Múltiple tiene una variable respuesta (y) y dos o más variables explicativas (X_1, X_2, X_3, \dots)

La formulación del modelo en este caso sería la variable y en función de las variables X , que expresado matemáticamente:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_{p-1} X_{p-1} + \varepsilon$$

Las hipótesis del modelo son definidas sobre los errores: normalidad de la distribución de los residuos, homocedasticidad (varianza constante) e independencia.

El procedimiento de la regresión básicamente está determinado por cuatro pasos que son los que se desarrollan en este estudio: análisis exploratorio, ajuste del modelo, bondad del ajuste, diagnóstico del modelo.

Del análisis exploratorio se puede mencionar que es una herramienta muy útil, a nivel exploratorio, para obtener información de la relación entre dos variables cuantitativas es el diagrama de dispersión o de puntos que se construye representando en el plano cartesiano los valores de las variables medidas, éstos son a su vez, la expresión gráfica de los valores numéricos de las correlaciones estimadas.

Para tal fin, se presenta en la Figura 3 la matriz de correlaciones entre todas las combinaciones de las variables de estudio. Los valores por encima de la diagonal son correlaciones bivariantes, los gráficos de dispersión correspondientes se muestran por debajo de la diagonal y en la diagonal se expone la distribución de frecuencias de cada una de las variables que conforman la matriz.

Luego en el ajuste del modelo se busca ajustar un modelo estadístico que pretende explicar el nivel de Turbiedad del agua de salida del clarificador de la planta de servicios industriales en términos de 7 variables independientes.

El modelo teórico a estimar es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \varepsilon$$

Turb_Sale=Intercepto + Alcalinidad + Color + Hierro + Lago + PH + Polímero +
Turb_Entra

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis efectuados a los datos recogidos en esta investigación utilizando herramientas estadísticas.

Antes de abordar en forma la realización de los análisis estadísticos que permitirán desarrollar los objetivos planteados en este estudio, se llevó a cabo un análisis previo y exploratorio de los datos con el propósito de detectar errores en la digitación de la información, eliminar inconsistencias observadas, evaluar la magnitud de datos ausentes y la presencia de valores atípicos. Esta revisión permitió eliminar el 10% de los datos que exhibían algunas de estas características, quedando conformada finalmente la base de datos de estudio por 8 variables y 351 observaciones.

Para la exposición de los resultados alcanzados, inicialmente se ofrecen los análisis de la estadística descriptiva de las variables y de la estadística inferencial con el procedimiento de Regresión Lineal Múltiple (RLM) efectuado sobre las variables. Posteriormente la evaluación técnica económica el proceso de clarificación.

La base de datos obtenida fue registrada con el software Microsoft® Excel 2010. Los procedimientos estadísticos se computaron con los software estadísticos Statistical Package for the Social Sciences® (SPSS 23.0), STATGRAPHICS Centurion y Software estadístico R.

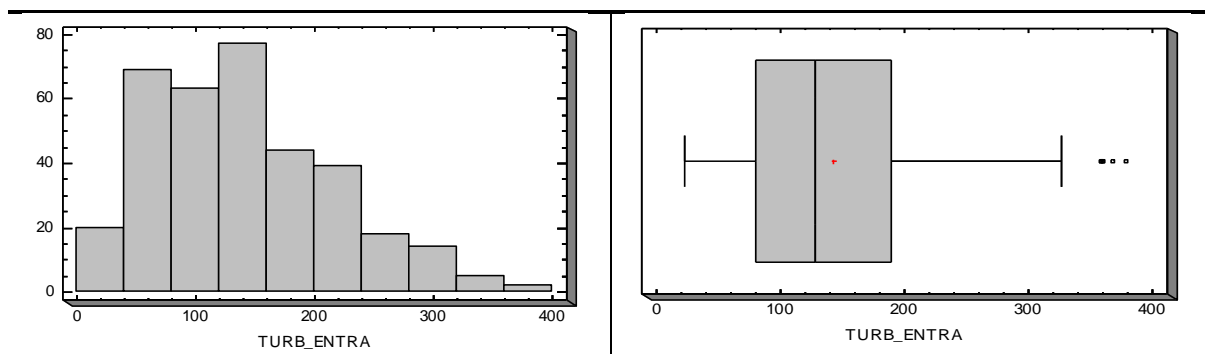
6.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

- **Variable.** TURBIEDAD DE ENTRADA

La Tabla 5 presenta en la parte superior los principales estadísticos descriptivos de centralidad y variabilidad para la variable turbiedad_entrada y en la parte inferior, los diagramas de frecuencias y diagramas de cajas correspondientes.

Tabla 20. Estadísticos descriptivos para la variable TURB_ENTRA.

Estadístico	Valor
Media	142,023
Mediana	128,0
Desviación Estándar	77,11
Coefficiente de Variación (CV)	54,3%
Mínimo	22,0
Máximo	378,0
Rango	356,0



La variable turbiedad presenta una media de 142,02 NTU con desviación estándar de 77,1 NTU. El 50% de los datos son mayores o iguales a 128 NTU (Me=128). Esta variable muestra un amplio rango de dispersión, el valor mínimo que toma es 22 y el máximo 378.

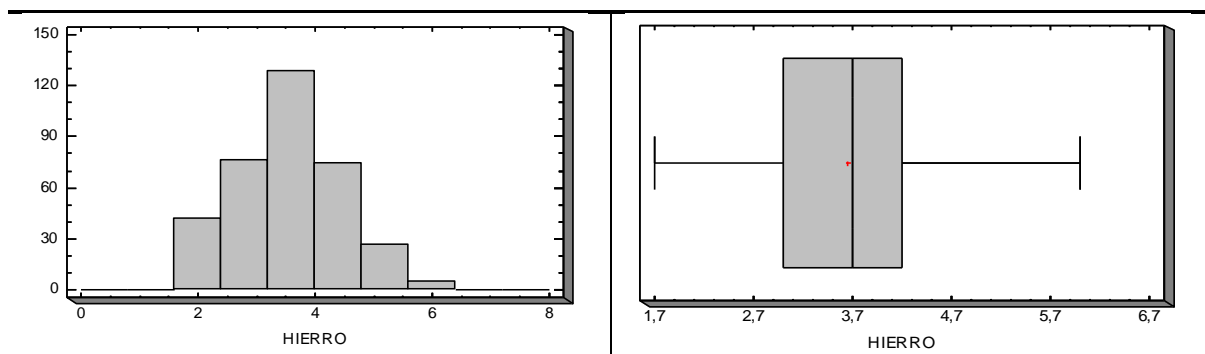
En los diagramas de frecuencias y cajas se advierte una distribución asimétrica a la derecha con la mitad de los datos concentrados entre 80 y 188 NTU. El CV=52,3% indica una relativa alta heterogeneidad en la variabilidad de los datos.

- **Variable. HIERRO**

En la Tabla 6 se puede observar en la parte superior los principales estadísticos descriptivos de centralidad y variabilidad para la variable Hierro y en la parte inferior, los diagramas de frecuencias y diagramas de cajas correspondientes.

Tabla 21. Estadísticos descriptivos para la variable HIERRO.

Estadístico	Valor
Media	3,64
Mediana	3,7
Desviación Estándar	0,91
Coefficiente de Variación (CV)	24,9%
Mínimo	1,7
Máximo	6,0
Rango	4,3



La variable Hierro tiene un valor medio de 3,64 con desviación estándar de 0,91, el valor de la mediana igual a 3,7 indica que la mitad de los datos están por encima de este valor. La variable toma valores entre un mínimo de 1,7 y máximo de 6,0.

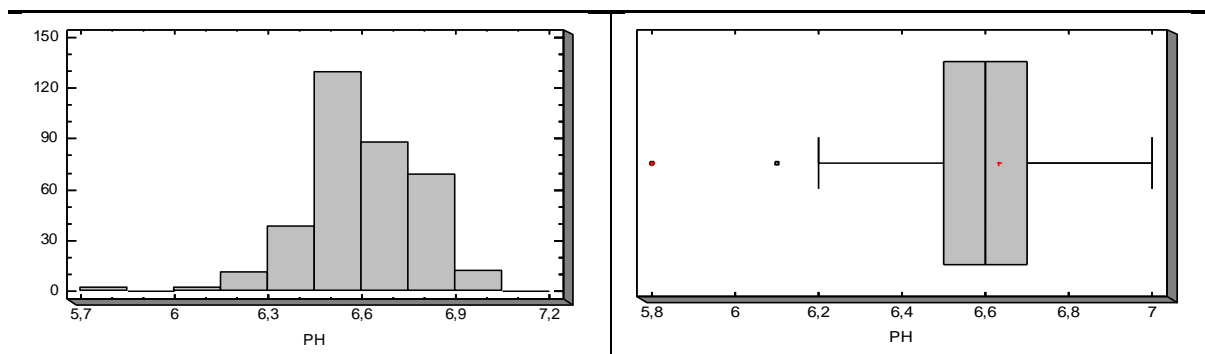
Los diagramas de frecuencias y cajas de la parte inferior muestran una distribución simétrica con el 50% de los datos concentrados entre 3,0 y 4,2. El CV=24,9% refleja una moderada heterogeneidad en la variabilidad de los datos.

- **Variable. PH**

La Tabla 3 expone en la parte superior los principales estadísticos descriptivos de tendencia central y de variabilidad, y en la parte inferior, los correspondientes diagramas de frecuencias y diagramas de cajas para la variable PH.

Tabla 22. Estadísticos descriptivos para la variable PH.

Estadístico	Valor
Media	6,63
Mediana	6,6
Desviación Estándar	0,183
Coefficiente de Variación (CV)	2,7%
Mínimo	5,8
Máximo	7,0
Rango	1,2



El valor medio de la variable PH es igual a 6,63 con desviación de 0,18, el 50% de los datos son superiores a 6,6. Con referencia a las medidas de dispersión, el valor mínimo que toma la variable es 5,8 y el máximo es 7,0, siendo el CV=2,7% reflejando una alta homogeneidad en la variabilidad de los datos.

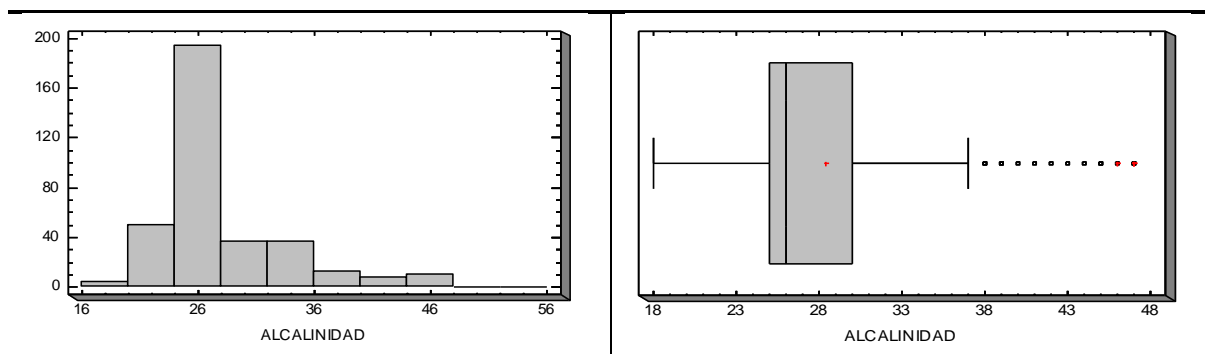
El diagrama de frecuencias y el diagrama de cajas de la parte inferior de la Tabla 2 permiten observar una distribución asimétrica a la izquierda, con una concentración del 50% de los datos entre 6,5 y 6,7.

- **Variable. ALCALINIDAD**

La Tabla 4 da cuenta en la parte superior, de los principales estadísticos descriptivos de centralidad y variabilidad para la variable alcalinidad y en la parte inferior, de los correspondientes diagramas de frecuencias y diagramas de caja.

Tabla 23. Estadísticos descriptivos para la variable ALCALINIDAD.

Estadístico	Valor
Media	28,387
Mediana	26,0
Desviación Estándar	5,361
Coefficiente de Variación (CV)	18,8%
Mínimo	18,0
Máximo	47,0
Rango	29,0



Para la variable alcalinidad el valor medio es 28,387 ppm con desviación de 5,36 ppm, la mediana igual a 26,0 refleja que el 50% de los datos están por encima de este valor. El valor mínimo que toma la variable es 18,0 y el máximo 47,0 ppm.

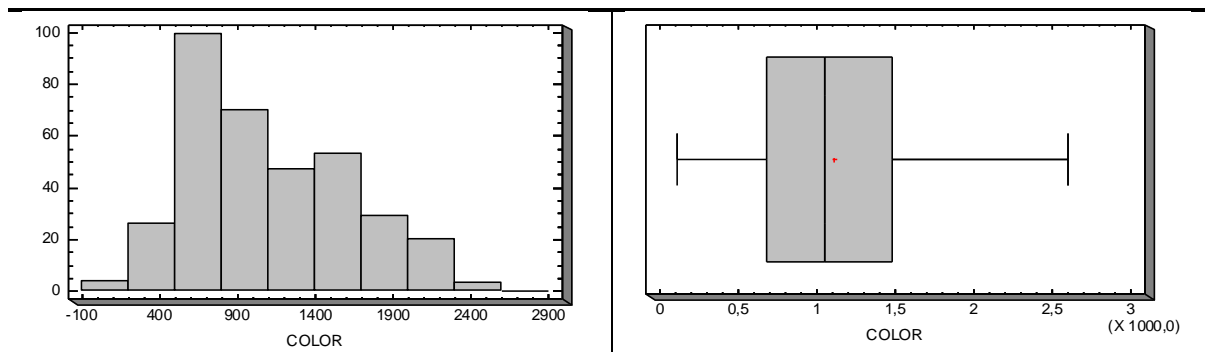
Los diagramas de la parte inferior de la Tabla 3 muestran una distribución asimétrica a la derecha, con el 50% de los datos concentrados entre 25,0 y 30,0 ppm, para un rango intercuantil igual a 5. El CV=18,3% indica una moderada heterogeneidad en la variabilidad de los datos.

- **Variable. COLOR**

En la Tabla 7 se presenta en la parte superior los principales estadísticos descriptivos de centralidad y variabilidad para la variable Color y en la parte inferior, los diagramas de frecuencias y diagramas de cajas correspondientes para la distribución de esta variable.

Tabla 24. Estadísticos descriptivos para la variable COLOR.

Estadístico	Valor
Media	1110,79
Mediana	1050,0
Desviación Estándar	521,465
Coefficiente de Variación (CV)	46,9%
Mínimo	113,0
Máximo	2600,0
Rango	2487,0



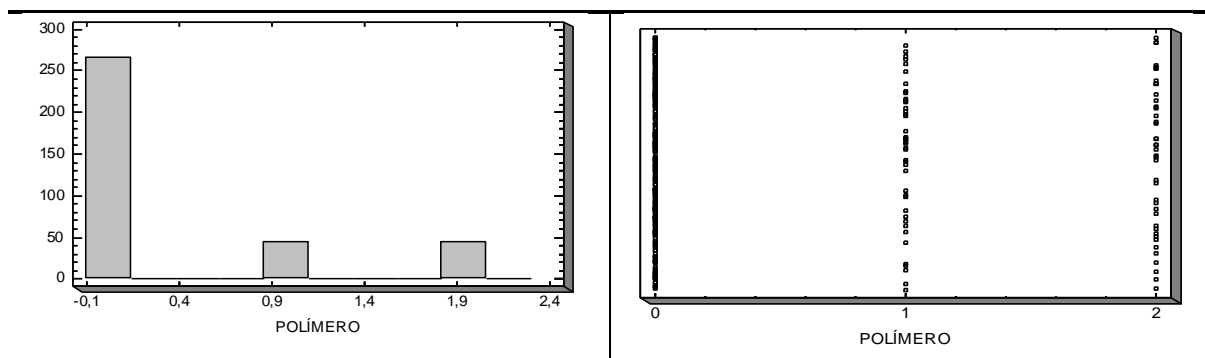
La media de la variable color es 1110,8 con desviación de 521,5 y la mediana es 1050, lo que indica que el 50% de los datos están por encima de este valor. La distribución de los datos muestra asimetría a la derecha, con un mínimo=113 y un máximo= 2600. La mitad de los datos están concentrados entre 680 y 1483 (Q1 y Q3 respectivamente). El CV=47% advierte de una alta heterogeneidad en la variabilidad de los datos.

- **Variable. POLÍMERO**

La Tabla 2 presenta en la parte superior las principales medidas descriptivas de centralidad y variabilidad; en la parte inferior, los correspondientes diagramas de frecuencias y diagramas de cajas para la variable Polímero W_70.

Tabla 25. Estadísticos descriptivos para la variable Polímero.

Estadístico	Valor
Media	0,367
Mediana	0,0
Desviación Estándar	0,691
Coefficiente de Variación (CV)	188%
Mínimo	0,0
Máximo	2,0
Rango	2,0



Se puede observar que la media de la variable polímero W_70 es de 0,367 ppm con desviación de 0,69 ppm, el 50% de los datos son mayores de cero, la variable toma valores entre un mínimo de 0 y un máximo de 2. El Coeficiente de variabilidad CV^{12} igual a 188% indica una muy alta heterogeneidad en la variabilidad de los datos. Los diagramas de barras a la izquierda, y el de puntos a la izquierda, señalan 0 como el valor de mayor frecuencia y 2 como el de menor.

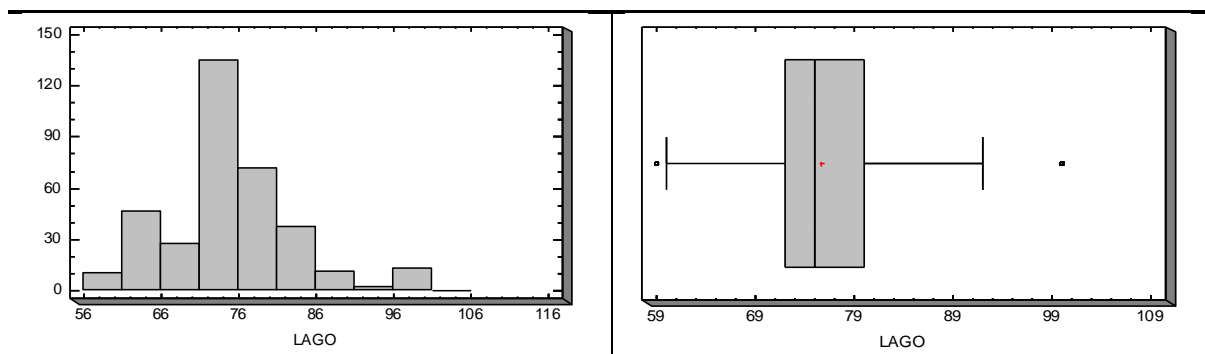
- **Variable. %_LAGO**

La Tabla 8 da cuenta en la parte superior de los principales estadísticos descriptivos de centralidad y variabilidad para la variable Lago y en la parte inferior de los diagramas de frecuencias y diagramas de cajas correspondientes para la distribución de esta variable.

Tabla 26. Estadísticos descriptivos para la variable LAGO.

Estadístico	Valor
Media	75,6
Mediana	75,0
Desviación Estándar	8,23
Coeficiente de Variación (CV)	10,9%
Mínimo	59,0
Máximo	100,0
Rango	41,0

¹² El $CV = \text{desviación estándar} / \text{media} * 100\%$ es una medida de dispersión relativa y se utiliza para calcular el nivel de desviación de una serie de datos respecto a su valor medio. Indica el grado de homogeneidad o heterogeneidad de los mismos. Un valor pequeño indica mayor homogeneidad y un valor grande, mayor heterogeneidad.



La variable Lago oscila entre un mínimo del 59% y un máximo de 100% de proporción de agua de lago en la mezcla de entrada. El promedio de agua de lago en la mezcla de entrada es 75,6% con desviación de 8,41 %.

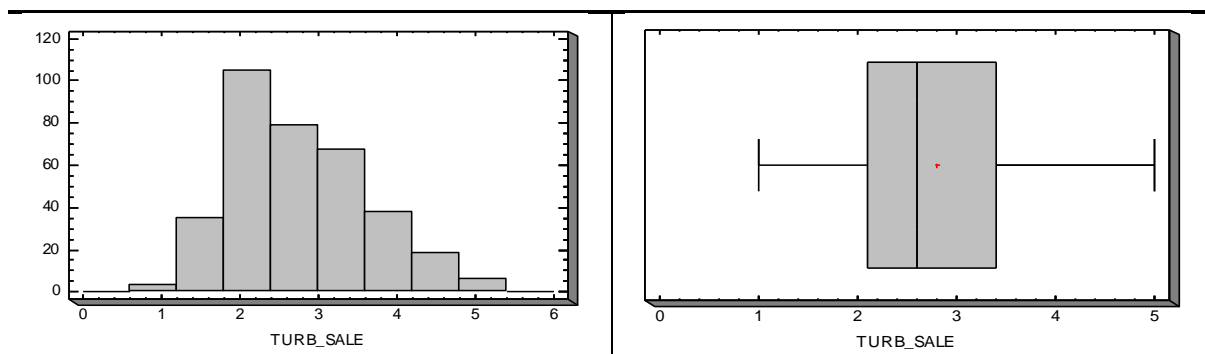
La forma de la distribución de la variable muestra una leve asimetría a la derecha con un 25% de los datos superior a 80% y la mitad de los datos concentrados entre 72% y 80%. El valor de CV=11% refleja homogeneidad en los datos.

- **Variable. TURBIEDAD DE SALIDA**

En la Tabla 9 se puede observar en la parte superior los principales estadísticos descriptivos de centralidad y variabilidad para la variable TURB_SALE y en la parte inferior, los diagramas de frecuencias y diagramas de cajas correspondientes para la distribución de esta variable.

Tabla 27. Estadísticos descriptivos para la variable TURB_SALE.

Estadístico	Valor
Media	2,8
Mediana	2,6
Desviación Estándar	0,87
Coeficiente de Variación (CV)	31,2%
Mínimo	1,0
Máximo	5,0
Rango	4,0



La variable Turbiedad de salida muestra un promedio de 2,8 NTU con desviación de 0,87 NTU. El valor de la mediana igual a 2,6 indica que la mitad de los datos de la muestra tienen un valor de esta variable superior a 2,6 NTU, siendo el valor mínimo que toma 1,0 NTU y el máximo 5,0 NTU.

Los diagramas de frecuencias y cajas exponen una distribución asimétrica a la derecha, con una concentración del 50% de los datos entre 2,1 NTU y 3,7 NTU, estando el 10% superior de los datos por encima de 5,0 NTU.

La Tabla 10 presenta un resumen de los principales estadísticos descriptivos para cada una de las variables consideradas en este estudio.

Tabla 28. Resumen de los estadísticos descriptivos de todas las variables de estudio.

	<i>POLÍMERO</i>	<i>PH</i>	<i>ALCALINIDAD</i>	<i>TURB_ENTRA</i>	<i>HIERRO</i>	<i>COLOR</i>	<i>LAGO</i>	<i>TURB_SALE</i>
Recuento	351	351	351	351	351	351	351	351
Media	0,367521	6,6302	28,3875	142,023	3,64444	1110,79	75,6097	2,8
Desv. Estándar	0,691974	0,18299	5,36158	77,1075	0,908762	521,465	8,23608	0,875018
Coef. Variación	188,281%	2,75995%	18,8872%	54,2923%	24,9355%	46,9454%	10,8929%	31,25%
Mínimo	0,0	5,8	18,0	22,0	1,7	113,0	59,0	1,0
Máximo	2,0	7,0	47,0	378,0	6,0	2600,0	100,0	5,0
Rango	2,0	1,2	29,0	356,0	4,3	2487,0	41,0	4,0

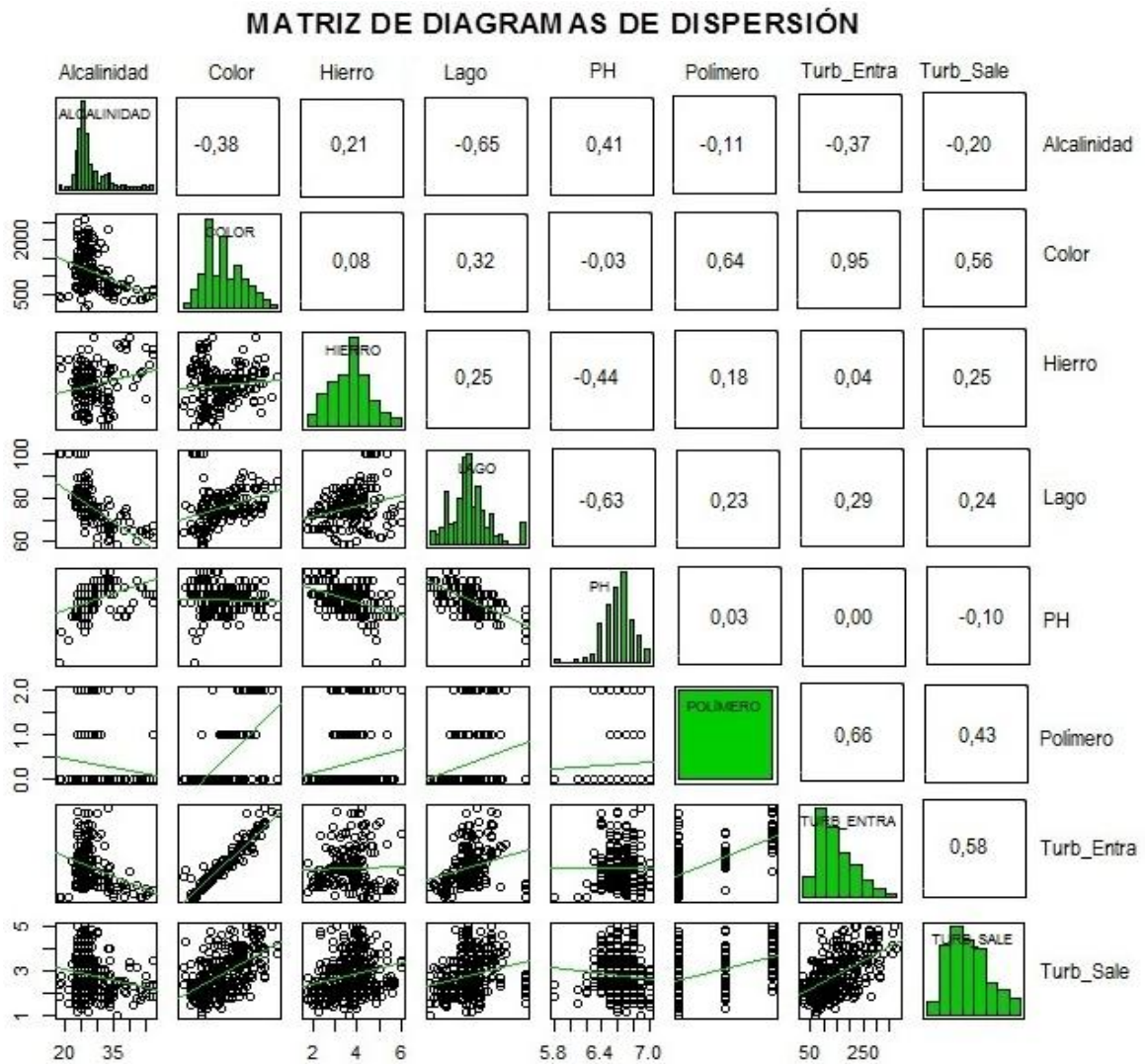
Se concluye que la variables de entrada que menos desviación estándar presenta en el proceso es el pH del agua debido a la capacidad amortiguadora del agua por tener siempre carbonatos y bicarbonatos en el agua, así mismo la dosis de polímero es la que le sigue presentando una desviación de 0.69 pero ella tiene una particularidad y es que es aplicada por rangos de turbiedad en el agua cruda, luego hierro y a su vez alcalinidad. Esto demuestra que son las más relevantes mostrando coeficientes de variación de 2.75%, 188%, 24%, 18% respectivamente. Esto también explica químicamente que en el pH está contenida la alcalinidad y el color lo predice el hierro implícitamente para luego predecir la turbiedad de salida la cual es la variable de respuesta para el modelo.

6.2 ESTADÍSTICA INFERENCIAL

6.2.1 Análisis exploratorio. Una herramienta muy útil, a nivel exploratorio, para obtener información de la relación entre dos variables cuantitativas es el diagrama de dispersión o de puntos que se construye representando en el plano cartesiano los valores de las variables medidas, éstos son a su vez, la expresión gráfica de los valores numéricos de las correlaciones estimadas.

Para tal fin, se presenta en la Figura 3 la matriz de correlaciones entre todas las combinaciones de las variables de estudio. Los valores por encima de la diagonal son correlaciones bivariantes, los gráficos de dispersión correspondientes se muestran por debajo de la diagonal y en la diagonal se expone la distribución de frecuencias de cada una de las variables que conforman la matriz.

Figura 9. Matriz de correlaciones y diagramas de dispersión entre las variables de estudio.



Al analizar la relación entre las variables predictoras, se ven correlaciones positivas muy altas entre las variables Turb_Entra y Color (0,95); altas, entre las variables Polímero y Turb_Entra (0,66), Polímero y Color (0,64). En menor medida entre las variables Alcalinidad y PH (0,41), Color y Lago (0,32), Turb_Entra y lago (0,29), Hierro y Lago (0,25), Polímero y Lago (0,23), Hierro y Alcalinidad (0,21).

De igual manera, se observan correlaciones altas negativas entre las variables Lago y Alcalinidad (-0,65), Lago y PH (-0,65), e inferiores entre las variables Hierro y PH (-0,44) y Alcalinidad y Color (-0,38); alejándose del ideal deseado que estas variables no estén correlacionadas, para que no se presenten solapamientos en el

poder de predicción de cada una de las variables que contribuya a disminuir el poder explicativo colectivo de las variables independientes.

Ahora, al mirar la relación entre la variable que se quiere explicar (Turb_Sale) y las demás variables explicativas (última fila y última columna de la matriz) se puede observar que se correlaciona con todas las variables independientes, siendo las correlaciones positivas más altas con las variables Turb_Entra (0,58), Color (0,56) y Polímero (0,43); y en menor magnitud con Hierro (0,25) y Lago (0,24), indicando que las dos variables se relacionan en sentido directo: a valores altos de una de ellas, le corresponden valores altos de la otra, e igualmente sucede con los valores bajos, a valores bajos de una, le corresponden valores bajos de la otra.

La correlación es negativa y baja con las variables alcalinidad (-0,20) y PH (-0,10), es decir, la relación es en sentido inverso, a valores altos de una de las variables, le suele corresponder valores bajos de la otra y viceversa.

No obstante, las correlaciones simples no son las más adecuadas para detectar una jerarquía de las variables, por ejemplo, ver cuál variable es la más importante, la segunda más importante en el modelo; para eso, es necesario recurrir a las correlaciones parciales que expresan la correlación lineal existente entre dos variables, tras eliminar de ambas el efecto atribuible a terceras variables.

En la Tabla 11 se pueden advertir los valores de las correlaciones parciales de la variable dependiente (Turb_Sale) y las demás variables de estudio.

Tabla 29. Correlaciones parciales entre las variables.

	<i>POLÍMERO</i>	<i>PH</i>	<i>ALCALINIDAD</i>	<i>TURB_ENTRA</i>	<i>HIERRO</i>	<i>COLOR</i>	<i>LAGO</i>	<i>TURB_SALE</i>
POLÍMERO	0.00							
PH	0.13	0.00						
ALCALINIDAD	0.16	0.32	0.00					
TURB_ENTRA	0.26	0.00	-0.05	0.00				
HIERRO	0.11	-0.50	0.57	-0.12	0.00			
COLOR	0.00	0.08	-0.10	0.89	0.15	0.00		
LAGO	0.18	-0.34	-0.54	-0.06	0.23	0.06	0.00	
TURB_SALE	0.03	0.04	-0.06	<u>0.19</u>	<u>0.23</u>	-0.00	-0.01	0.00

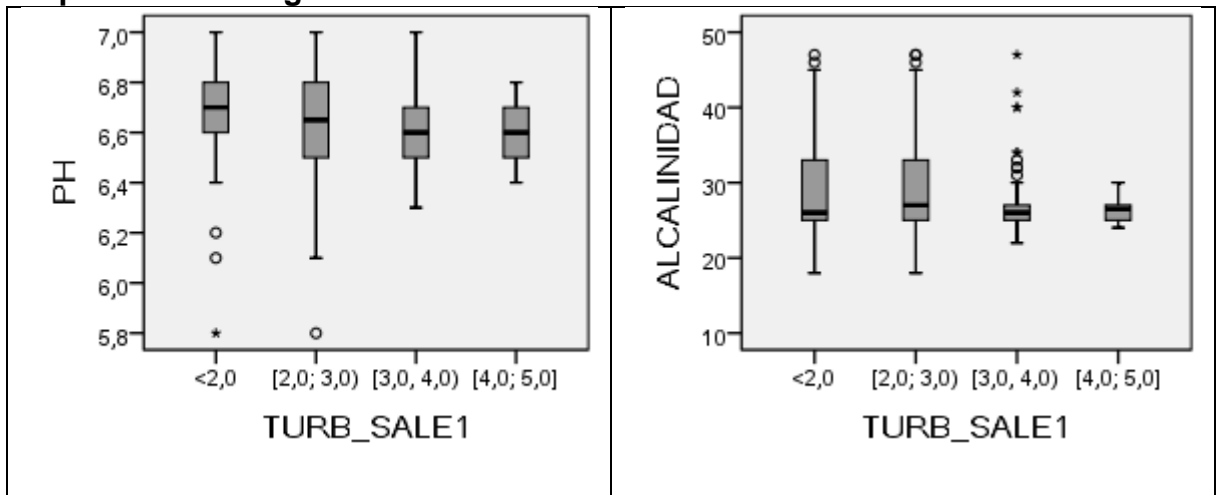
Las correlaciones parciales se analizan igual que las correlaciones lineales simples: oscilan entre -1 y 1, entre más cerca de 1 mayor correlación y más cerca de cero, menor correlación entre las variables.

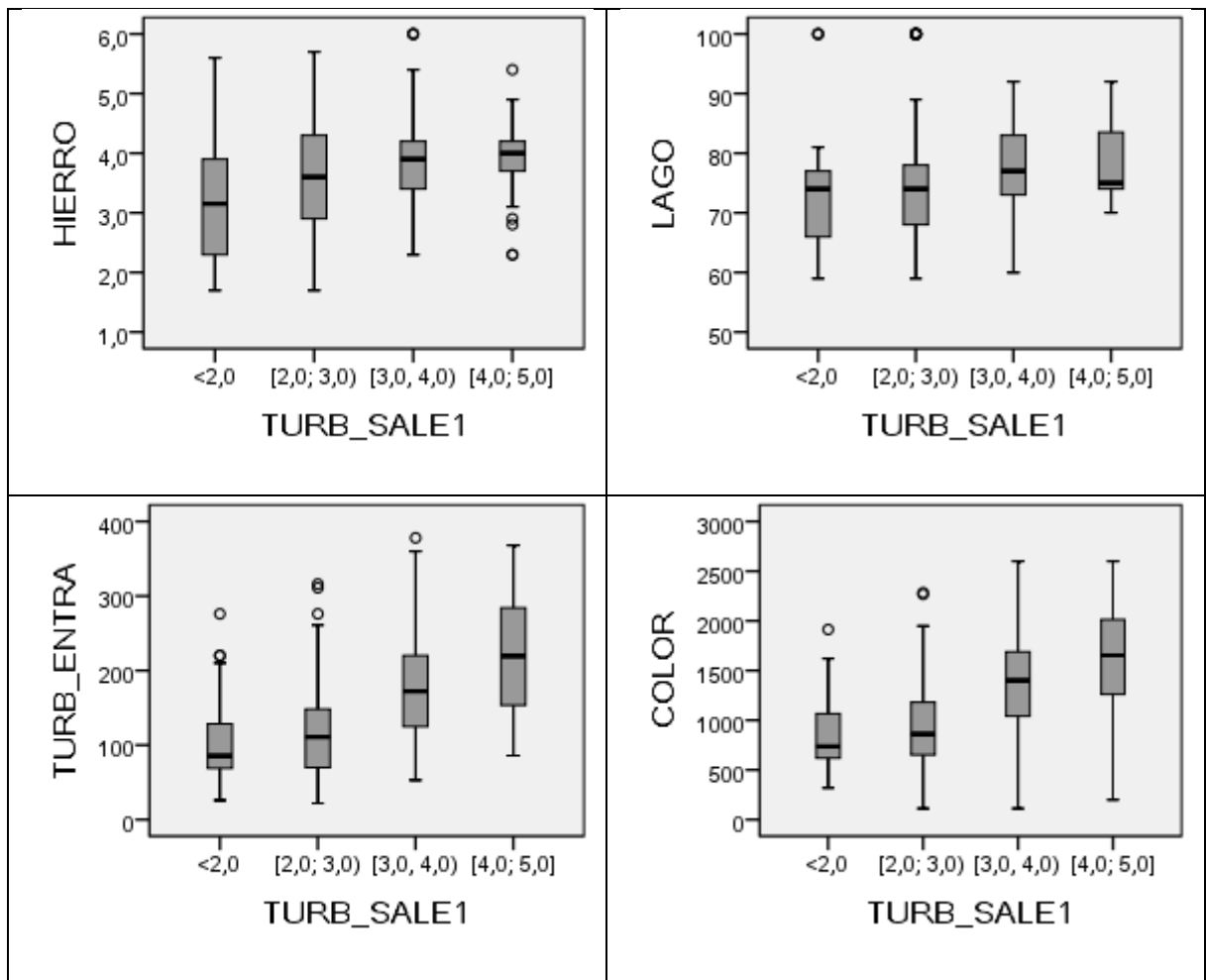
Otra vez se observa la última fila, esta vez de la Tabla 11, se puede ver que la variable Turb_Sale presenta la mayor correlación parcial con la variable Hierro, indicativo que esta variable es la más importante para el modelo; en segundo lugar está la variable Turb_Entra que seguiría en el ranking de representación en el modelo.

Nótese que las correlaciones simples más altas de la variable respuesta Turb_Sale son con Turb_Entra y Color, que a su vez, correlacionan muy altamente entre sí; y las correlaciones parciales muestran las variables Turb_Entra y Hierro como las dos de mayor relación y entre ellas no están correlacionadas que es lo que se desea para el modelo.

En la Figura 4 se presentan los diagramas de cajas de las variables independientes vs. la variable dependiente (Turb_Sale1) que ha sido categorizada en 4 niveles: menores de 2,0; entre 2,0 y 3,0; entre 3,0 y 4,0 y entre 4,0 y 5,0 para poder observar el comportamiento de las variables explicativas a medida que aumenta el nivel de la variable dependiente.

Figura 10. Diagramas de cajas de las variables independientes vs la variable dependiente categorizada en 4 niveles.





Lo primero que se aprecia es que en la mayoría de los niveles de respuesta de la variable Turb_Sale1, los datos muestran gran variabilidad.

Al mirar una a una las variables (sin tener en cuenta el efecto de las otras) con la variable dependiente, los dos cuadros superiores de la Figura 4 muestran que las variables PH y Alcalinidad disminuyen a medida que se aumenta en los niveles de la variable respuesta, corroborando la correlación negativa señalada en la Figura 1. Con las otras variables se observa lo contrario: a medida que se aumenta en la escala de las variables, aumenta en los niveles de Turbiedad, siendo más evidente en las variables Turb_Entra y Color que se presentan en los dos cuadros inferiores.

Por consiguiente, con respecto al análisis descriptivo se puede concluir que todas las variables correlacionan significativamente con la variable dependiente Turbiedad de salida, siendo esa relación positiva con %_lago, Hierro, Polímero

W70, Color, Turbiedad de entrada y mostrando coeficientes superiores a 0,5 en el caso de las dos últimas. Con las variables Alcalinidad y PH correlaciona de forma negativa exhibiendo coeficientes iguales o inferiores a -0,20.

6.2.2 Ajuste del modelo

En este apartado se busca ajustar un modelo estadístico que pretende explicar el nivel de Turbiedad del agua de salida del clarificador de la planta de servicios industriales en términos de 7 variables independientes que se presentan en la Tabla 12.

Tabla 30. Variables iniciales en el Modelo de regresión.

VARIABLE DEPENDIENTE		VARIABLES INDEPENDIENTES	
<i>y</i>	TURB_SALE	X ₁	ALCALINIDAD
		X ₂	COLOR
		X ₃	HIERRO
		X ₄	LAGO
		X ₅	PH
		X ₆	POLÍMERO
		X ₇	TURB_ENTRA

El modelo teórico a estimar es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \varepsilon$$

$$\text{Turb_Sale} = \text{Intercepto} + \text{Alcalinidad} + \text{Color} + \text{Hierro} + \text{Lago} + \text{PH} + \text{Polímero} + \text{Turb_Entra}$$

El primer modelo (Modelo 1) se corrió ejecutando el algoritmo computacional de la regresión hacia atrás, con la variable Turb_Sale en función de todas las demás variables explicativas.

La salida en el software R del resumen del Modelo 1 se muestra en la Tabla 13.

Tabla 31. Resumen del Modelo 1.

Variables	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1,35E+01	2,34E+03	0.006	0.99539
X ₁ : ALCALINIDAD	-1,40E+01	1,19E+01	-1.180	0.23889
X ₂ : COLOR	-4,37E-03	2,41E-01	-0.018	0.98554
X ₃ : HIERRO	2,52E+02	5,76E+01	4.377	1.6e-05 ***
X ₄ : LAGO	-1,32E+00	7,49E+00	-0.176	0.86009
X ₅ : PH	2,29E+02	3,11E+02	0.736	0.46219
X ₆ : POLÍMERO	3,97E+01	7,54E+01	0.526	0.59893
X ₇ : TURB_ENTRA	5,91E+00	1,67E+00	3.549	0.00044 ***

Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

Residual standard error: 0,6919 on 343 degrees of freedom , CV= 100*(0,6919/2,8)=**24,7%**

Multiple R-squared: 0,3871

Adjusted R-squared: 0,3746

F-statistic: 30,95 on 7 and 343 DF, **p-value: < 2,2e-16**

	Min	1Q	Median	3Q	Max
Residuals:	-168.545	-0.49449	-0.03432	0.40027	228.355

En la segunda columna se presentan las estimaciones puntuales de los coeficientes $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_7$ que acompañan a las variables, siendo el intercepto

$$\beta_0 = 1,35E + 01$$

La tercera y cuarta columna presentan el error estándar de la estimación y el valor del estadístico de contraste respectivamente. La última columna expone los valor_p asociados que permiten responder a la pregunta si los coeficientes son distintos de cero, según los asteriscos (*) que indican el nivel de significancia de la prueba.

Los resultados muestran no significativos el intercepto y los coeficientes de las variables Alcalinidad, Color, Lago, PH y Polímero sugiriendo que estas variables no son relevantes en el modelo y por lo tanto β_3 y β_7 son distintos de cero en el nivel 0,001.

El valor de R² ajustado es igual a 0,3746, es decir, el Modelo 1 consigue explicar el 37% de la variabilidad de los datos (en líneas generales un R²>65%, se estima como un modelo bueno).

Por lo complejo de estos análisis y en búsqueda de un modelo que proporcionara una mejor estimación, menor error y cumplimiento con los supuestos, se eliminó inicialmente del Modelo 1 el intercepto, lo que elevó el coeficiente de la variable PH a un nivel significativo de 0,05 (Modelo 2). Sobre el Modelo 2 se siguió el proceso, realizando varias combinaciones de variables, eliminando una a una las variables cuyos coeficientes no eran significativos, realizando transformaciones y valorando el cumplimiento de los supuestos del modelo de regresión. Finalmente, haciendo la transformación de logaritmo natural (Ln y) a la variable respuesta (Ln_Turb_Sale), y con las variables cuyos coeficientes fueron significativos (hierro, pH y turbiedad de entrada) se llegó al Modelo 3, cuyo resumen se presenta en la Tabla 14.

Tabla 32. Resumen del Modelo 3.

Variables	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
X3: HIERRO	0.0904948	0.0139386	6.492	2.91e-10 ***
X5: PH	0.0504148	0.0084991	5.932	7.23e-09 ***
X7: TURB_ENTRA	0.0022313	0.0001728	12.909	< 2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0,2491 on 348 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0,942

Adjusted R-squared: 0,9415

F-statistic: 1883 on 3 and 348 DF, **p-value:** < 2,2e-16

	Min	1Q	Median	3Q	Max
Residuals:	-0.82760	-0.18218	0.01212	0.17194	0.68602

El resumen del modelo presenta la estimación de 3 coeficientes significativos en el nivel 0,001 (***) - 99.99% de confianza), por consiguiente, las variables asociadas son distintas de cero y se deben mantener en el modelo. Se puede ver que la variable PH que al correr el Modelo 1 no era significativa, después de eliminar las otras variables, es significativa en el nivel 0,001.

Nuevamente el modelo hace referencia a las tres variables como se explicó anteriormente y demuestra una vez que son las más importantes para lograr una variable de respuesta de calidad que va a hacer la turbiedad de salida y las otras como son color y alcalinidad estarían jugando un papel muy considerable en X3 y X5.

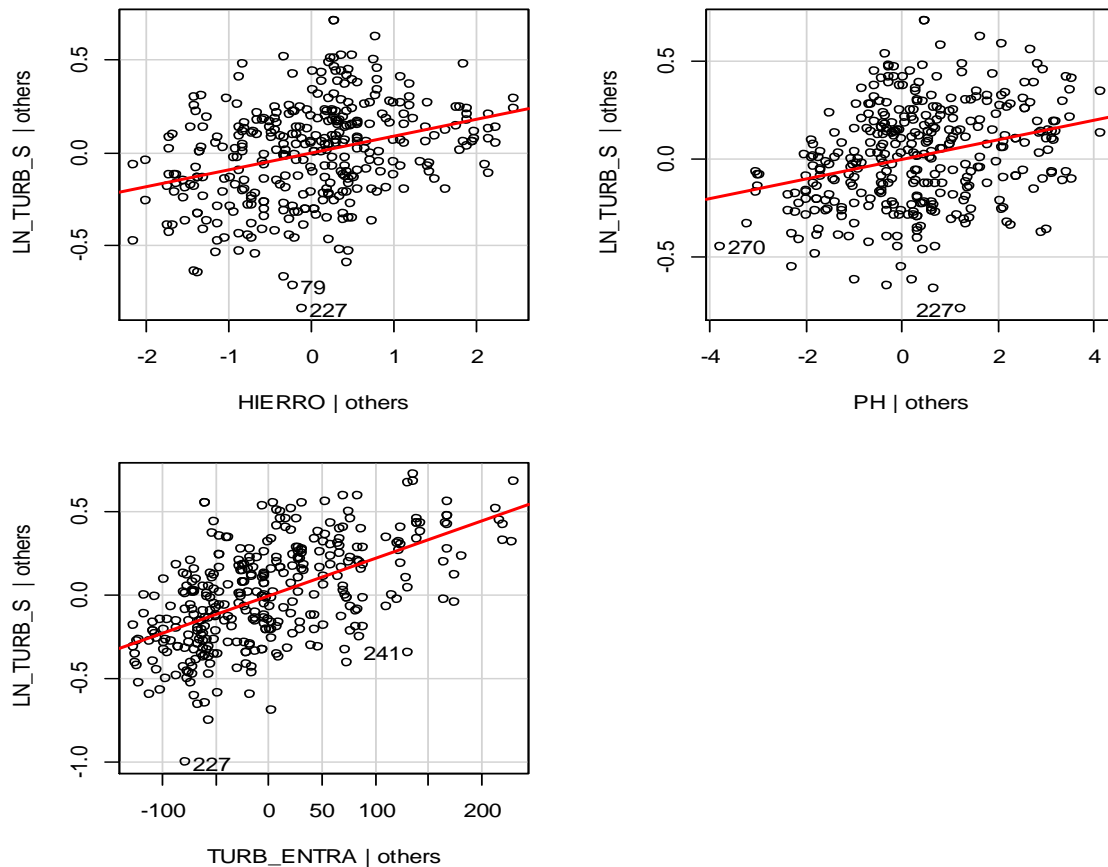
Por consiguiente el Modelo 3 se puede expresar:

$$Ln_Turb_Sale = Hierro + PH + Turb_Entra$$

$$Ln_Turb_Sale = (0,0904949) Hierro + (0,0504148) PH + (0,0022313) Turb_Entra$$

La Figura 5 da cuenta de los diagramas de dispersión entre cada una de las variables predictoras del modelo y la variable dependiente transformada Ln_Turb_Sale.

Figura 11. Variable respuesta vs variables predictoras del Modelo 1.



En la Tabla 15 se pueden observar los intervalos de confianza para los coeficientes del Modelo 3 de regresión. La primera columna expone la variable asociada al parámetro que se está estimando, la segunda columna muestra la estimación del parámetro β , la tercera, el extremo inferior del intervalo y la cuarta el extremo superior.

Tabla 33. Estimación de los Intervalos de Confianza de Modelo 3.

	Estimate	2.5%	97.5%
HIERRO	0.09049480	0.06308032	0.11790928
PH	0.05041477	0.03369874	0.06713080
TURB_ENTRA	0.00223129	0.00189133	0.00257125

Por consiguiente se tiene que los intervalos de confianza, al 95% de confianza, para los parámetros β_3 , β_5 y β_7 del Modelo 3 son:

$$IC_{95\%}(\beta_3) = (0,063; 0,118)$$

$$IC_{95\%}(\beta_5) = (0,034; 0,067)$$

$$IC_{95\%}(\beta_7) = (0,002; 0,003)$$

6.2.3 Bondad del ajuste. Obtenido el Modelo 3 ahora la atención se centra en evaluar si este modelo es realmente bueno a la hora de explicar la variable Ln_Turb_Sale. Para hacer esta primera evaluación del modelo se estudian tres criterios diferentes: el error estándar residual (Residual Standard Error (RSE), por su nombre en inglés), la tabla anova y el coeficiente de determinación R^2 .

6.2.3.1 Error Estándar Residual (RSE). El RSE es la estimación puntual de la desviación típica del modelo, lo que se desea es que este valor sea muy pequeño. El RSE se encuentra en la tabla resumen del Modelo 3 (Ver Tabla 14), el valor es igual a 0,2491 relativamente pequeño, que se tendrá en cuenta en la evaluación de los modelos.

6.2.3.2 Tabla de Anova. La Tabla de Anova es la respuesta a la pregunta si todos los coeficientes del modelo son iguales a cero, es decir, el resultado del contraste planteado por las siguientes hipótesis:

$$H_o : \beta_3 = \beta_5 = \beta_7 = 0$$

$$H_a : \beta_3 \neq \beta_5 \neq \beta_7 \neq 0$$

El valor_p que permite responder a esta pregunta también se encuentra en la tabla resumen del Modelo 3 (Tabla 14). Se tiene que el valor_p = 2,2e-16, inferior al nivel de significancia de 0,05, por consiguiente se rechaza la hipótesis nula (H_o) y

se puede concluir que hay modelo. El tercer criterio, y no menos importante que los dos anteriores, es el coeficiente de determinación R^2 .

6.2.3.3 Coeficiente de Determinación R^2 . El coeficiente de determinación es una medida del ajuste o fiabilidad del modelo estimado a los datos. Nuevamente, en la tabla resumen del Modelo 3 se puede identificar el valor del coeficiente de determinación, $R^2=0,942$ y R^2 Ajustado= $0,9415$, muy parecidos, en otras palabras, el Modelo 3 consigue explicar el 94% de la variabilidad total de los datos, es un muy buen modelo.

6.2.4 Diagnóstico del modelo. En este apartado se realiza el diagnóstico del modelo por medio de gráficas y test estadísticos asociados que permiten comprobar si el modelo de regresión cumple con las hipótesis definidas sobre los errores.

En la Figura 2 se presenta el cuarteto de gráficas básicas de diagnóstico que ofrece el programa R para el análisis de los residuos del modelo de regresión.

6.2.4.1 Normalidad. En el gráfico QQ_plot (Figura 2 superior a la derecha) se puede ver que la mayoría de puntos coinciden sobre la línea discontinua, aunque en los extremos los puntos se alejan un poco de la misma, creando un primer interrogante sobre la verificación de la normalidad. Por tal razón, se realiza la prueba estadística de Shapiro-Wilk para comprobar sin dudas la normalidad de los residuos.

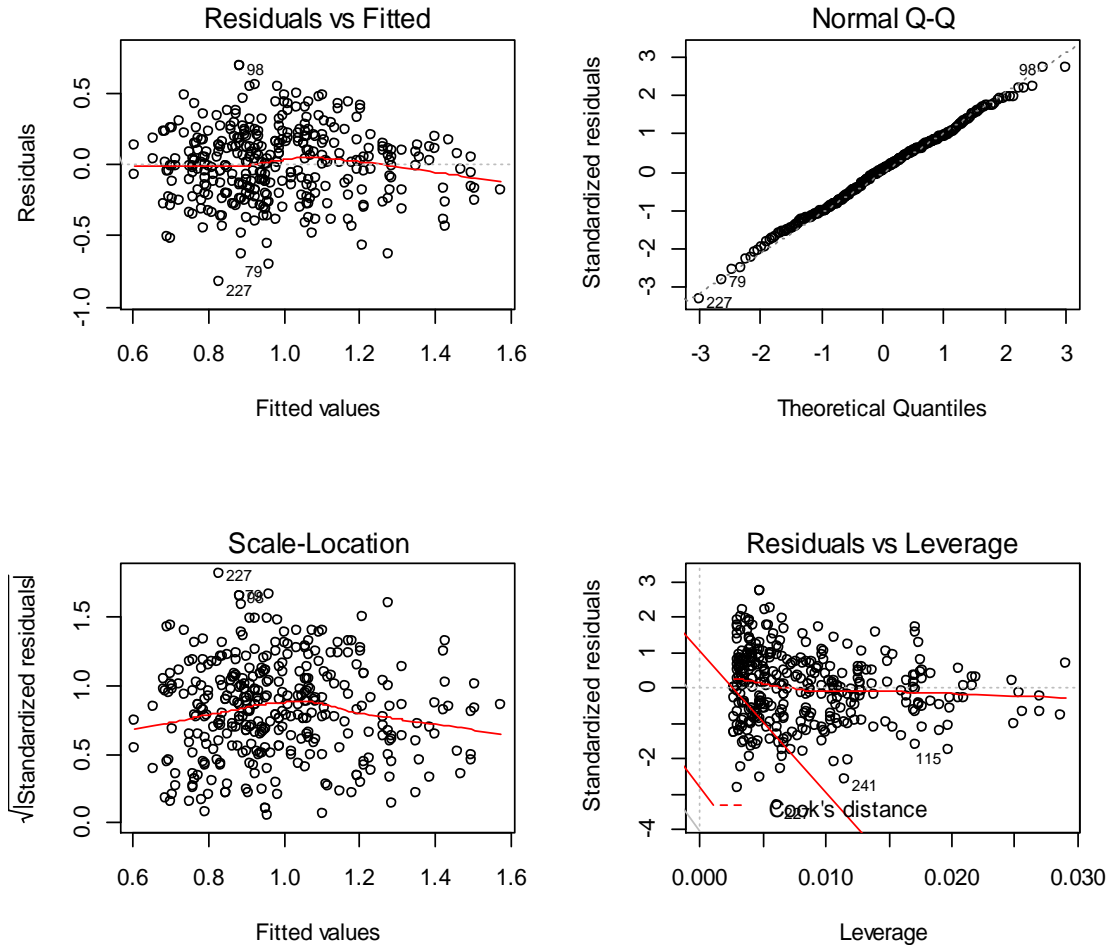
Los resultados de la prueba estadística de Shapiro-Wilk que contrasta la hipótesis nula de que los residuos se distribuyen como una normal, con un valor_p = $0,8018$ (mayor que el nivel de significancia de $0,05$) concluye que no se puede rechazar la hipótesis de normalidad de los errores.

6.2.4.2 Homocedasticidad. Este supuesto del modelo hace referencia a que todos los errores de la función de regresión tienen la misma varianza (la varianza es constante). La observación del gráfico de los residuos vs valores predichos de Ln_Turb_Sale (Figura 6, izquierda superior), aparentemente lo confirmaría, se aprecia una anchura de los puntos relativamente similar a lo largo de todo el gráfico.

El Test estadístico de Breusch Pagan contrasta la hipótesis nula de homocedasticidad vs heterocedasticidad. El valor_p de la prueba es igual a $0,6266$ ($>$ a $0,05$) por lo tanto no se puede rechazar la hipótesis nula, o sea, se asume que el modelo ha generado unos errores que cumplen con la homocedasticidad.

Figura 12. Gráficas básicas de diagnóstico del Modelo 3.

$$\text{lm}(\text{LN_TURB_S} \sim \text{HIERRO} + \text{PH} + \text{TURB_ENTRA} - 1)$$



6.2.4.3 Incorrección. Para probar este supuesto del modelo se observan los diagramas de dispersión en la parte inferior de la Figura 2. La exploración visual de estos gráficos no satisface totalmente este supuesto.

La media de los errores igual a cero sería el último supuesto a revisar, el método de máxima verosimilitud utilizado para ajustar el modelo brinda garantía de su cumplimiento como se corrobora pidiéndole al programa el valor de la media de la variable de error (media= 0,000184714).

Por tanto, se puede decir que se ha encontrado un modelo (Modelo 3) que es capaz de explicar con tres variables independientes (Hierro, pH y Turb_Entra) la turbiedad de salida del agua después del proceso de clarificación, explicando el 94% de la variabilidad de los datos y va a generar unos errores que cumplen totalmente con tres hipótesis básicas del modelo como normalidad, homocedasticidad y media cero.

Entre todos los posibles modelos explorados con el propósito de alcanzar con los objetivos de esta investigación, el Modelo 4 que se muestra a continuación, reúne condiciones en el ajuste y diagnóstico comparables con el Modelo 3, teniendo también como variables explicativas más relevantes la turbiedad de entrada y el hierro, pero acompañadas de la variable Polímero.

Las medidas más importantes del Modelo 4 se exponen en la Tabla 16 y su comparación con el Modelo 3 permitirá escoger aquel que ofrezca las mejores características en relación con la capacidad explicativa y mínimo error.

Tabla 34. Resumen del Modelo 4.

Variables	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
X3: HIERRO	0.1582081	0.0074634	21.198	<2e-16 ***
X6: POLÍMERO	-0.0526323	0.0255142	-2.063	0.0399 *
X7: TURB_ENTRA	0.0028764	0.0002091	13.754	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0,2598 on 348 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0,9369

Adjusted R-squared: 0,9363

F-statistic: 1722 on 3 and 348 DF, **p-value:** < 2,2e-16

Residuals:	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.76802	-0.17683	0.02641	0.18420	0.70424

La Tabla 17 muestra un comparativo de los principales estadísticos del Modelo 3 y del Modelo 4.

Tabla 35. Comparativo de los estadísticos de error del Modelo 3 y el Modelo 4.

Estadísticos	Modelo 3	Modelo 4
R ²	0,9420	0,9369
R ² Ajustado	0,9415	0,9363
RSE	0,2491	0,2598

Las diferencias observadas entre estos modelos son pequeñas, sin embargo el modelo 3 ofrece valores un poco superiores en el coeficiente de determinación R² e inferiores en la medida del error (RSE).

6.3 EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN

Uno de los objetivos financieros de las empresas es la reducción de los costos, esto se debe lograr sin desmejorar la calidad en la producción, muchas veces por la inserción equivocada de materias primas y materiales más económicos y de no tan buena calidad, si no, como se especifica en este planteamiento la reducción de costos se da por el mejoramiento continuo de los procesos de producción y el aprovechamiento eficiente de los recursos.

El análisis del proyecto se realizará con el valor presente neto que significa traer del futuro al presente cantidades monetarias a su valor equivalente y los criterios para tomar una decisión sobre el VPN.

Si $VPN > 0$ es conveniente aceptar la inversión, ya que se ganaría más del rendimiento solicitado.

Si $VPN < 0$ se debe rechazar la inversión porque no se generaría el rendimiento mínimo solicitado.

Por lo tanto para realizar el proyecto se necesita una inversión de sesenta millones como se describe a continuación:

Figura 7. Valor presente Neto



Inversión=\$ 60.000.000

Flujo proyectado a un año= \$ 3.000.195.714

El flujo es desglosado de la siguiente forma:

Costos de contingencias de hierro en torres enfriadoras (una contingencia): \$160 M

Tratamiento químico en el proceso de clarificación: \$ 360 M

Tratamiento del polímero de alto peso molecular de 3 y 4 ppm: \$ 24 M

Lavado de clarificadores: \$ 240 M

Purgas por alta turbiedad en torres de enfriamiento: \$ 1.100.760.000.

Purgas en clarificadores por desviación en el proceso: \$ 1.015.459.200

Mantenimiento de la piscina de lodos: \$ 400 M

Por consiguiente para el cálculo proyectado a un año se contempla los costos de contingencias de hierro en torres enfriadoras (una contingencia), tratamiento químico en el proceso de clarificación, tratamiento del polímero de alto peso molecular de 3 y 4 ppm, lavado de clarificadores, purgas por alta turbiedad en torres de enfriamiento, purgas en clarificadores por desviación en el proceso y valor de mantenimiento de la piscina de lodos.

VPN=

$$\frac{-60.000.000-160.000.000-360.000.000-24.000.000-240.000.000-1.100.760.000-1.015.459.200-400.000.000}{(1+0.12)^1}$$

VPN= \$-3.000.195.714

Y para el cálculo proyectado en proyecto a un año se tienen los costos de contingencias de hierro en torres enfriadoras, tratamiento químico en el proceso de clarificación, se elimina tratamiento del polímero de alto peso molecular de 3 y 4 ppm porque estadísticamente no es viable, es contraproducente para el proceso, lavado de clarificadores, purgas por alta turbiedad en torres de enfriamiento (40%), purgas en clarificadores por desviación en el proceso (40%) y valor de mantenimiento de la piscina de lodos.

$$VPN_{\text{Proyecto}} = \frac{-60.000.000-40.000.000-360.000.000-120.000.000-660.456.000-609.275.520-400.000.000}{(1+0.12)^1}$$

VPN_{Proyecto} = \$-2.008.688.857

VPN- VPN_{Proyecto} = \$991.506.856 Ahorro en el proceso por año.

En la Tabla 18 se presenta una síntesis de estos valores encontrados.

Tabla 36. Resumen de Valor Presente Neto.

VPN	VPN (1 año)	Variación VPN	Variación Porcentual
\$ 3.000.195.714	\$ 2.008.688.857	\$ 991.506.856	33%

En este ejercicio, se observa una disminución en el VPN del 24% en los costos de producción, marcando una diferencia competitiva en el mercado, lo cual se reflejaría en el estado de resultados en una mayor utilidad operacional y por ende en una mayor rentabilidad.

Son muchas las decisiones que se toman al momento de lograr eficientemente una reducción de los costos, el aprovechamiento en esta área puede destinarse a cubrir áreas con poca eficiencia financiera, en otros casos se piensa en los clientes con el fin de tener una mejor relación comercial con estos por el mejoramiento de los precios, se establecen nuevas políticas con los proveedores etc.

7. CONCLUSIONES

En este último capítulo se presenta una síntesis de los resultados más importantes obtenidos en el estudio.

- En este estudio se tuvieron en cuenta ocho variables, siete medidas sobre el agua de entrada al proceso de clarificación y una, medida sobre el agua de salida del proceso.

- Entre las características univariantes de cada una de las variables independientes se tienen:

- *Polímero W_70*: el cual se utilizó en 0, 1, 2 ppm, siendo el más frecuente sin polímero (polímero = 0).

- *pH*: el valor promedio del PH es igual a 6,63 con desviación de 0,18 y rango entre 5,8 y 7,0;

- *Alcalinidad*: la media de alcalinidad es de 28,38 con desviación de 5,36 y rango entre 18,0 y 47,0;

- *Turb_Entra*: la turbiedad media de entrada igual a 142,0 con desviación de 77,1 y rango entre 22,0 y 378,0;

- *Hierro*: tiene una media igual a 3,6 y desviación 1,7 y rango entre 1,7 y 6,0;

- *Color*: el promedio de color es igual a 1110,8 con desviación de 531,5 y rango entre 113,0 y 2600,0;

- *%_Lago*: el porcentaje medio de agua de lago es de 75,6% y desviación de 8,23 y rango entre 59% y 100%.

- *Turbiedad de salida*: se tiene un valor medio de 2,8 con desviación de 0,87 y rango entre un mínimo de 1,0 y máximo de 5,0.

- Con respecto al análisis multivariante se puede concluir que todas las variables correlacionan significativamente con la variable dependiente Turbiedad de salida, siendo esa relación positiva con %_lago, Hierro, Polímero W70, Color, Turbiedad de entrada y mostrando coeficientes superiores a 0,5 en el caso de las dos últimas. Con las variables Alcalinidad y PH correlaciona de forma negativa exhibiendo coeficientes iguales o inferiores a -0,20.

- Analizados varios modelos de regresión, se escogió el Modelo 3 que presentaba el mayor ajuste (0,9415) y menor error (0,2491), y que matemáticamente se expresa:

$$\ln_Turb_Sale = (0,0904949) Hierro + (0,0504148) PH + (0,0022313) Turb_Entra$$

- Cabe mencionar que entre otros análisis realizados, se consideraron solamente los 265 datos correspondientes a cuando polímero es igual a cero. Se corrió el modelo con las demás variables y los resultados obtenidos fueron muy semejantes: el modelo deja activas las mismas variables hierro, PH y turbulencia de entrada y el ajuste ($R^2= 0,940$). La diferencia se observa en la medida del error (RSE=0,6679) que es mayor a la ofrecida por el Modelo 3.
- Con relación a la elaboración del procedimiento de puesta en marcha del servicio del clarificador se encontró que es de relevancia realizar los lavados previos a las líneas de químicos antes de iniciar la puesta en servicio, partir de una dosificación más alta de la normal en el proceso de arrancada con el fin de generar un manto más compacto y en menos tiempo, de igual manera con el fin de asegurar el proceso se requiere que todos los operarios apliquen el paso a paso del procedimiento de manera estricta con el fin de garantizar homogeneidad en el proceso y monitorear variables antes de alinear el clarificador para no afectar otros procesos y no tener que aplicar contingencias químicas que generan algún tipo de sobre costo en el valor pactado del contrato.
- Por otro lado la evaluación financiera del proceso de clarificación reveló que el hacer el proyecto genera una ganancia de \$991.506.856 en el proceso por año, agregando también la minimización de efluentes contribuyendo al medio ambiente, disminución de compra de reactivos químicos para análisis químicos e impactando en menor proporción los costos de la compañía.
- Finalmente se deja como propuesta para otras investigaciones implementar una corrección de temperatura en el modelo con el fin de hacer un ajuste más fino en la cinética del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

ARBOLEDA, J. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera Edición. Vol. 1. 2000.

ARBOLEDA, J. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Lima, CEPIS/OPS, Serie Técnica 13, 1973.

BACA, Guillermo. Ingeniería Económica. Bogotá; Fondo Educativo Panamericano, 2002.

CANEPA, Lidia, Tratamiento de aguas para consumo humano. Manual I: Teoría, Lima: CEPIS, 2004.

CEPIS/OPS., Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada, Lima, CEPIS. 2006.

CHEN, L. C.; LEE; D. J. y CHOU, S. S. Charge reversal effect on blanket in full-scale floc blanket clarifier. Journal of Environmental Engineering. 2006. Vol. 132, no. 11, p. 1523-1526.

CHEN, L. C.; SUNG, S. S.; LIN, W. W.; LEE, D. J.; HUANG, C.; JUANG, R. S. and CHANG, Hsi-Lih. Observations of blanket characteristics in full-scale floc blanket clarifiers. Water Science and Technology. 2003. Vol. 47, no. 1, p. 197-204.

DEGREMONT. Manual técnico del agua. Degremont, 1973.

HEAD, R; HART, J. and GRAHAM, N. Simulating the effect of blanket characteristics on the floc blanket clarification process. En: Water Science and Technology. 1997. Vol. 36, no. 4, p. 77-84.

IVES, K.J., "Theory of operation of sludge Blanket Clarifiers", proc. Inst. Civ. Engrs., Vol.39, p. 243, June 1968.

J.F. HAIR, R.E. ANDERSON R.L. TATHAM & C.B. BLACK. Análisis Multivariante. Prentice Hall 1999.

KAWAMURA S. (1996). "Optimization of basic water treatment process Design and Operation Coagulation and Flocculation". Journal of water Supply Research and Technology, Vol.45 No 1 p. 35-47, London UK.

LEVENSPIEL, O. Ingeniería de las Reacciones Químicas. Editorial Reverte. Barcelona, España. 1998, p. 638.

LI, G. y GREGORY, J. Flocculation and Sedimentation of High-Turbidity Waters, Water Res. 1991. Vol. 25, p. 1137_1143.

LIN, W. W.; SUNG, S. S.; CHEN, L. C.; CHUNG, H. Y.; WANG, C. C.; WU, R. M.; LEE, D. J.; HUANG, Chihpin; JUANG, R. S.; PENG, X. F. and CHANG, Hsi-Lih. Treating high-turbidity water using full-scale floc blanket clarifiers. Journal of Environmental Engineering. 2004. Vol. 130, no. 12, p. 1481-1487.

MARDIA, KENT & BIBBY. Multivariate Analysis. Academic Press 1979.

MONTGOMERY Douglas C, Probabilidad y Estadística Aplicados a la ingeniería, Madrid: Mc Graw Hill, 1995.

MONTOYA, LOAIZA Y TORRES. Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. Revista EIA. Escuela de Ingeniería de Antioquía, Medellín (Colombia). No. 16, p. 137-148.

PÉREZ, J. M. Avances de sedimentación. Curso sobre tecnologías de tratamiento de agua para países en desarrollo. CEPIS-CIFCA, 1978.

PÉREZ, J. Análisis de Flujos y Factores que Determinan los Periodos de Retención. CEPIS/OPS, Manual de Evaluación. Tomo II Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. 1992.

PÉREZ, J. Manual de Potabilización del Agua. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 1997. Tercera edición, 504 p.

PRADILLA, F. Clarificación de aguas. Documento técnico. Química Nalco de Colombia S. A., Barranquilla, 1994.

R.SIMPSON. The Chemistry of clarification. Sugar Milling Research Institute, University of Natal, King George V Avenue, Durban, 2001.

ROMERO, Jairo Alberto. Purificación del agua. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000.

STUMM, W., MORGAN, J.J. Chemical aspects of coagulation. J. Am. Water Works Assoc., 54, 971. 1962.

WILLS, CASTRO Y CORREA. Evaluación de un clarificador de manto de lodos a escala de laboratorio. Revista EIA. Escuela de Ingeniería de Antioquía, Medellín (Colombia). No 14, p.53-65.

WOLF, D., RESNICK, W. Residence time distribution in real systems, in Industrial Engineering Chemistry Fundamentals. 1963. Vol. II, p. 217

YANG, W. J.; WANG, C. C.; HSU, R. Y. and WU, R. M. (2008). Two-phase flow simulation of reactor clarifiers. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, Vol. 39, No. 3 Mayo, p. 275-280.

ANEXOS

ANEXO A.

ELABORACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE PUESTA EN SERVICIO DEL
CLARIFICADOR


	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

Tabla de contenido

1. OBJETIVO	65
2. GLOSARIO	65
3. CONDICIONES GENERALES	67
3.1. Frecuencia de Revisión y de Ciclo de Trabajo	67
3.2. Valoración RAM	68
3.3. Peligros, Riesgos y Controles de Seguridad	68
3.4. Aspectos, Impactos y Controles Ambientales	68
3.5. Referencias.....	69
3.6. Equipo Personal de Protección	69
3.7. Recursos Materiales	69
3.8. Datos de Diseño	69
3.9. Sistemas de Protección.....	70
3.10. Lazos de Control.....	70
3.11. Diagramas y Planos	71
3.12. Descripción de Equipos y Sistemas Conectados	72
3.13. Descripción Básica del Sistema	73
3.14. Requisitos o Precondiciones.....	73
4. DESARROLLO	75
PLAN 1 REALIZAR COMUNICACIONES.	75
PLAN 2 LAVAR LINEAS DE DOSIFICACIÓN DE QUIMICOS.	75
SI = √	84
PLAN 3 ACONDICIONAR EL CLARIFICADOR.	84
SI = √	90
PLAN 4 ALINEAR PARCIALMENTE EL CLARIFICADOR.....	90
SI = √	92
PLAN 5 ALINEAR PARCIALMENTE EL CLARIFICADOR.....	92
SI = √	94
PLAN 6 ALINEAR TOTALMENTE EL CLARIFICADOR HACIA EL SISTEMA DE SELLOS.	94
SI = √	95
PLAN 7 REALIZAR SEGUIMIENTO A OPERACIÓN DEL CLARIFICADOR.	95
5. CONTINGENCIA	99


	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

1. OBJETIVO

- Describir el procedimiento para puesta en servicio de los clarificadores **CL-2911A/B/C**, garantizando la seguridad del personal y la integridad de los equipos en prueba y de las instalaciones de la GRB, de acuerdo con los requerimientos del fabricante "Degremont" y las buenas prácticas HSE de la Gerencia de la Refinería de Barrancabermeja (GRB); Asegurando un suministro continuo y con calidad de nuestros productos.

2. GLOSARIO

- **Agua cruda:** Agua captada de una fuente hídrica natural sin ningún tratamiento físico o químico previo.
- **Agua Clarificada:** Agua a la cual fue retirada parcialmente la turbiedad.
- **Bomba de vacío (Soplador):** Equipo rotativo de generación de vacío en la campana de vacío.
- **Campana de vacío:** Sector del clarificador en donde se produce la generación de vacío para levantamiento y liberación de la columna de agua, denominados también (generación y rompimiento).
- **Captación:** Se denomina a la toma de agua cruda de las fuentes hídricas naturales por medio de equipos de bombeo.
- **Clic:** Oprimir el botón del mouse ubicando antes el cursor de la pantalla sobre la zona deseada.
- **Coagulación:** Es el proceso de desestabilización de las cargas negativas que contienen las partículas en suspensión o coloidales y con la adición de reactivos químicos quienes adicionan las cargas positivas o cationes y ocasionan una anulación de las fuerzas de repulsión de dichas partículas disminuyendo su solubilidad y favoreciendo así su precipitación posterior.
- **Concentradores de lodo:** Cavidades dispuestas entre las piscinas de los clarificadores para retirar el lodo removido en el manto por acción de las pulsaciones.
- **EPP:** Elementos de protección personal
- **Floculación:** Es el proceso de aglomeración de partículas descargadas eléctricamente, al colocarse en contacto unas con otras creando flóculos por medio de la adición química del ayudante de floculación y cuyo objetivo es el de aumentar el volumen, peso y la cohesión de los flóculos formados anteriormente.
- **GCH:** (Guía de control alta) La guía de control indica los parámetros de las variables críticas de control que lo guían hacia el control dentro de los valores admisibles y permiten asegurar una operación segura, confiable y eficiente.
- **GCL:** (Guía de control baja) la guía de control indica los parámetros de las variables críticas de control que lo guían hacia el control dentro de los valores admisibles y permiten asegurar una operación segura, confiable y eficiente.
- **Guía de control (GC):** La guía de control indica al operador los parámetros de las variables críticas de control que lo guían hacia el control dentro de los valores admisibles y permiten asegurar una operación segura, confiable y eficiente.
- **Mezcla:** Es la mezcla en proporción variable de agua captada del río Magdalena y de la Ciénaga San Silvestre.
- **Obra de llegada:** Cisterna de mezcla de aguas crudas equipada con un sistema de medición y control de nivel (LIC 29032) e indicación de alarmas en el tablero por alto y bajo nivel.
- **OP:** Operador patio de aguas.
- **Probeta:** Tubo de plástico o cristal, graduado, con pie o sin él, cerrado por un extremo y destinado a contener líquidos o gases y sirve para medir volúmenes.
- **Sedimentación:** Es el proceso de separación de sólidos suspendidos con el agua o partículas suspendidas floculadas en el proceso de clarificación por acción de la gravedad.
- **TA:** Tablerista de la planta de aguas.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

Turbiedad: es la cantidad de solidos suspendidos presentes en el agua y se mide en NTU (Unidades Nefelométricas).

Válvulas rompe vacío: Válvulas accionadas por servomecanismo para conexión de la campana de vacío con la atmosfera.


Ventana operativa de integridad (VOI): La ventana operativa indica al operador los parámetros de las variables críticas de control definidos que no deben ser excedidos porque podrían ocasionar incidentes a personas, ambiente, equipos, instalaciones y/o la comunidad.

Vertedero: Sector del clarificador donde se produce un caída del agua que genera turbulencia para que se homogenice la mezcla con el floculante.

VOH: (Ventana operativa alta) Máximo valor permisible de operación de un equipo antes de llegar a afectar su integridad.

VOL: (Ventana operativa baja) mínimo valor permisible de operación de un equipo antes de llegar a afectar su integridad.

Zona de reacción: Sección del clarificador donde se realiza la mezcla rápida del agua cruda con el coagulante.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C	
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE	
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015



• **FIGURA A.** Clarificador CL-2911

3. CONDICIONES GENERALES

3.1. Frecuencia de Revisión y de Ciclo de Trabajo

- Próxima revisión: 20/12/2018
- Ciclo de trabajo cada dos años.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

3.2. Valoración RAM


- M.

3.3. Peligros, Riesgos y Controles de Seguridad

- Se pueden presentar caídas a nivel de plataforma y/o desde las escaleras de peldaños que comunican el cuarto de control con el área de las bombas, por lo cual el desplazamiento por las escaleras debe realizarse tomado de los pasamanos, sin prisa y sin saltarse la secuencia de los escalones de la misma.
- Transitar por plataformas fijas a más de 1.5 metros sobre el piso puede representar caídas de altura, por lo cual se debe verificar el estado de las mismas al momento de desplazarse por ellas.
- Presencia esporádica de material particulado en el entorno, puede ocasionar contacto de cuerpo extraño en el ojo y afectación respiratoria por inhalación del material particulado, se debe portar la máscara con filtro para polvos y humos.
- Presencia de gases tóxicos (H₂S, SO₂, CO Y CLORO) que puede causar intoxicación por inhalación de los mismos, por lo cual se debe portar con la máscara con filtros para vapores orgánicos e inorgánicos.
- Desplazamiento por superficies irregulares, desniveladas y húmedas pueden ocasionar golpes o caídas que generen lesiones menores, contusiones y fracturas, por lo cual se deben identificar y/o señalizar las áreas que pueden generar caídas por derrames de productos químicos (ayudante de floculación), humedad, aceite o desnivel. Identificar rutas peatonales, las cuales estén despejadas y libres de obstáculos. Uso adecuado de los EPP básicos.

3.4. Aspectos, Impactos y Controles Ambientales

- Fugas o escapes de productos químicos por bombas, líneas o empaques impactando el sistemas de aguas lluvias; se debe evitar que el derrame se extienda y sea drenado al sistema de aguas lluvias o aceitosas y contenerlo con trapos o algún medio absorbente.
- Drenajes excesivos de agua con lodos sobrecargando las piscinas de decantación de lodos y el vertimiento al caño madre vieja; se debe garantizar el buen mantenimiento a las piscinas de decantación
- Fugas o escapes de agua cruda y con químicos por líneas de suministro; pueden ocasionar que se aumente la captación de las fuentes hídricas naturales y el vertimiento a los separadores, al igual que aumentaría el retorno a los efluentes en condiciones no aptas.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

3.5. Referencias

- Manual de operación de los Clarificadores
- Manual de descripción de procesos: ECOGRB-PIB-MDPU-CA03
- DGC Diagrama Grande de control sección Agua: ECO-GCB-SIBA-AGUAS-DGC
- P&ID: Agua clarificada área Balance GRB-5206207-209001-ID-PR-PL-701
- MSDS: Sulfato de aluminio.
- MSDS: Ayudante de floculación. Floctreat WW9504.
- MSDS: Polímero de floculación. Fongrafloc W70
- MSDS: Cloro
- Tabla de aforo de bombas de dosificación de sulfato de aluminio y ayudante de floculación.

3.6. Equipo Personal de Protección


- Casco, protección auditiva, gafas de seguridad, camisa manga larga, pantalón u overol, botas de seguridad, guantes de vaqueta.

3.7. Recursos Materiales

- Agua cruda de la ciénaga san silvestre
- Agua cruda del rio Magdalena
- Sulfato de aluminio
- Ayudante de floculación. Floctreat WW9504
- Polímero de floculación. Fongrafloc W70
- Aire Industrial
- Cloro
- DCS planta de aguas
- Cronometro
- Probeta de 1000 mL.
- Bomba de dosificación de sulfato de aluminio.
- Bomba de dosificación de ayudante de floculación
- Sistema de dosificación de cloro (clorador)
- Sopladores o moto aspiradores.
- Bombas centrifugas para retiro de agua clarificada.
- Aceite lubricante turbina ISO68
- Aceite
- Radio de comunicaciones

3.8. Datos de Diseño

- Tipo: Superpulsador, rectangular de manto de lodos.
- Modelo: Superpulsator Clarifier
- Marca : Degremont

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

- Fabricante: Infilco Degremont Inc.
- CL-2911A/B/C Capacidad: 3416 gpm.
- Tipo de carga: Agua cruda de ciénaga y de Rio.

3.9. Sistemas de Protección


- Interruptor(switch) de apertura total de la válvula de succión al cabezal localizado a la salida de los pozos claros, el cual propende porque no se arranque una bomba con succión restringida.

3.10. Lazos de Control

- Control de nivel de la obra de llegada LIC-29030
- Válvulas de control de nivel de la obra de llegada LCV-29030A/B.(ubicada en la línea del lago)
- Alarmas visuales y audibles por alto y bajo nivel de la obra de llegada LSH-29032/LSL-29033
- Alarma de baja presión en las líneas de llegada de agua cruda PSL-29013/14 calibrada a 30 psi
- Unidad para selección manual de la relación, en porcentaje, flujo agua río/flujo total agua cruda, MIC 29030 controlada con la válvula FV-29030 (Ubicada en la línea del Rio)
- Controlador de los tiempos para la extracción de lodos que actúan las válvulas COV-29030/31/32 A/B/C.
- Controlador de secuencias en los tiempos de generación y rompimiento del vacío que actúan sobre dos válvulas solenoides para conexión de la cámara de vacío con la atmósfera, SV 29039/ 43 A/B/C
- Un soplador o moto aspirador para creación de vacío en la cámara central, MP-2923 A/B/C, de operación continua y sin servomecanismo.
- Control e indicación de nivel de los pozos claros, LIC-29031 A/B/C
Alarma por bajo nivel del pozo claro, LSL 29036 A/B/C.

TABLA N°1. Guías de control y ventanas operativas de las variables de clarificación.

VARIABLE	UNIDADES	GCH	GCL	VOH	VOL
pH agua de rio		8,8	5	9	3
Turbiedad agua de Rio	NTU	8000	0	10000	0
Alcalinidad agua de rio	ppm	100	50	120	25
Color agua de rio	U color	4000	0		
Hierro agua de rio	ppm	100	0		
pH agua de lago		8	4,5	9	4
Turbiedad agua de lago	NTU	1000	0	1200	0
Alcalinidad Agua de lago	ppm	40	10	50	5
Color agua de lago	U color	1000	0		

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C				
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE				
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015		Versión:1	

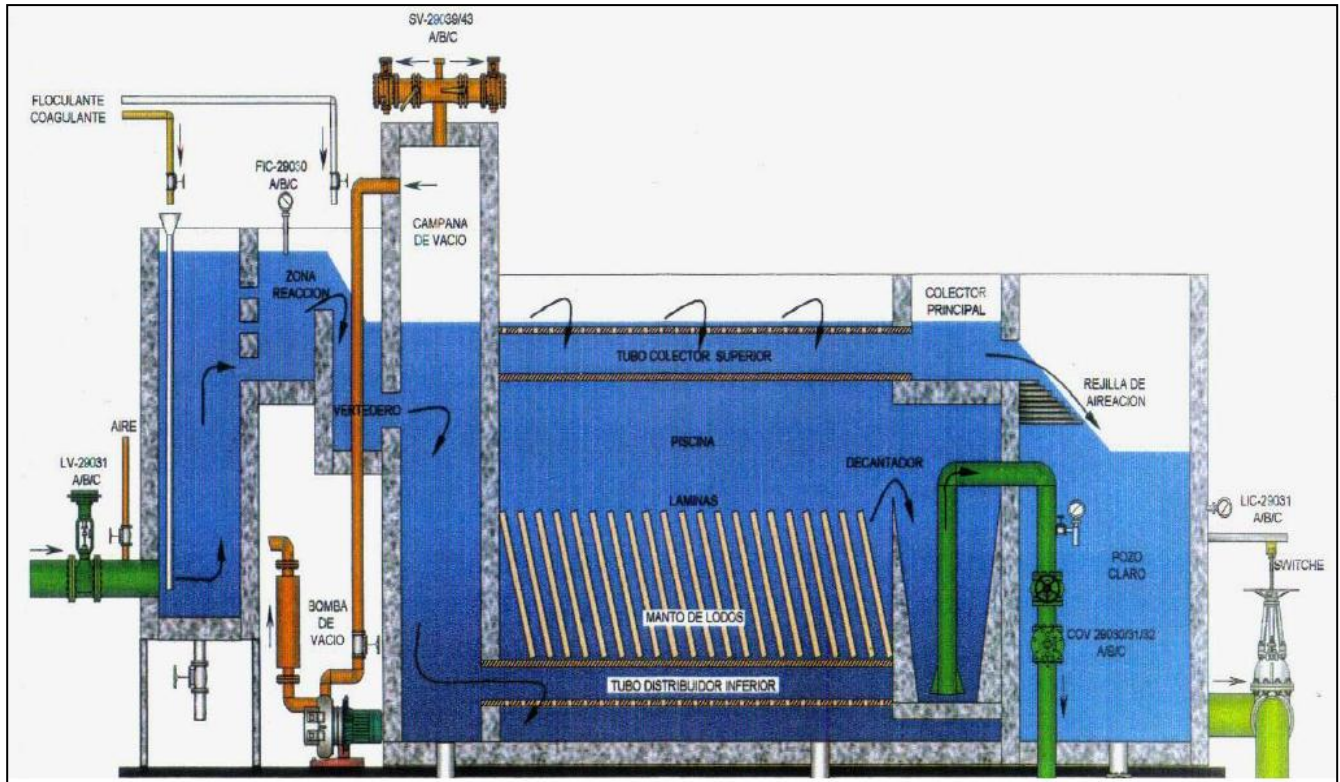
Hierro agua de lago	ppm	100	0		
pH agua clarificada		6,5	5,5	7	5
Alcalinidad agua clarificada	ppm	15	5	20	3
Turbiedad agua clarificada	NTU	5	1	7	0,5
Aluminio agua clarificada	ppm	0,15	0		
Hierro agua clarificada	Ppm	0,2	0	0,25	0

TABLA N°1. Guías de control y ventanas operativas de las variables de clarificación.

VARIABLE	UNDS	GCH	GCL	VOH	VOL
Color agua clarificada	U color	120	0		
Residual cloro libre en el agua cruda	Cl	0,3	0,2		
Dosis de ayudante de floculación	ppm	0,2	0,1	0,25	0,05

3.11. Diagramas y Planos

- DGC Diagrama Grande de control sección Agua: ECO-GCB-SIBA-AGUAS-DGC
- P&ID: Agua clarificada área Balance GRB-5206207-209001-ID-PR-PL-701



• **FIGURA II.** Partes internas de un clarificador Súper pulsador CL-2911.

3.12. Descripción de Equipos y Sistemas Conectados

- SP-2923A/B/C: Bombas de vacío o sopladores.
- SP-2911A/B: Bombas centrifugas para el sistema de baja presión (agua de restitución a las torres enfriadoras TE-2940/45).
- SP-2910C/D/E: Bombas centrifugas para el sistema de alta presión (sistema de agua para los sellos de las bombas de la refinería).
- SP-2936A/B: Bombas centrifugas para la planta Biodiesel (agua de restitución a torre enfriadora).
- BA-2910: Obra de llegada.
- Clorador Obra de llegada. Rotámetro para la dosificación de cloro en la obra de llegada.
- SP-2912A/B: Bombas de retiro de lodo proveniente de los clarificadores a las piscinas de decantación.
- SP-2913 A/D: Bombas de dosificación de Cal.
- SP-2914A/B/C/D: Bombas de dosificación de sulfato de aluminio a los clarificadores.
- SP-2915A/B/C/D: Bombas de dosificación de ayudante de floculación a los clarificadores.
- SD-2911: Drum de almacenamiento de Cal

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

- SD-2912A/B: Drum de almacenamiento de Ayudante de floculación.
- SD-2915A/B: Drum de almacenamiento de sulfato de aluminio.

3.13. Descripción Básica del Sistema

- El sistema de clarificación del área de servicios industriales balance cuenta con tres clarificadores tipo súper pulsador de manto de lodo marca DEGREMONT, denominados CL-2911A/B/C con capacidad cada uno de 3416 GPM para una capacidad total instalada de 10248 GPM.

En operación normal trabajan dos clarificadores, uno que alimenta el sistema de alta presión y el otro alimenta el sistema de baja presión y el tercero se deja disponible para entrar en servicio cuando se va a realizar el lavado de uno de los que se encuentran operando por cumplimiento en el flujo de agua tratada. Las señales de monitoreo de estos equipos están centralizadas en el cuarto de control de planta de aguas de la unidad de balance, de donde el tablerista de aguas realiza el monitoreo de sistemas y variables, los ajustes de dosificación y la relación de la mezcla de los efluentes que alimentan la obra de llegada que a su vez suministra el agua para ser tratada en los clarificadores.

Los clarificadores reciben de la obra de llegada el suministro de agua cruda que proviene una parte del Rio Magdalena y la otra de la Ciénaga San Silvestre.


Una vez ingresado el suministro de agua a cada clarificador se le adicionan los químicos necesarios que establecen las condiciones adecuadas para facilitar la remoción de la turbiedad del agua cruda y mediante pulsaciones generadas por un moto aspirador que genera el vacío en una cámara y que eleva una columna de agua a cierta altura y posteriormente la deja caer generando una fuerza hidráulica que impulsa el flujo de agua y lo direcciona a través de tuberías desde la parte inferior de las piscinas de los clarificadores y que con el choque generado contra las láminas, ocasiona que los flocs pierdan energía y sean precipitados por efecto de su peso y la gravedad; este movimiento hidráulico del sistema permite que se cree en las piscinas una acumulación de lodos llamada manto de lodos el cual con el aumento de su consistencia forma un filtro natural que retiene los flocs del agua que va ascendiendo y del cual al ser atravesado permite que el agua salga con menos cantidad de flocs; posteriormente con el efecto generado con las láminas mencionado anteriormente se terminan de decantar los flocs que no fueron retenidos por el manto de lodos, obteniendo como resultado agua con bajos valores de turbiedad la cual es direccionada por los tubos colectores, colector principal y finalmente direccionada al pozo claro en donde es homogenizada y almacenada para generar una cabeza de succión a las bombas que posteriormente son las encargadas de distribuirla a los dos sistemas; el sistema de alta presión que con las bombas SP-2910C/D/E es el encargado de proveer el agua para los sistemas de sello de los equipos de la refinería, con las bombas SP-2936A/B se encarga de suministrar agua a la planta de Biodiesel para restitución de nivel a una torre de enfriamiento y el sistema de baja presión que con las bombas SP-2911A/B se encarga de restituir el agua para mantener el nivel de las piscinas de las torres enfriadoras TE-2940 y TE-2945.

3.14. Requisitos o Precondiciones

- Haber realizado la lista de chequeo de arranque del clarificador.
- Disponibilidad de válvulas rompe vacío SV-29039A/B/C y SV-29043A/B/C
- Disponibilidad de moto aspiradores SP-2923A/B/C
- Disponibilidad de válvulas de los sedimentadores COV-29030A/B/C, COV-29031A/B/C, COV-29032A/B/C

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

- Disponibilidad de bombas de dosificación de Sulfato de Aluminio SP-2914/A/B/C/D
- Disponibilidad de bombas de dosificación de Ayudante de floculación SP-2915A/B/C/D
- Disponibilidad de bombas de dosificación de Cal SP-2913A/D
- Pulsaciones en modo OFF (Tiempo de apertura y cierre de las válvulas de Generación y rompimiento SV-29039A/B/C y SV-29043A/B/C)
- Purgas de los sedimentadores o decantadores en modo OFF(Tiempos de apertura de las válvulas COV-29030A/B/C, COV-29031A/B/C, COV-29032A/B/C)
- Drenaje del pozo claro abierto.
- Lazo del control de nivel del pozo claro en modo manual.
- Prueba de jarras.
- Equipos que protección personal básicos y los establecidos en la matriz de EPPS del Departamento de servicios industriales del área de balance para manejo de sustancias químicas.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

4. DESARROLLO

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
SI = √	PLAN 1 REALIZAR COMUNICACIONES.				
	Coordine con el operador de patio de aguas la actividad que se va a realizar, al radio 1369.	TA	E	M	Incidentes operacionales por descoordinación de la actividad
	Comuniqué al supervisor HSE de planta eléctrica al radio 227.	TA	E	L	Desconocimiento de la actividad por parte del supervisor de operaciones.
SI = √	PLAN 2 LAVAR LINEAS DE DOSIFICACIÓN DE QUIMICOS.				

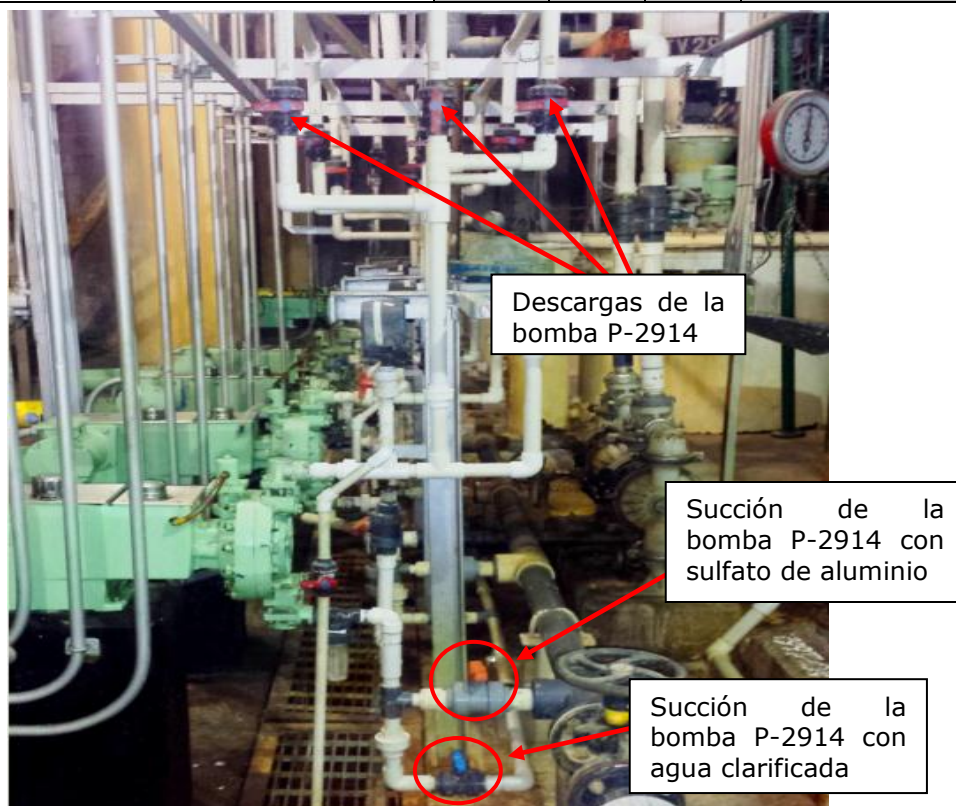


FIGURA 1. Sistema de dosificación de sulfato de aluminio.



INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C

**REFINACIÓN
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE**

RFN-I-1063

**Elaborado
20/12/2015**

Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
	Lave la línea de dosificación de sulfato de aluminio al clarificador; Para ello, alinee la succión de la bomba P-2914 con agua clarificada, asegurándose de abrir la descarga de la misma, y la válvula de su respectivo inyector de alumbre (ver figura 1 y 3). Seguidamente ponga en servicio una de las bombas P-2914 A/B/C/D, pasando el selector de la misma a la posición "ON" (ver figura 5).	OP	E	L	No es posible realizar el lavado de la línea de dosificación de sulfato de aluminio.

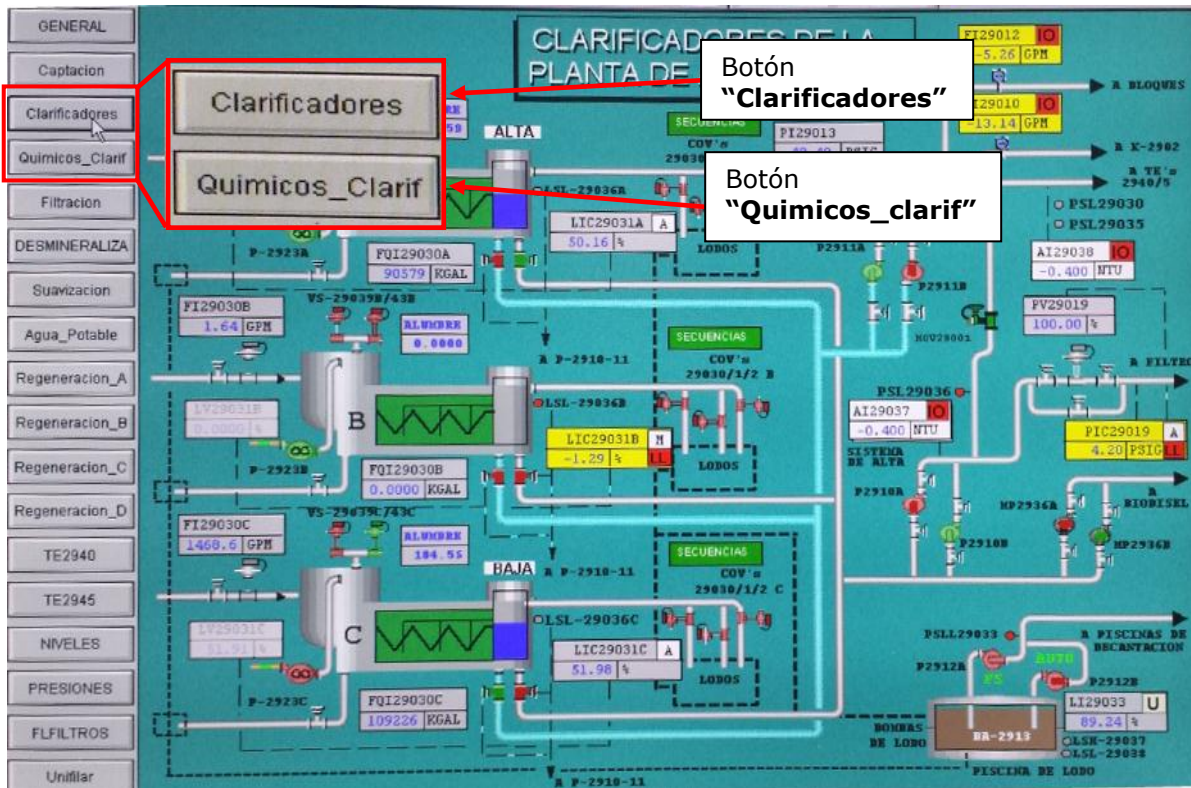



FIGURA 2. Grafico "CLARIFICADORES DE LA PLANTA DE AGUA U-2900".

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
	<p>Ajuste el tiro de la bomba P-2914 a 100% desde el tablero; Para ello, acceda al grafico "QUIMICOS DE CLARIFICACION", dando clic sobre el botón "Quimicos_clarif", ubicado en el menú izquierdo de la pantalla (ver figura 2). Posteriormente de clic sobre el recuadro gris "AV29030 A, B o C", y en la ventana "CARGA DEL AGUA COAGULADA U2900" que se despliega, de clic en el recuadro de porcentaje de salida del tiro de la bomba, y verifique que aparezca un cuadro amarillo en su entorno, posteriormente de clic en la barra de digitación, la cual se tornara de color azul. Seguidamente digite el valor 100 y presione la tecla "ENTER" del teclado alfanumérico (ver figura 4).</p>	TA	E	L	No es posible realizar un lavado efectivo de la línea de dosificación de sulfato de aluminio.





INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C

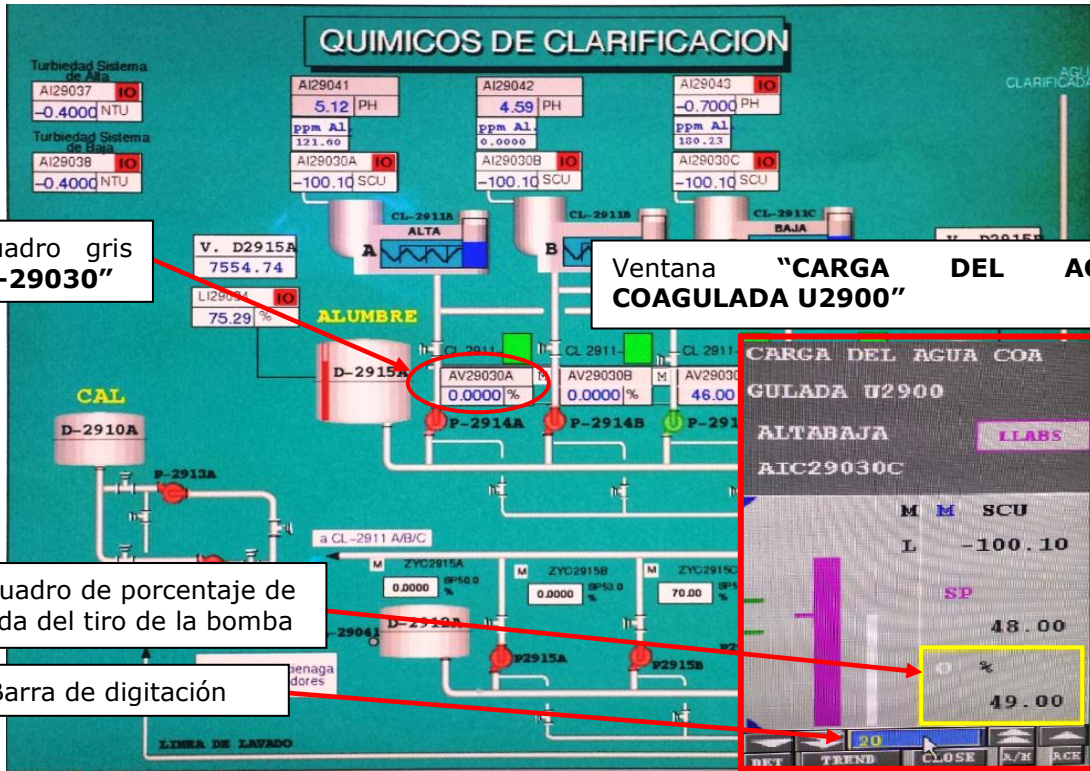
**REFINACIÓN
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE**

RFN-I-1063

**Elaborado
20/12/2015**

Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	



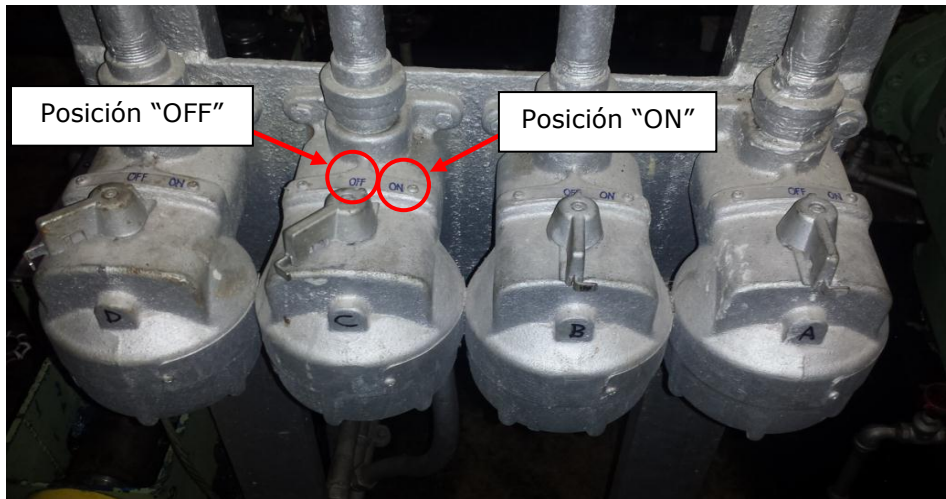
Recuadro gris "AV-29030"

Ventana "CARGA DEL AGUA COAGULADA U2900"

Recuadro de porcentaje de salida del tiro de la bomba

Barra de digitación


FIGURA 4. Grafico "QUIMICOS DE CLARIFICACION".



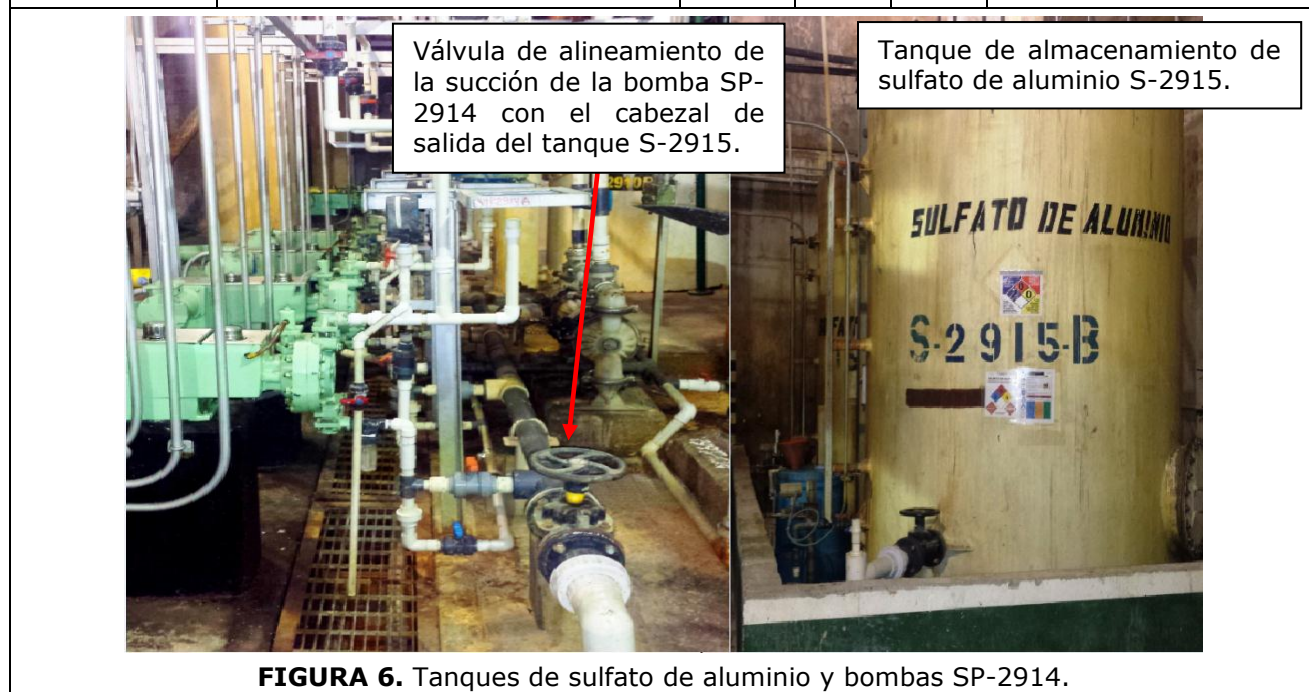
Posición "OFF"

Posición "ON"

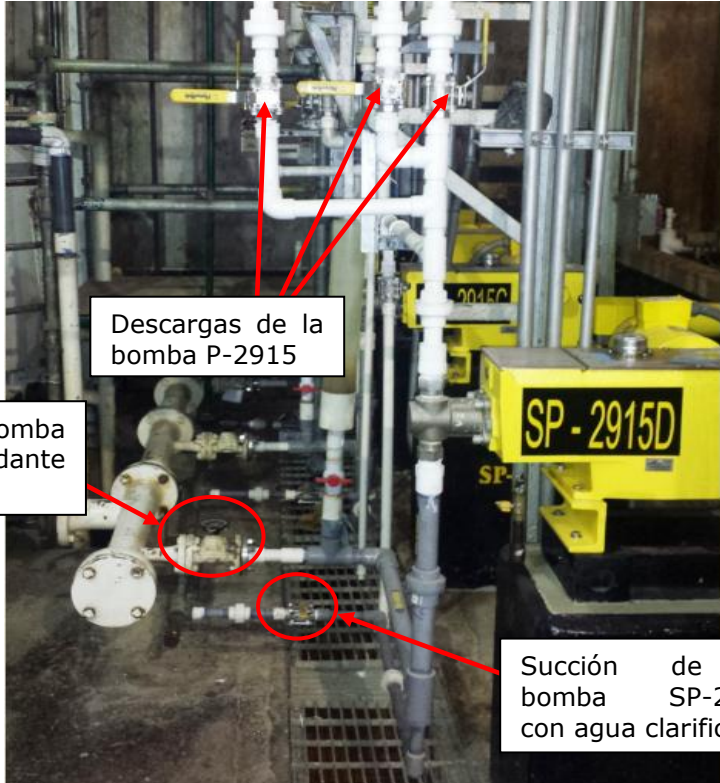
FIGURA 5. Selectores de puesta en marcha de las bombas P-2914 A/B/C/D.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
	Verifique que ha culminado la limpieza de la línea de sulfato de aluminio, transcurridos cinco minutos desde el inicio del lavado de la línea. Para ello, alinee la facilidad de dosificación de alumbre de la zona de reacción, verificando que el flujo de agua sea adecuado, estable y claro (ver figura 3) .	OP	P	M	Esguince de miembros inferiores al desplazarse por las escaleras que conducen de la parte baja del clarificador a la zona de reacción del mismo. No se garantiza que se removió totalmente los residuos de la línea de dosificación de sulfato de aluminio.
	Suspenda el lavado de la línea de dosificación de sulfato de aluminio con agua clarificada, y alinee la succión de la P-2914 A/B/C/D con alumbre proveniente del tanque S-2915 (ver figura 6) .	OP	E	L	No se podrá suministrar sulfato de aluminio a la zona de mezcla rápida.



	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
					
	<p>Lave la línea de dosificación de ayudante de floculación al clarificador; Para ello, alinee la succión de la bomba P-2915 con agua clarificada, asegurándose de abrir la descarga de la misma, y la válvula de su respectiva flauta de dosificación (ver figura 7).</p> <p>Seguidamente ponga en servicio una de las bombas P-2915 A/B/C/D, pasando el selector de la misma a la posición "ON" (ver figura 8).</p>	OP	E	L	No es posible realizar el lavado de la línea de dosificación de ayudante de floculación.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	

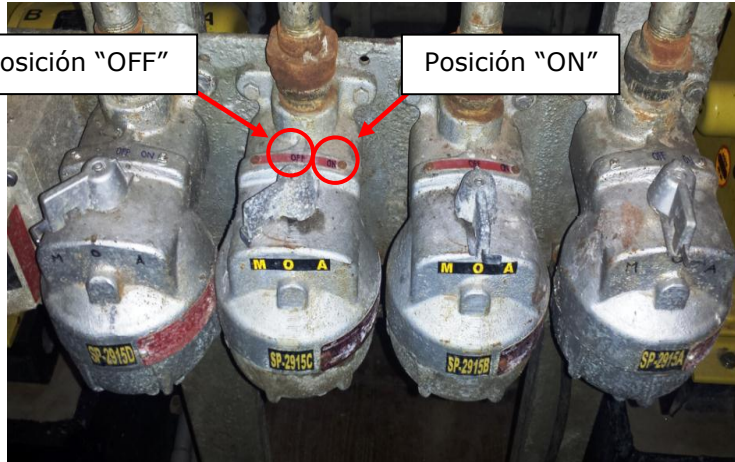


FIGURA 8. Selectores de puesta en marcha de las bombas P-2915A/B/C/D.

	<p>Ajuste el tiro de la bomba P-2915 a 100% desde el tablero; Para ello, acceda al grafico "QUIMICOS DE CLARIFICACION", dando clic sobre el botón "Quimicos_clarif", ubicado en el menú izquierdo de la pantalla (ver figura 2). Posteriormente de clic sobre el recuadro "ZYC2915 A, B o C", y en la ventana "CONTROLADOR POS" que se despliega, de clic en el recuadro de porcentaje de salida del tiro de la bomba, y verifique que aparezca un cuadro amarillo en su entorno, posteriormente de clic en la barra de digitación, la cual se tornara de color azul. Seguidamente digite el valor 100 y presione la tecla "ENTER" del teclado alfanumérico (ver figura 9).</p>	TA	E	L	No es posible realizar un lavado efectivo de la línea de dosificación de ayudante de floculación.
--	--	----	---	---	---



INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C

**REFINACIÓN
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE**

RFN-I-1063

**Elaborado
20/12/2015**

Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	

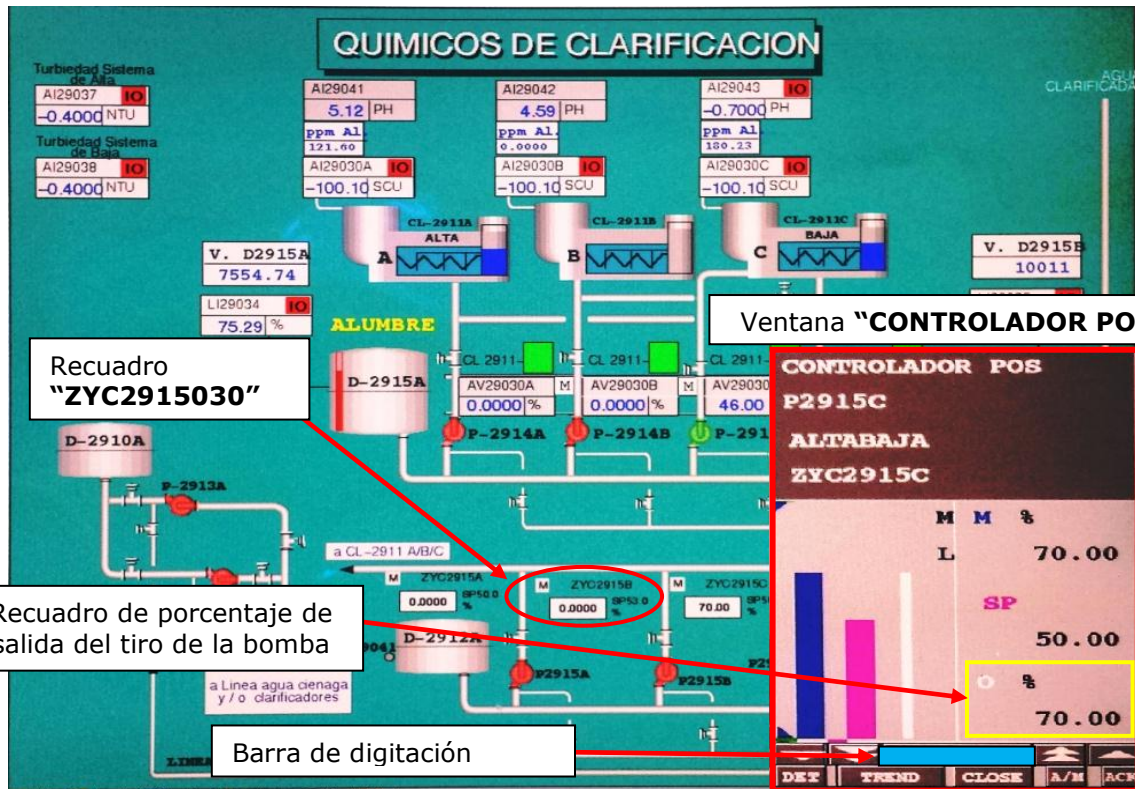


FIGURA 9. Grafico "QUIMICOS DE CLARIFICACION".

	<p>Verifique que ha culminado la limpieza de la línea de ayudante de floculación, transcurridos cinco minutos desde el inicio del lavado de la línea. Para ello, verifique que el flujo de agua sea adecuado, estable y claro (ver figura 10). Posteriormente suspenda el lavado, y alinee la succión de la P-2915 A/B/C/D con ayudante de floculación proveniente del tambor D-2912 A o B (ver figura 11).</p>	OP	E	L	<p>No se garantiza que se removió totalmente los residuos de la línea de dosificación de ayudante de floculación.</p>
--	---	----	---	---	---

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	



FIGURA 10. Línea de llegada de suministro de ayudante de floculación al clarificador.

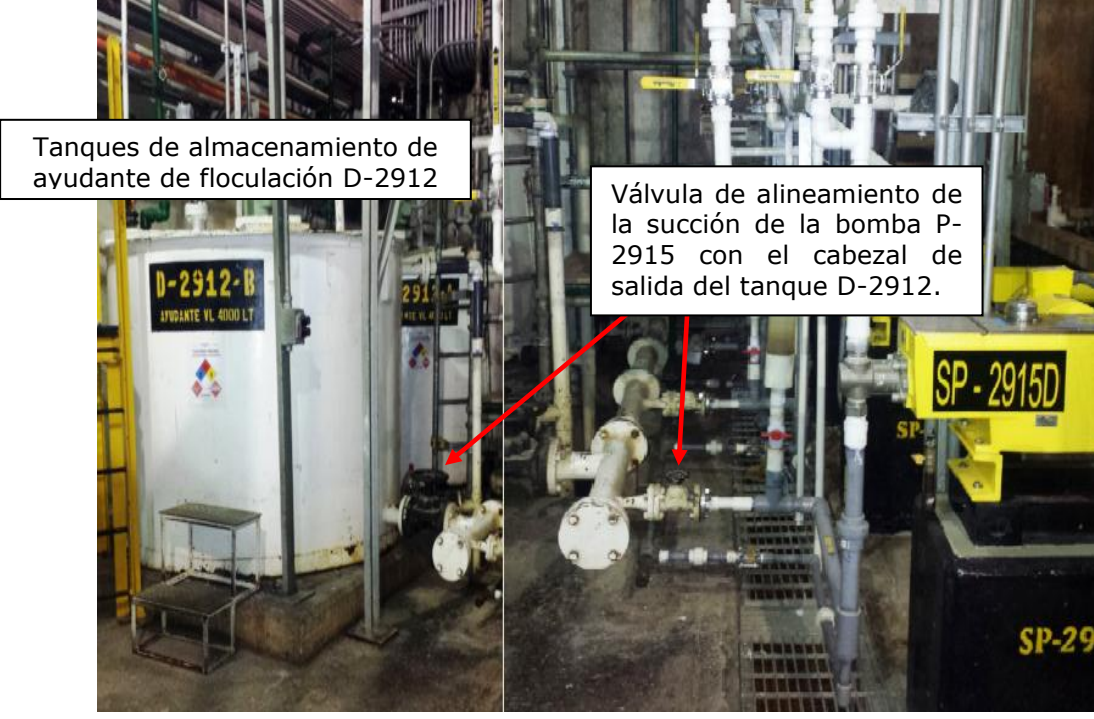



FIGURA 11. Tanques de ayudante de floculación y bombas P-2915.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
SI = √	PLAN 3 ACONDICIONAR EL CLARIFICADOR.				
	Habilite en campo la entrada de agua cruda proveniente de la obra de llegada al clarificador; abriendo la válvula bloque antes de la LV-29031 de control de nivel del clarificador (ver figura 12).	OP	E	L	No ingresara agua cruda al clarificador.
	Acceda al grafico "CLARIFICADORES DE LA PLANTA DE AGUA U-2900" dando clic sobre el botón "Clarificadores" , ubicado en el menú izquierdo de la pantalla (ver figura 2).	TA	E	L	No se podrán dar comandos a las válvulas ni se podrá monitorear las variables del clarificador.

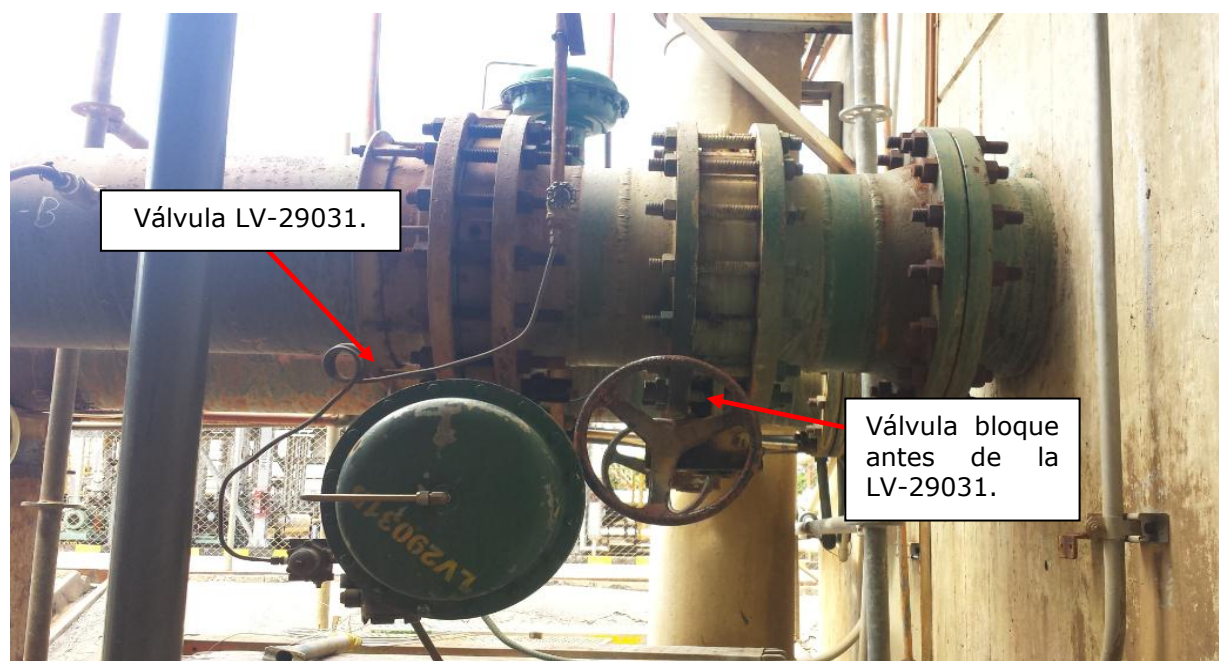

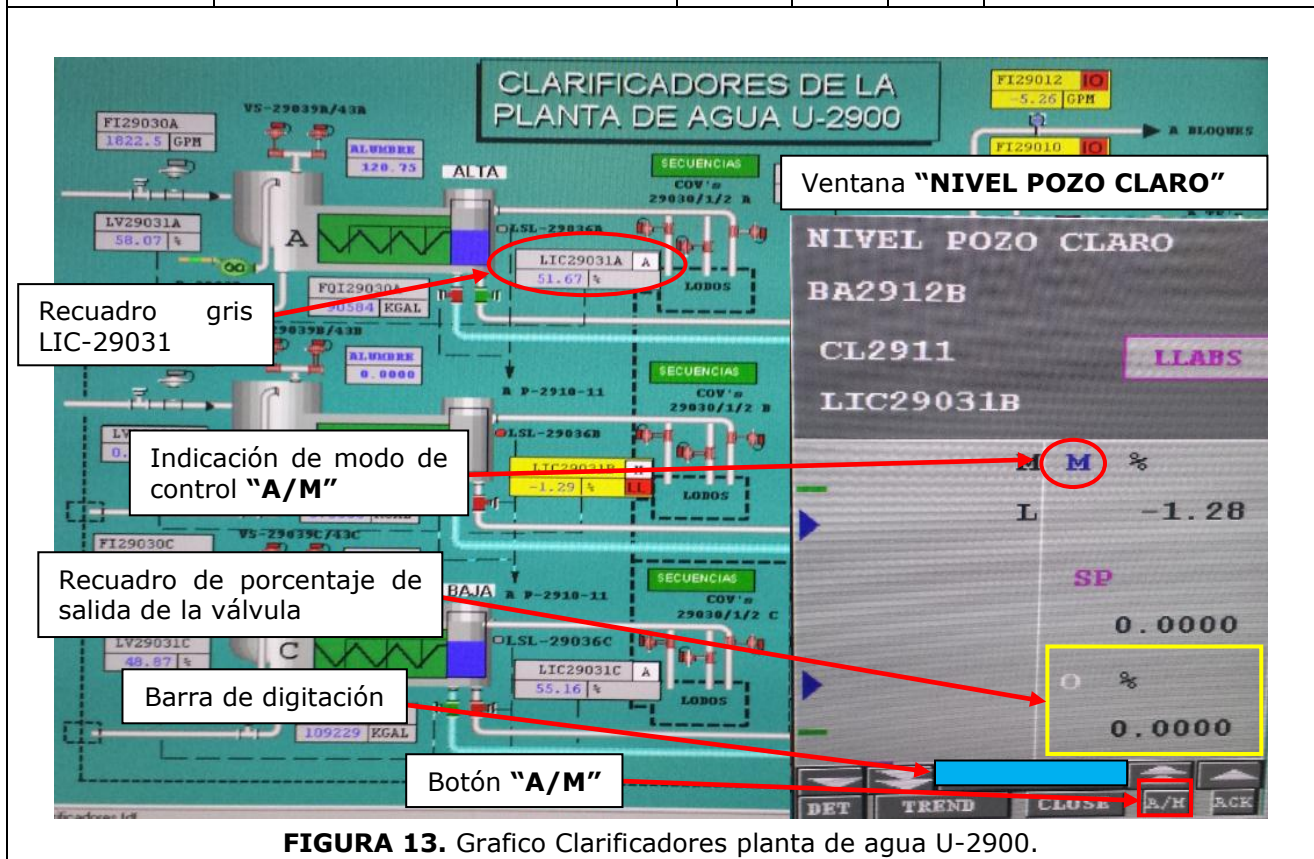



FIGURA 12. Salida de agua de la obra de llegada hacia el clarificador.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
	<p>Pase a modo manual el control de nivel del clarificador; dando clic sobre el recuadro gris "LIC-29031", y en la ventana "NIVEL POZO CLARO" que se despliega, de clic sobre el botón "A/M"; posteriormente confirme que la indicación de modo de control, cambie de "A" (automático) a "M" (manual) (ver figura 13).</p>	OPT	E	L	No se puede manipular la salida de la LCV-29031.




	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
	Abra la "LCV-29031" del clarificador y ajuste 300 gpm. Para ello, de clic en el recuadro de porcentaje de salida de la válvula "NIVEL POZO CLARO" y verifique que aparezca un cuadro amarillo en su contorno. Posteriormente de clic en la barra de digitación, la cual se tornara de color azul; inmediatamente digite el valor que desee y presione la tecla "ENTER" en el teclado alfanumérico. Confirme que el flujo de agua cruda llegue a 300 gpm en el "FI-29030", sino se alcanza realice el ajuste a hasta lograrlo (ver figura 13).	OPT	E	L	No iniciará la entrada de agua cruda de la obra de llegada al clarificador.
	Inicie adición de sulfato de aluminio según tabla de dosificación y aforo de las bombas P-2914, siguiendo el paso 2.2 para ajustar una dosis de coagulante de 123 ppm para 300 gpm de agua cruda.	TA	E	L	No se suministrara la dosis adecuada de sulfato de aluminio para el proceso de clarificación.
	Inicie adición de ayudante de floculación según tabla de dosificación y aforo de las bombas P-2914, siguiendo el paso 2,6 para ajustar una dosis de 0,15 ppm para 300 gpm de agua cruda.	OP	E	L	No se podrá suministrar ayudante de floculación en la zona reacción.

NOTA

Mantenga la rata de llenado del clarificador (300 gpm), y las dosis de coagulante y ayudante de floculación citadas en los pasos anteriores, hasta que las piscinas del mismo se llenen completamente.

Si tiene dudas acerca de la eficiencia de las P-2914/15, realice un aforo de ellas.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
	2.7 Incremente el flujo de agua de cruda, cuando las piscinas del clarificador se hallan llenado completamente (ver figura 14). Para ello, abra la válvula "LCV-29031" con forme al paso 3.4, a razón de 100 gpm/hr hasta lograr 1000 gpm; manteniendo la dosis de alumbre y de ayudante de floculación en 123 y 0.15 ppm respectivamente, con forme a los pasos 2.2 y 2.6.	OPT	E	L	No iniciará la entrada de agua cruda de la obra de llegada al clarificador.

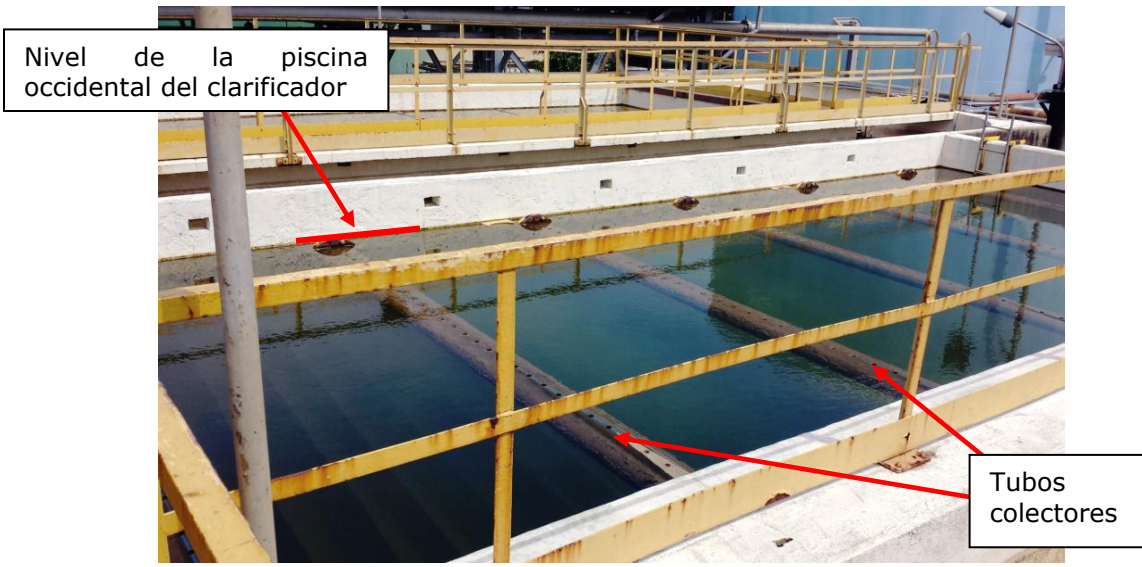


FIGURA 14. Piscina del clarificador CL-2911.

	2.8 Verifique el flujo de entrada de agua cruda al clarificador con la regleta metálica; para ello, sumérjala y apóyela en la lámina de paso del vertedero, seguidamente tome la medida de flujo que el nivel de agua indica (ver figura 15).	OP	E	L	No se evidenciará una posible desviación entre el transmisor de flujo y el flujo real de agua cruda.
--	--	----	---	---	--

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	

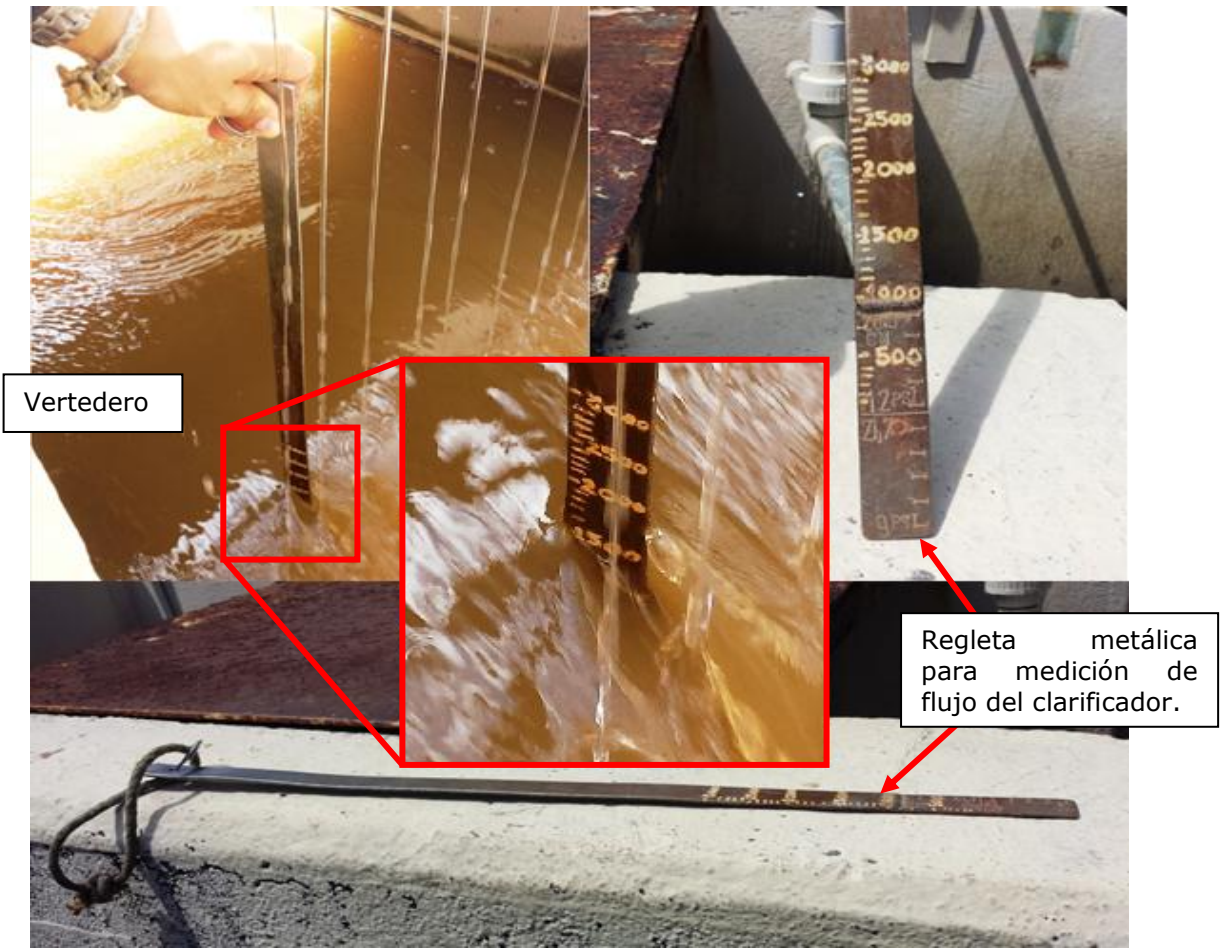


FIGURA 15. Medición de flujo del clarificador con la regleta.

	<p>2.9 Habilite el sistema para toma de muestras del clarificador; cebando la línea que succiona el agua de salida del colector principal ubicada junto a la rejilla de aireación; inyectando con una manguera agua en contraflujo desde él toma muestras de agua de río (Ver figura 18).</p>	OP	E	L	No se podrá tomar muestra del agua de salida del clarificador.
--	--	----	---	---	--


	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1


CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	



FIGURA 18. Líneas para toma de muestras.

	2.10 Monitoree variables químicas del agua de salida del clarificador (pH>5 y NTU<5,5).	OP	E	L	No se podrá realizar seguimiento a la calidad del agua clarificada.
	2.11 Controle el nivel del pozo claro, abriendo la válvula del drenaje del pozo claro con forme incrementa el flujo al clarificador (ver figura 19).	OP	A	L	Se rebosara el pozo claro.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
					
	FIGURA 19. Drenaje del pozo claro.				
SI = √	PLAN 4 ALINEAR PARCIALMENTE EL CLARIFICADOR.				
	Alinee parcialmente el clarificador hacia el sistema de alta, abriendo parcialmente la válvula de salida de agua del clarificador cuando el pH del efluente este por encima de 5.4 y la turbiedad por debajo de 6 NTU (ver figura 20).	OP	E	L	Se rebosara el pozo claro.
	Ponga en servicio el soplador (también llamado moto aspirador ó bomba de vacío P-2923); Para ello, oprima el pulsador de campo y abra la válvula de succión principal que proviene de la campana de vacío (ver figura 21).	OP	E	L	No se podrá generar vacío en la campana de vacío.



INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C

**REFINACIÓN
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE**

RFN-I-1063

**Elaborado
20/12/2015**

Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	

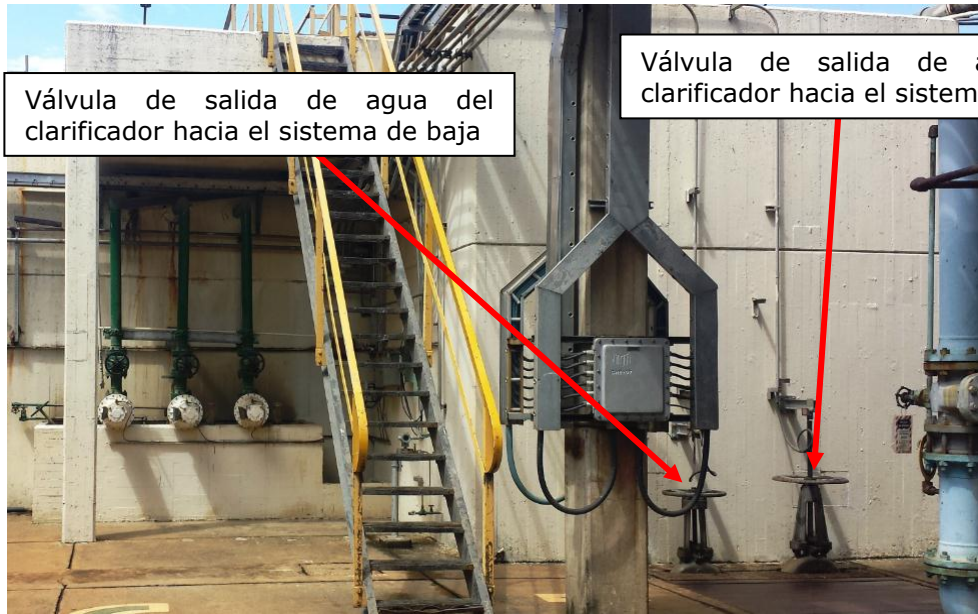


FIGURA 20. Válvulas de salida de agua del clarificador a los sistemas de alta y baja.

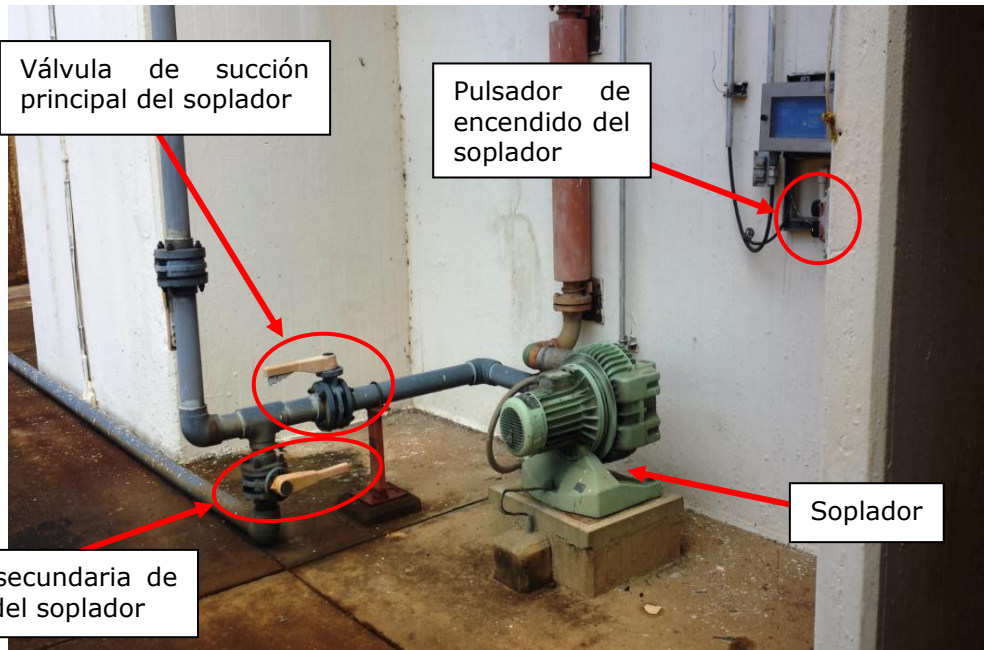



FIGURA 21. Soplador, o moto-aspirador, o bomba de vacío.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
SI = √	PLAN 5 ALINEAR PARCIALMENTE EL CLARIFICADOR.				
	Acceda al grafico "CLARIFICADORES DE LA PLANTA DE AGUA U-2900" oprimiendo el botón "Clarificadores" (Ver figura 2).	TA	E	L	No se podrá programar la secuencia de generación y rompimiento para generar la pulsación.
	Ponga pulsaciones al clarificador, para esto despliegue la ventana "CONTROL CLARIFICADOR" , dando clic sobre el botón "SECUENCIAS" ; posteriormente seleccione una válvula rompe vacío, dando clic sobre uno de los dos botones "VRV 29039" o "VRV 29043" , hasta que dicho botón cambie de color gris a verde y el botón "OFF" cambie de color rojo a gris (ver figura 22).	TA	E	L	Las válvulas rompe vacío no actuaran y no se producirán las pulsaciones.
	Ajuste el tiempo de "GENERACIÓN" y "ROMPIMIENTO" en 15 segundos; Para ello de clic en el número que se encuentra frente a cada subtítulo correspondiente hasta que desaparezca el número que se encuentra actualmente y posteriormente digite el número 15 en ambas casillas, seguidamente presione "ENTER" hasta que en ambos casillas se observe el valor de 15 (ver figura 22).	TA	E	L	El manto de lodos no se fluidizará y se compactará.



INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C

**REFINACIÓN
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE**

RFN-I-1063

**Elaborado
20/12/2015**

Versión:1

CHECK LIST	TAREAS		PELIGROS			CONSECUENCIAS
	QUIEN	TIPO	RAM			

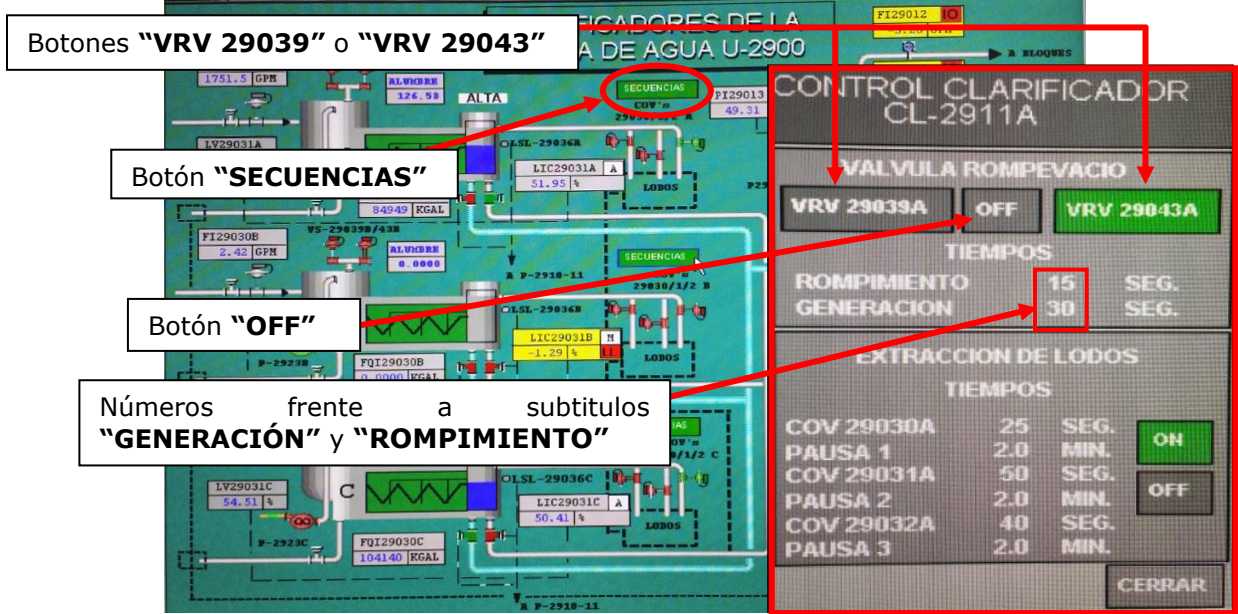



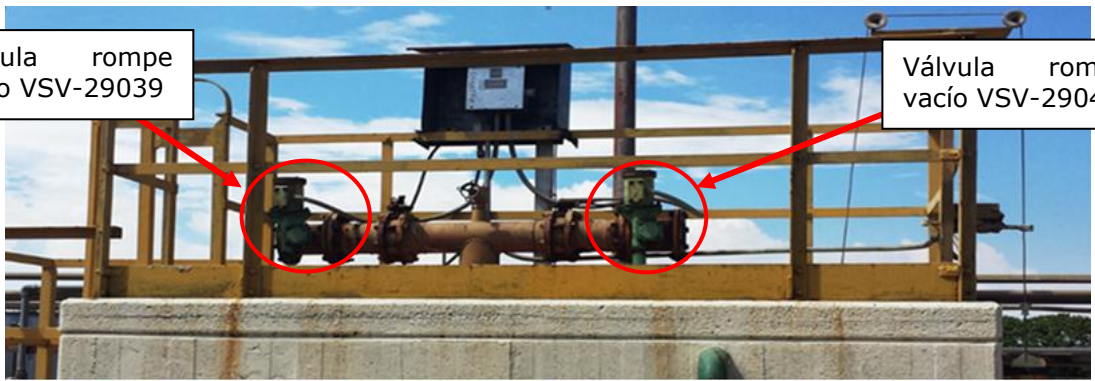
FIGURA 22. Grafico "CLARIFICADORES DE LA PLANTA DE AGUA U-2900".

	<p>Verifique en campo que la válvula rompe vacío seleccionada en el paso anterior (VSV-29039 o VSV-29043) este abriendo y cerrando correctamente, observando en la rejilla de la VSV seleccionada que comunica con la atmosfera, que el disco de la misma se mueva según los tiempos ajustados en el DCS, 15 segundos abierta y 15 segundos cerrada (ver figuras 23).</p>	OP	E	L	<p>No se puede asegurar el correcto funcionamiento de la válvula rompe vacío y por lo tanto no se producirán el rompimiento del vacío.</p>
	<p>Verifique que las dosificaciones de sulfato de aluminio y de ayudante de floculación se mantengan en 123 y 0.15 ppm respectivamente.</p>	OP	E	L	<p>No se mantendrán las condiciones de acondicionamiento del clarificador.</p>

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	

Válvula rompe vacío VSV-29039



Válvula rompe vacío VSV-29043

Posición del disco, de la válvula cerrada



Posición del disco, de la válvula abierta

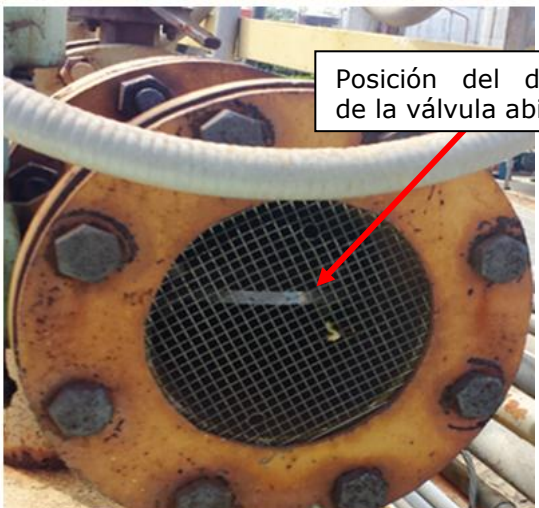




FIGURA 23. Válvulas rompe vacío VSV-29039/VSV-29043 del clarificador.


	Monitoree las variables químicas del agua de salida del clarificador (pH>5 y NTU<5,5).	OP	E	L	No se podrá realizar seguimiento a la calidad del agua clarificada.
SI = √	PLAN 6 ALINEAR TOTALMENTE EL CLARIFICADOR HACIA EL SISTEMA DE SELLOS.				
	Ajuste lentamente flujo al clarificador a razón de 100 gpm/hora conforme a lo descrito en los pasos 3.2, a 3.4.	OP	E	L	No se incrementara el flujo del clarificador.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

TAREAS		PELIGROS			CONSECUENCIAS
CHECK LIST		QUIEN	TIPO	RAM	
	Verifique flujo de entrada de agua cruda en campo con forme a lo descrito en el paso 3.8.	OP	E	L	No se evidenciará cualquier desviación entre el transmisor de flujo y el flujo real de agua cruda.
ADVERTENCIA					
<p>Tenga en cuenta que mientras realiza los ajustes de flujo al clarificador la dosis de coagulante y ayudante de floculación van a disminuir; por tal motivo, este atento a realizar los ajustes pertinentes de ellos a medida que incrementa el flujo de agua al clarificador.</p> <p>En caso de ser necesario verifique el aforo de las bombas P-2914 y P-2915, medido en la succión con probeta ya que se pueden presentar cambios en la eficiencia de las mismas o taponamientos en algunos de los componentes de los sistemas de dosificación, condición que variaría el flujo de suministro de los equipos.</p>					
	Monitoree cada dos horas las variables químicas del agua de salida del clarificador (pH > 5, NTU < 5, Al < 0,15 y Fe < 0,20);	OP	E	L	No se podrá realizar seguimiento a la calidad del agua clarificada.
	Aumente la salida de agua en el pozo claro, cada vez que incremente el flujo de agua cruda al clarificador, abriendo parcialmente la válvula de salida de agua hacia el sistema de alta (sistema de agua de sellos de la refinera). Simultáneamente cierre el drenaje del pozo claro (ver figura 19 y 20).	OP	E	L	Se rebosara el pozo claro. Perdida de agua innecesaria si se continua con el drenaje del pozo claro abierto.
	Repita de los pasos 6.1 al 6.4 hasta obtener todas las variables dentro de control y la totalidad del flujo de clarificador alineado al sistema de sello.	OP	E	L	No se realizará el total alineamiento del clarificador al sistema de sello.
SI = √	PLAN 7 REALIZAR SEGUIMIENTO A OPERACIÓN DEL CLARIFICADOR.				

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
	Acceda al grafico "CLARIFICADORES DE LA PLANTA DE AGUA U-2900" siguiendo el paso 2.2 (Ver figura 2) .	TA	E	L	No se podrá continuar con el siguiente paso.
	Pase a modo automático el control de nivel del clarificador; dando clic sobre el recuadro gris "LIC-29031" , y en la ventana "NIVEL POZO CLARO" que se despliega, de clic sobre el botón "A/M" ; posteriormente confirme que la indicación de modo de control, cambie de manual ("M") a automático ("A") (ver figura 13) .	TA	E	L	El lazo de control de nivel del clarificador no quedara habilitado, es decir no realizara ajustes de manera automática a la válvula de entrada de agua cruda según el nivel del pozo claro.
	Saque de línea el clarificador que va a quedar fuera de servicio, cerrando lentamente y hasta su totalidad la válvula de salida del pozo claro al cabezal de alta presión o de sellos (ver figura 20) .	OP	E	L	No se le podrá dar el flujo correcto al clarificador que se encuentra en proceso de puesta en servicio.
ADVERTENCIA					
Evite realizar variaciones bruscas al flujo del clarificador para evitar que el manto de lodos en formación se afecte prematuramente.					
	Acceda al grafico "CLARIFICADORES DE LA PLANTA DE AGUA U-2900" siguiendo el paso 2.2 (Ver figura 4) .	TA	E	L	No se podrá continuar con el siguiente paso.
	Aumente a razón de un segundo por día el tiempo de generación de las pulsaciones, con forme al paso 5.3, hasta alcanzar 20 segundos (Ver figura 22) .	TA	E	L	El manto de lodos no se fluidizará y se compactará.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
	<p>Verifique la concentración de lodos en los concentradores; para ello, abra las válvulas media vuelta de venteo de aire de instrumentos a las COV-29030/31/32 y tome una muestra con una probeta de 1000 mL del del respectivo efluente; posteriormente deje reposar la muestra por 10 minutos. Si el lodo supera el 50% de la misma, continúe con el siguiente paso, de lo contrario repita este paso una vez cada ocho horas (Ver figura 24).</p>	OP	E	L	<p>Aumentará excesivamente el nivel lodos en las dos piscinas de decantación de los clarificadores; Lo cual puede ocasionar canalizaciones en los mismos, afectando la calidad del agua clarificada.</p>

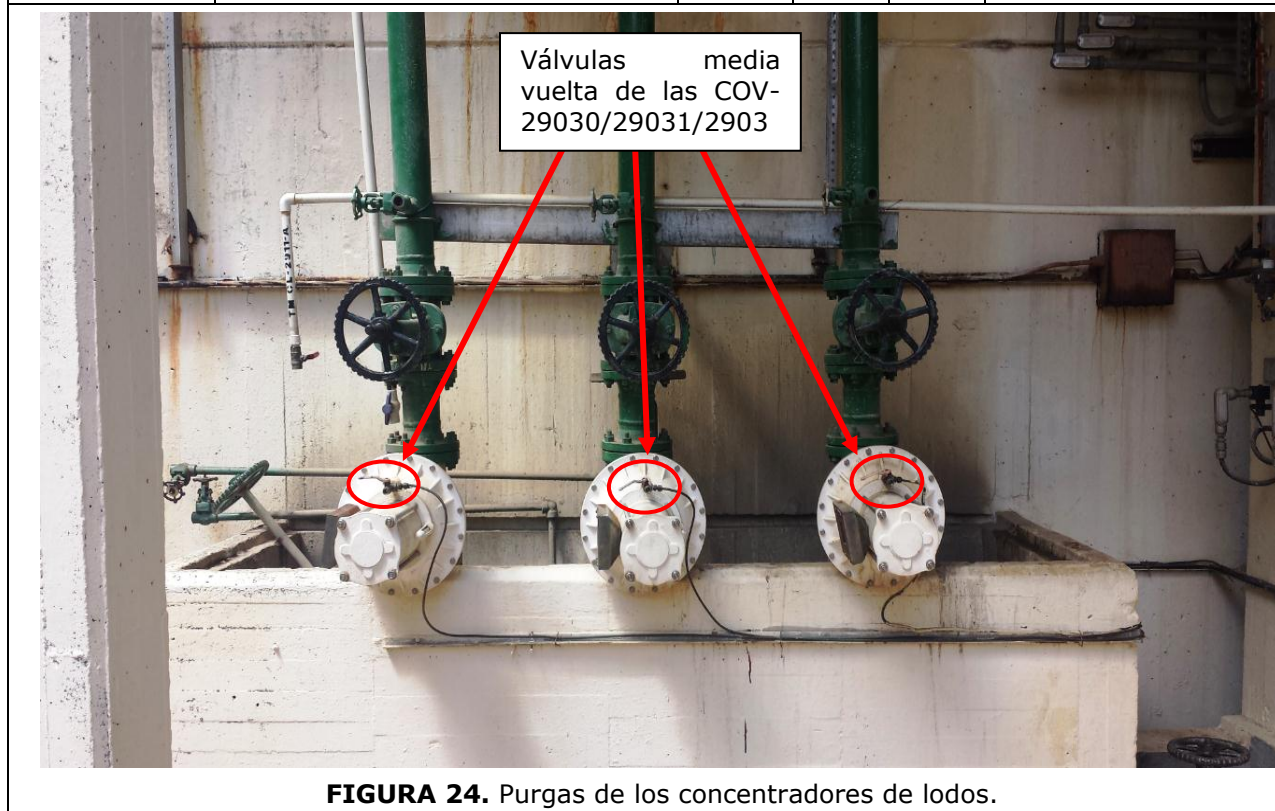


FIGURA 24. Purgas de los concentradores de lodos.



INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C

**REFINACIÓN
DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE**

RFN-I-1063

**Elaborado
20/12/2015**

Versión:1

CHECK LIST	TAREAS	PELIGROS			CONSECUENCIAS
		QUIEN	TIPO	RAM	
	Habilite el sistema de extracción de lodos de modo automático, para ello despliegue el recuadro "CONTROL CLARIFICADOR CL-2911", dando clic sobre el botón "SECUENCIAS" posteriormente active las purgas de los concentradores de lodo en la sección "EXTRACCIÓN DE LODOS" dando clic sobre el botón "ON", evidenciando que éste cambie de color gris a verde. (ver figuras 25).	TA	E	L	El control automático temporizado de las purgas no actuara.

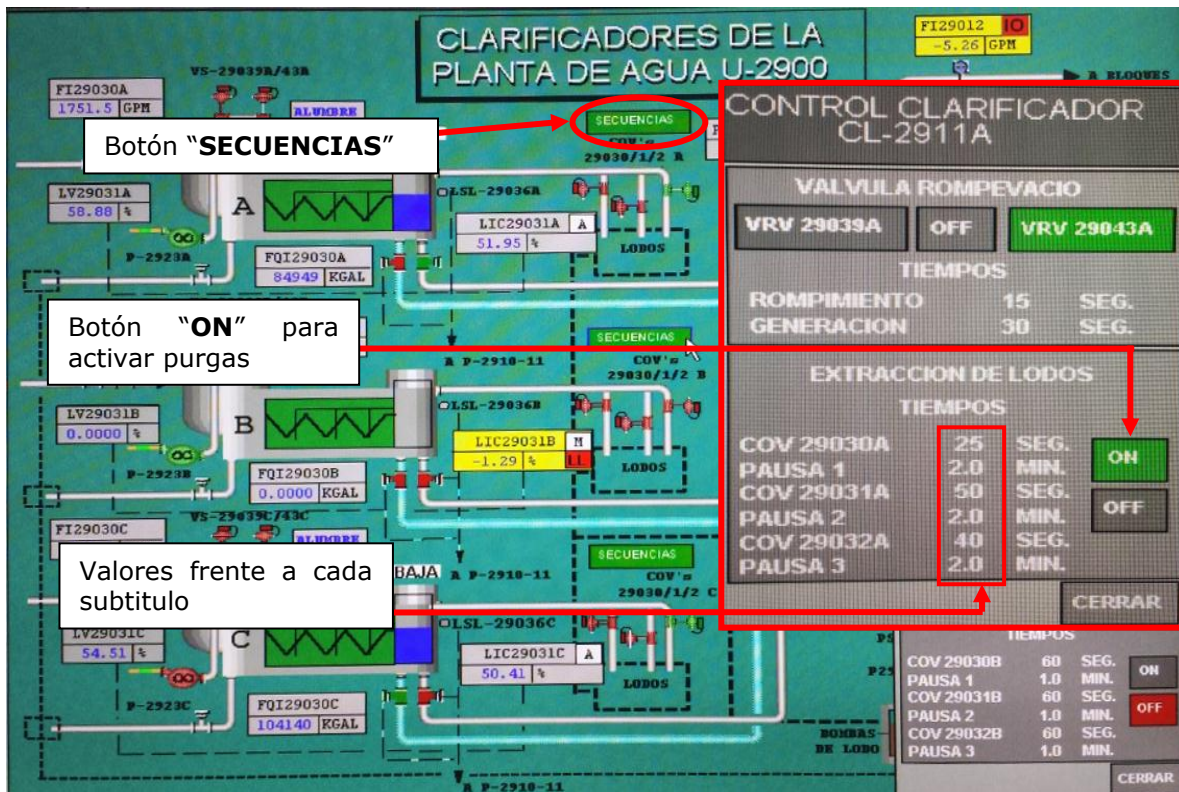




FIGURA 25. Grafico "CLARIFICADORES DE LA PLANTA DE AGUA U-2900".

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

TAREAS		PELIGROS			CONSECUENCIAS
CHECK LIST		QUIEN	TIPO	RAM	
NOTA					
Los tiempos de apertura y pausa de las purgas de los concentradores de lodo se ajustaran conforme a la concentración de lodos observada en las muestras tomadas según el punto 7.6.					
	Ajuste los tiempos de apertura y pausa de las purgas, dando clic en el valor que se encuentra frente a cada subtítulo (COV-29030/31/32 y PAUSA 1/2/3) hasta que desaparezca el número que se encuentra actualmente y posteriormente digite el número en segundos o en minutos dependiendo del tiempo de apertura de la COV o de pausa respectivamente que desee ajustar, seguido de la tecla enter hasta que en la casilla se observe el número digitado (ver figura 25).	OP	E	L	Los lodos de los decantadores no serán evacuados según corresponde, afectando la calidad del agua clarificada de salida.

5. CONTINGENCIA

En caso de que identifique que requiere maniobrar de forma distinta a lo descrito en este instructivo, porque detectó oportunidades en el mismo, porque la operación lo requiera, o por condición de los equipos; realice el análisis de riesgos en equipo con el supervisor, y documente el paso a paso que debe seguir para lograr el objetivo. Posteriormente, (no es necesario que sea inmediatamente) comunique al líder de disciplina operativa, de la oportunidad identificada.

	INSTRUCTIVO OPERACIONAL PARA PUESTA EN SERVICIO DE LOS CLARIFICADORES CL-2911A/B/C		
	REFINACIÓN DEPARTAMENTO DE SERVICIOS INDUSTRIALES BALANCE		
	RFN-I-1063	Elaborado 20/12/2015	Versión:1

RELACIÓN DE VERSIONES

Documento Anterior			
Versión	Fecha	Antiguo Código y Título	Cambios
NA	NA	NA	NA
Documento Nuevo			
Versión	Fecha	Cambios	
1	20/12/2015	Emisión del documento	

Para mayor información sobre este documento dirigirse a quien lo elaboró, en nombre de la dependencia responsable:

Elaboró: David Alexander Pérez Espinosa.
 Teléfono: 49666 Buzón: david.perez@ecopetrol.com.co
 Dependencia: Departamento de Servicios Industriales Balance

Revisó	Aprobó
JULIÁN ENRIQUE ARDILA PORRAS Ingeniero de Producción Departamento de Servicios Industriales Balance.	JESÚS JOAQUÍN MÉNDEZ BERMÚDEZ Jefe de Departamento Servicios Industriales Balance.