

**ANÁLISIS DE LAS INTERFERENCIAS EN EL TRATAMIENTO
FISICOQUÍMICO DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES
UTILIZADAS PARA LA INYECCIÓN DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS-
ECOPETROL**

EMEL JAIMES QUINTERO

LAURA FAJARDO SÁNCHEZ

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

2009

**ANÁLISIS DE LAS INTERFERENCIAS EN EL TRATAMIENTO
FISICOQUÍMICO DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES
UTILIZADAS PARA LA INYECCIÓN DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS-
ECOPETROL**

EMEL JAIMES QUINTERO

LAURA FAJARDO SANCHÉZ

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar el título de
Ingenieros Químicos**

Director:

M.Sc CRISOSTOMO BARAJAS FERREIRA

Codirector:

JOSÉ ANDRÉS PÉREZ MENDOZA

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

2009

A Dios. Por ser mi fiel compañero y trazarme el camino a seguir.

*A mis padres, Lina y Gustavo. Quienes han sido la base de mi esperanza en
esta meta que hoy culmina.*

A Luz Mary. Por ser como una segunda madre y mi ejemplo a seguir.

A Ingrid. Por ser mi gran apoyo moral y espiritual.

*A mis hermanos, sobrinos y demás familiares. Porque han sido parte
fundamental en mi proyecto de vida.*

Emel Laimos

A Dios por su infinita bondad.

A mi mami porque empiezo a cumplirle sus sueños.

A mi hermano por no dejarme perder el horizonte.

A mi papi y a toda mi familia por su invaluable apoyo.

Laura Fajardo

AGRADECIMIENTOS

A NEW GAS and OIL S.A. Por brindarnos la oportunidad de realizar la tesis, que es nuestro requisito para optar al título como Ingenieros Químicos.

A ECOPETROL S.A. Por el apoyo en el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Armando Torres y sus colaboradores de Ecopetrol, por su disponibilidad, asesoría e información brindada, los cuales hicieron que pudiéramos realizar nuestro estudio en el tiempo requerido.

Al Ingeniero José Andrés Pérez Mendoza, por su asesoría y conocimiento brindado como codirector.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES DEL AGUA DE INYECCIÓN.....	2
1.1. CALIDAD DEL AGUA DE INYECCIÓN	3
1.2. INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA	4
1.2.1 Sólidos Suspendidos.....	5
1.2.2 Aceites y grasas.....	5
1.2.3 Oxígeno Disuelto.....	5
1.2.4 Hierro.....	5
1.2.5 pH.....	6
1.2.6 Dureza.....	6
1.2.7 Turbidez.....	6
2. ANÁLISIS DE LAS INTERFERENCIAS QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DEL AGUA.....	7
2.1. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO UTILIZANDO DIAGRAMAS DE CONTROL DE CALIDAD	8
2.2 INTERFERENCIAS DEBIDO AL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO.....	13
2.2.1 Sistema de Filtración	13
2.2.2 Sistema de flotación	17
2.3 INTERFERENCIAS DADAS POR LA PARTE OPERATIVA.....	18
2.3.1 Mano de Obra y Manipulación de los equipos.....	18
2.3.2 Mantenimiento de Equipos	19
3. PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES A LAS INTERFERENCIAS PRESENTADAS	20
3.1 MEJORAMIENTO DEL PROCESO ACTUAL.....	20
3.2 PLANTEAMIENTO DE UN NUEVO MONTAJE PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE AGUA PARA LA INYECCIÓN	21
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	26
4.1 CONCLUSIONES.....	26
4.2 RECOMENDACIONES.....	27

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
ANEXOS.....	30
ANEXO A. INTERFERENCIAS Y CAUSAS DEBIDO A LA PRESENCIA DE OXIGENO Y HIERRO DISUELTO EN EL AGUA DE INYECCION	30
ANEXO B. ACONDICIONAMIENTO FISICO Y QUIMICO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE INYECCION.....	36
ANEXO C. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS Y GRÁFICOS DE CONTROL.....	44
ANEXO D. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA, HISTORIA Y DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS.....	51
ANEXO E. GRAFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS INDICADORES DE CALIDAD A LA ENTRADA Y SALIDA EN LOS FILTROS DE LA CIRA INFANTAS.....	54

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Frente de avance causado por el agua al petróleo dentro de la formación	2
Figura 2. Ilustración del mecanismo y distribución de la inyección de agua	2
Figura 3. Proyección de la cantidad de Agua inyectada en La Cira Infantas	3
Figura 4. Comparación de la Calidad Media con el parámetro Máximo permitido para Sólidos Suspendidos (TSS) y Aceites y Grasa (O/W).....	9
Figura 5. Diagrama de Control de Calidad y Operatividad del proceso, para Aceites y Grasas.....	10
Figura 6. Diagrama de Control de Calidad y Operatividad del proceso, para Sólidos Suspendidos	11
Figura 7. Diagrama de Control de Calidad y Operatividad del proceso, para Oxígeno Disuelto	11
Figura 8. Sistema de Filtración actualmente llevado a cabo	14
Figura 9. Comparación del sistema de filtrado con un circuito eléctrico.....	15
Figura 10. Pérdida de carga, profundidad del lecho y porosidad en función de la velocidad de lavado (Caudal de lavado)	16
Figura 11. Unidad de flotación inducida por gas (IGF).....	17
Figura 12. Sistema de filtración recomendado.....	20
Figura 13. Diseño propuesto para el acondicionamiento de aguas en La Cira Infantas	21
Figura 14. Separación de fases en el tanque coalescedor	24
Figura 15. Esquema de control del nivel del tanque coalescedor	24

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros exigidos por Ecopetrol en el agua de inyección para O/W, TSS y O ₂	7
Tabla 2. Medias muestrales y desviaciones estándar para aceites y grasas (O/W), Sólidos suspendidos (TSS) y oxígeno disuelto (O ₂) en salida de los filtros	8
Tabla 3. Valores de los límites de control estadístico de calidad para O/W, TSS y O ₂	10
Tabla 4. Reporte del porcentaje y la desviación respecto a las especificaciones de calidad, de los datos analizados	13
Tabla 5. Parámetros de diseño máximos de entrada y salida en el tanque coalescedor.....	23

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. INTERFERENCIAS Y CAUSAS DEBIDO A LA PRESENCIA DE OXIGENO Y HIERRO DISUELTO EN EL AGUA DE INYECCION.....	30
ANEXO B. ACONDICIONAMIENTO FISICO Y QUIMICO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE INYECCION.....	36
ANEXO C. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS Y GRÁFICOS DE CONTROL	44
ANEXO D. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA, HISTORIA Y DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS	51
ANEXO E. GRAFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS INDICADORES DE CALIDAD A LA ENTRADA Y SALIDA EN LOS FILTROS DE LA CIRA INFANTAS	54

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DE LAS INTERFERENCIAS EN EL TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO DE LAS AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES UTILIZADAS PARA LA INYECCIÓN DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS-ECOPETROL*

AUTORES: Jaimes, Emel y Fajardo, Laura**

PALABRAS CLAVE: Inyección de Agua, Parámetros de Calidad, Gráficos de Control Estadístico.

En el presente estudio se hizo un análisis de la calidad del agua inyectada en el campo La Cira Infantas, basado en el historial de muestras reportadas por NALCO DE COLOMBIA LTDA. Utilizando como herramientas los gráficos de control estadístico de calidad, se demostró la presencia de fallas, las cuales hacen que los parámetros que definen la calidad del agua estén por encima de las especificaciones requeridas.

Las fallas físicoquímicas se atribuyen al montaje que actualmente existe para llevar a cabo la filtración, el cual no sigue las especificaciones dadas por el proveedor de equipos; este hecho hace que la etapa de retrolavado del filtro no funcione correctamente. Además, en las celdas de flotación no hay una relación óptima entre el tiempo de retención y la turbulencia generada por el gas que se inyecta, lo que causa que el fenómeno de coalescencia tenga una baja eficiencia. Por otro lado, la falta de mantenimiento en los equipos y la carencia de un estándar de operación generan gran variabilidad en la calidad del agua, y en el proceso de tal forma que su intervalo de operación esté por encima del establecido.

En busca de dar solución a las fallas anteriormente descritas, se plantean posibles alternativas para mejorar la calidad del agua. En primer lugar, se propone hacer mejoras al proceso que actualmente existe con base en el cumplimiento de las especificaciones técnicas de los equipos. En segundo lugar, se presenta un diseño general que relaciona el proceso con sus variables para garantizar un buen funcionamiento. Este diseño ha presentado eficiencia del 97 y 98 % en las pruebas piloto realizadas.

* Proyecto de Grado para optar al título de Ingenieros Químicos. Modalidad Investigación

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela Ingeniería Química

Director: M. Sc Crisóstomo Barajas Ferreira

Codirector: José Andrés Pérez Mendoza

SUMMARY

TITLE: ANALYSIS OF THE INTERFERENCES IN THE PHYSICOCHEMICAL TREATMENT OF THE INDUSTRIAL RESIDUAL WATERS USED FOR THE INJECTION IN THE FIELD OF CIRA INFANTAS-ECOPETROL *

AUTORS: Jaimes, Emel y Fajardo, Laura**

KEYS WORDS: Water injection, parameters of quality, statistical control graphics.

In the present study an analysis of the quality of the injected water to the Cira Infantas was carried out by using statistical control graphics of the quality. Such analysis was done based on the samples reported by NALCO DE COLOMBIA LTDA. By using graphics for statistical control of quality, it was shown the existence of faults which make that the parameters that define the quality of the water are above the required specifications.

The physicochemical faults are attributed to the assembly that currently exists to carry out the filtration which does not follow the specifications provided by the equipment supplier. This fact makes that the backwash stage of the filter does not work properly. Besides, in the flotation cells there is not an optimal relation between the hold time and the turbulence generated by the gas that is injected which at the same time makes the coalescence phenomenon to have low efficiency. On the other hand, the lack of equipment maintenance and standards for the operation generate a great variability in the water quality and in the process in such a way that its operation interval appears to be above the parameters given.

With the aim of giving solutions to the faults described above, some possible alternatives are proposed here to improve the quality of the water. Firstly, it is proposed to improve the process that currently exists based on fulfilling the technical specifications included in the equipment. Secondly, a general design that relates the process with the equipment is presented. According to the pilot tests carried out to the design, its efficiency ranges between 97% y 98%.

* Project Grade to choose for the title of Chemicals Engineering. Mode Investigation.

** Faculty of Engineering Physicist-Chemistries. School of Chemical Engineering

Director: M. Sc Crisóstomo Barajas Ferreira

Codirector: José Andrés Pérez Mendoza

INTRODUCCIÓN

El agua es un fluido considerablemente abundante en la naturaleza tanto en la superficie como en el subsuelo y en algunos casos, su empleo no requiere costosos tratamientos. El agua se usa como fluido de inyección, dado que es muy eficiente en la recuperación de petróleo. No tiene límite de profundidad, se puede inyectar a presión relativamente baja en la cabeza del pozo, ayudada por la columna hidrostática. En Colombia, los primeros proyectos de inundación de agua se desarrollaron en la formación Barco de la Concesión del mismo nombre y en la formación La Cira Infantas de la Concesión de mares [1].

En La Cira Infantas se ha implementado la inyección de agua como un método de recuperación secundaria de petróleo, según esto, ha obtenido una gran importancia, el cual significa aumentar el factor de recobro del campo y por ende aumentar la producción hasta los límites establecidos.

El contrato del proyecto de inyección de agua se firmó entre Ecopetrol S.A y OxyAndina, el cual se caracterizó por ser una alta inversión para su ejecución. Para que el proyecto tenga resultados satisfactorios, hay que contar con disponibilidad de agua y un buen acondicionamiento para que la calidad sea aceptable para la inyección.

No obstante, la calidad del agua actualmente no cumple los requerimientos de calidad establecidos, lo que da origen e importancia a este estudio, cuyo objetivo principal es analizar las interferencias que están haciendo que el agua no cumpla la calidad establecida.

El estudio está comprendido en tres etapas: En la primera, se demuestra la existencia de fallas en el acondicionamiento, por medio de diagramas de control estadístico de calidad. La segunda comprende el análisis fisicoquímico de las causas que desvían el proceso de la calidad esperada. Y la tercera muestra el planteamiento de soluciones que permiten mejorar la eficiencia del proceso en cuanto a acondicionamiento y calidad del agua.

1. GENERALIDADES DEL AGUA DE INYECCIÓN

La inyección de agua es un método de gran uso en la industria petrolera para la recuperación secundaria, que consiste en forzar agua a altas presiones en una formación productora que ya ha sido agotada por métodos primarios, formándose así un frente de avance que empuja el aceite que aún permanece en el yacimiento hacia los pozos de producción, como se observa en la figura 1.

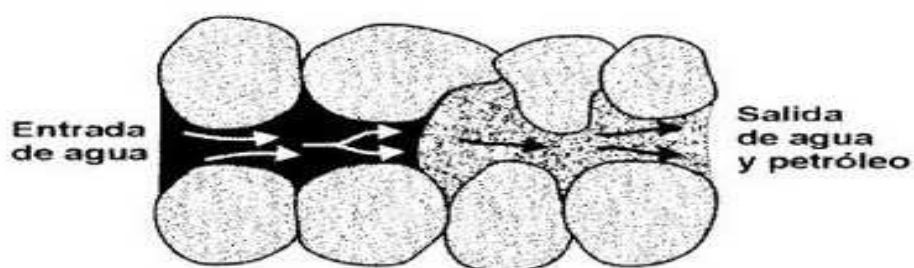


Figura 1. Frente de avance causado por el agua al petróleo dentro de la formación

En la figura 2, se muestra la distribución y el mecanismo de la inyección de agua que se hace mediante los pozos inyectoros. Se puede observar con gran detalle cómo es inyectada en las zonas acuíferas, las cuales están en contacto con el crudo, de tal forma que ejerce una presión similar a un pistón que hace que el petróleo salga por los pozos productores.

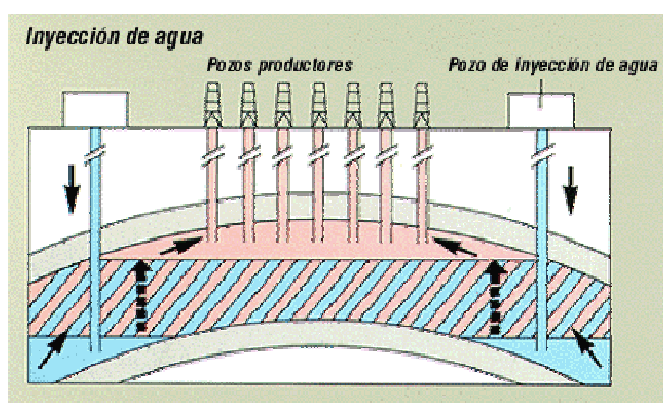


Figura 2. Ilustración del mecanismo y distribución de la inyección de agua

Este método utilizado en el recobro secundario tiene una gran eficiencia, debido a que extrae el aceite libre en los espacios porosos, el sostenido por las fuerzas capilares y el retenido por adhesión a la superficie de la roca [2].

En la Cira Infantas la Inyección de Agua ha tomado gran importancia, alcanzando proyecciones alrededor de los 780.000 BAPD (Barriles de Agua por Día), como se puede ver en la Figura 3. Alrededor del año 2012 se espera obtener la mayor tasa de inyección y por lo tanto la mayor producción, valor que se espera llevar desde el 2009 al 2012 de 26.000 BOPD a 50.000 BOPD. Según esto en Colombia las expectativas de utilización de agua como mecanismo para recuperar el crudo han tenido un crecimiento positivo ya que posee muchos campos que están llegando a la etapa inicial de producción donde el petróleo fluye de modo natural debido a la energía acumulada en el yacimiento, hecho que obliga a las compañías petroleras a utilizar métodos de recuperación secundaria, en los que el agua entra a jugar un papel importante.

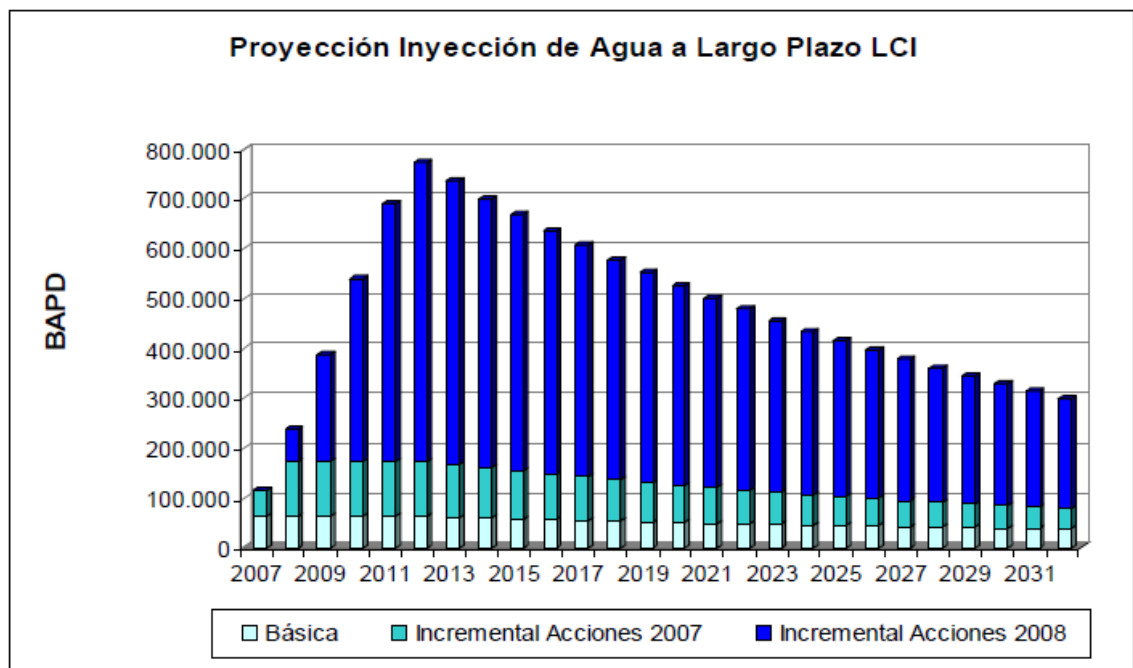


Figura 3. Proyección de la cantidad de Agua inyectada en La Cira Infantas

1.1. CALIDAD DEL AGUA DE INYECCIÓN

Un agua de alta calidad es aquella que bajo las condiciones de operación presentes permite mantener los parámetros establecidos a una presión de

inyección permisible. Para esto debe estar libre de sedimentos y gases corrosivos; Además, no debe causar ningún tipo de taponamiento en la formación o producir reducción de la permeabilidad en la formación inyectada.

En la mayoría de los casos cuando se usa agua de baja calidad, se produce taponamiento parcial en las líneas de flujo y en las formaciones inyectadas, por lo cual el trabajo remedial resultante puede ser mucho más costoso que cualquier ahorro en equipo de tratamiento de agua o cualquier prueba de control de calidad [3].

El éxito de todo proyecto de recuperación secundaria se fundamenta en el análisis y el tratamiento del agua que se va a inyectar, que a su vez implica tener un previo acondicionamiento que permita cumplir las siguientes condiciones:

- Hacerla compatible con las condiciones del yacimiento.
- Operar con la menor presión posible para disminuir los costos de funcionamiento.
- Minimizar los costos por deterioro de los equipos.
- Prevenir la deposición de escamas que forman incrustaciones y la corrosión en general en los equipos y líneas de conducción.

Los parámetros de acondicionamiento del agua están sujetos a las condiciones y propiedades que posee la formación en el yacimiento. Un yacimiento con formación de porosidad y permeabilidad baja requerirá de una calidad alta de agua; por el contrario, una formación con porosidad y permeabilidad alta aceptará una calidad baja de agua respecto al caso anterior, causa por la cual es necesario conocer bien las características del yacimiento para prevenir problemas y optimizar costos [4].

1.2. INDICADORES DE CALIDAD DEL AGUA

Los indicadores de calidad del agua son aquellos parámetros físicos, químicos y bacteriológicos que la caracterizan tanto cualitativa como cuantitativamente [8]. Tales indicadores son descritos a continuación:

1.2.1 Sólidos Suspendidos. En un sistema de inyección de agua existe la posibilidad de que los sólidos suspendidos disminuyan la inyectividad en los pozos inyectoros. La composición de los sólidos se ve repercutida a agentes taponantes tales como arenas, arcillas, escamas, aceites y bacterias. En la industria se han usado corazones de formación, corazones artificiales y filtros membrana (NACE TM-0173) para monitorear los sólidos suspendidos y la calidad del agua [3].

1.2.2 Aceites y grasas. Son un conjunto de sustancias de muy baja solubilidad con el agua, que forman películas y natas que flotan sobre la superficie. Están comprendidos por largas cadenas de hidrocarburos, comúnmente con un grupo carboxílico en un extremo. Son solubles en compuestos orgánicos, pero muy insolubles en agua debido a la propiedad hidrofóbica dada por el hidrocarburo.

Las grasas y los aceites son un parámetro importante a tratar, debido a su gran dificultad para transportarlos por tuberías, además, reducen la capacidad de flujo en los conductos, hasta llegar al punto de un taponamiento total. Por este motivo, se requieren plantas de pre tratamiento para tratarlos en la entrada al proceso.

Normalmente las grasas y los aceites se encuentran formando emulsiones, por lo que es necesario agregar un agente que rompa dichas emulsiones aceitosas por medio de coagulantes o acidificación [9].

1.2.3 Oxígeno Disuelto. Contribuye significativamente a la corrosividad del agua, en presencia de hierro disuelto puede ocasionar la precipitación de óxidos de hierro insolubles los cuales pueden ocasionar corrosión y taponamiento en los equipos y en la formación. Con frecuencia se utilizan secuestrantes de oxígeno para poder ser removido del agua. Un agente que puede ser utilizado para esto es el sulfito, el cual necesita un acelerador como el cobalto para que la reacción se lleve a cabo de forma rápida [3].

1.2.4 Hierro. Su presencia es usada para detectar y monitorear la corrosión en un sistema de inyección de agua. Puede estar presente como ión férrico (Fe^{+++}) o ferroso (Fe^{++}) [3,6]. El ión férrico se caracteriza por ser insoluble por encima

de un pH de 3,5 [6]. Este es producto de la oxidación del ión ferroso en presencia de oxígeno de tal modo que precipita ya sea a las paredes de las líneas de conducción o el fondo de los equipos causando deterioro por oxidación o taponamientos [5].

1.2.5 pH. Influye significativamente en cuanto a la corrosión del agua se trata, ya que el nivel de corrosividad aumenta para valores donde el pH es bajo (de carácter ácido). A valores altos del pH (carácter básico) se presenta la formación de incrustaciones (hidróxido de Hierro o incrustaciones de carbonatos) en la superficie del acero [5,6]. Debido a esto se trabaja con valores en los que el agua presenta características neutras con el propósito de tener un equilibrio entre los dos fenómenos antes mencionados.

1.2.6 Dureza. Químicamente la dureza del agua es una propiedad causada por la presencia de cationes metálicos polivalentes, y se manifiesta por su reacción con algunos aniones formando así las incrustaciones. La dureza principalmente se debe a la presencia de iones Ca^{++} y Mg^{++} y se expresa en ppm de carbonatos [6].

1.2.7 Turbidez. Se debe a la presencia de materia finitamente dividida en suspensión. La apreciación de abundancia de esta materia se da por el grado de turbidez, de tal forma que un grado de turbidez alto indica que existe una cantidad alta de sólidos suspendidos [6]. Es una manera rápida de saber las características del agua en cuanto a materia suspendida, ya que indica un parámetro de calidad importante del agua de inyección.

Para mantener los parámetros de calidad del agua se hace un acondicionamiento, el cual se describe en el anexo B, con sus respectivos procesos fisicoquímicos que se llevan a cabo.

2. ANÁLISIS DE LAS INTERFERENCIAS QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DEL AGUA

Tomando el concepto de calidad de Joseph M. Juran [7], para el caso de las aguas de inyección, se puede definir como el conjunto de características que hacen que el agua esté en condiciones aceptables para ser inyectada sin producir ningún problema y hacer satisfactoria la recuperación de crudo.

El análisis que aquí se presenta comprende un período de alrededor de año y medio del historial de muestras en diferentes puntos del proceso, este período está comprendido desde el 2 de Enero de 2008 hasta el 17 de Junio de 2009, de lo que se corrobora que es una cantidad de datos considerable para hacer un análisis acertado.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros para aceites y grasas, total sólidos suspendidos y oxígeno disuelto, exigidos por Ecopetrol S.A, en cuanto a la calidad del agua de inyección en La Cira Infantas.

Parámetro	Máximo Aceptado y/o Exigido
O/W (ppm)	4
TSS (ppm)	5
O ₂ (ppb)	0

Tabla 1. Parámetros exigidos por Ecopetrol en el agua de inyección para O/W, TSS y O₂

Los indicadores de calidad mostrados en la tabla anterior junto con el hierro, son las variables más influyentes en la calidad del agua en La Cira Infantas, donde a O/W, TSS y O₂ se les hace un análisis en común ya que tienen un parámetro de referencia. Para el hierro, el cual no tiene referencia, se desarrollan otro tipo de caracterizaciones debido a que lo único que se controla es que se mantenga disuelto en el agua controlando su precipitación, hecho que hace que se quede retenido en los equipos y estaciones y cause problemas de corrosión y deterioro. El análisis para el hierro se hace más adelante por separado.

2.1. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO UTILIZANDO DIAGRAMAS DE CONTROL DE CALIDAD

En el anexo C se explican las características de los gráficos de control y el análisis que se lleva a cabo en un proceso soportado en bases estadísticas de medias muestrales y desviaciones estándar.

El propósito de hacer un análisis de control estadístico es poder focalizar las variaciones casuales inevitables; además, evitar ajustes innecesarios, ya que estos tienden a aumentar la variabilidad del proceso en vez de disminuirla. Esto hace posible el diagnóstico y la corrección de muchos problemas de producción [8], que a menudo llevan a mejoras considerables en la calidad del agua utilizada para la inyección.

Este tipo de análisis tiene como soporte el historial de resultados dados por NALCO S.A¹, que se lleva a cabo en la salida de los filtros de lecho vegetal, punto donde el agua está lista para ser inyectada. De esta forma, según el resultado se pueden hacer algunas hipótesis de cómo es el funcionamiento del proceso aguas arriba.

En la Tabla 2 se reportan los valores de las medias muestrales (\bar{X}) junto con las desviaciones estándar (S), para aceites y grasas (O/W), sólidos suspendidos (TSS) y oxígeno disuelto (O₂) del historial anteriormente mencionado.

# FILTRO	\bar{X} O/W (ppm)	\bar{X} TSS (ppm)	\bar{X} O ₂ (ppb)	S O/W	S TSS	S O ₂
Filtro 1	9,65	21,90	97,35	45,74	13,11	308,77
Filtro 2	12,62	22,57	73,38	46,65	14,16	175,59
Filtro 3	7,81	21,10	54,20	20,31	12,45	145,51
Filtro 4	7,09	20,77	71,56	24,35	11,69	218,30
Filtro 5	6,19	22,17	66,89	9,97	15,04	201,74
Filtro 6	6,77	21,59	106,91	14,19	15,18	273,42
Filtro 7	12,49	28,54	126,84	25,92	26,75	408,16
PROMEDIO	8,95	22,66	85,31	26,73	15,48	247,36

Tabla 2. Medias muestrales y desviaciones estándar para aceites y grasas (O/W), Sólidos suspendidos (TSS) y oxígeno disuelto (O₂) en salida de los filtros

¹ NALCO DE COLOMBIA LTDA. Empresa encargada de la toma y caracterización de muestras del Agua en la Cira Infantas.

En la Figura 4 se muestra la calidad media del agua inyectada en La Cira Infantas en el periodo comprendido entre el 2 de Enero del 2008 y el 17 de Junio de 2009, para aceites y grasas (O/W) y sólidos suspendidos (TSS). La figura está construida con base en medias muestrales, en la que cada muestra es la recopilación de datos de cada filtro, para un total de siete muestras correspondientes al número de filtros.

Se puede deducir el incumplimiento de las especificaciones de calidad de los dos parámetros mostrados, por medio de una comparación entre los valores medios muestrales (\bar{X}) con los valores reportados en la Tabla 1, ya que en todos los casos, el valor medio excede el máximo exigido por Ecopetrol S.A.

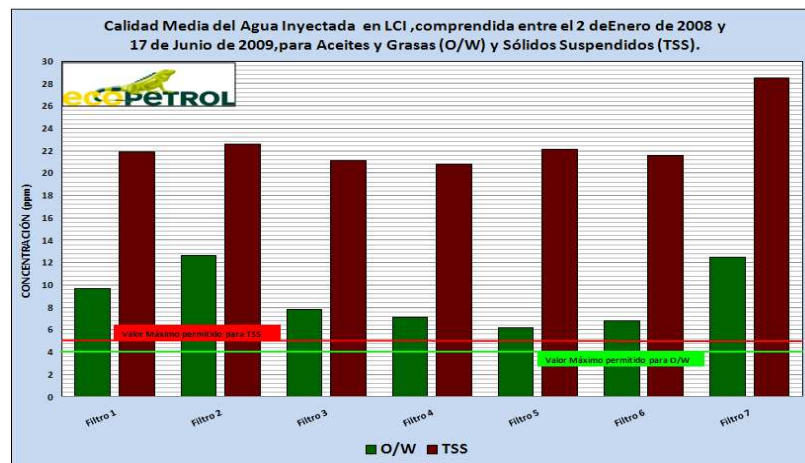


Figura 4. Comparación de la Calidad Media con el parámetro Máximo permitido para Sólidos Suspendidos (TSS) y Aceites y Grasa (O/W)

Según la gráfica se focaliza que los sólidos suspendidos presentan mayor proporción de fallas en el proceso, por lo que es necesario tenerlos en cuenta en primera instancia, ya que puede ser la causa más significativa en la variabilidad del proceso y la baja calidad del agua.

Se puede observar la existencia de fallas en el proceso llevado a cabo para el acondicionamiento del agua de inyección, se hicieron gráficos que muestran el control de la calidad y el comportamiento operativo del proceso, los cuales brindan información sobre fallas y resultados de la caracterización de las muestras tomadas. A continuación se muestran las Figuras 5, 6 y 7, donde se ven las cartas de control de calidad para el proceso, respectivos a aceites y

grasas (O/W), sólidos suspendidos (TSS) y oxígeno disuelto (O₂) respectivamente. Las Figuras 5, 6 y 7 están construidas con base en los datos de las Tablas 2 y 3, las cuales muestran los parámetros requeridos para calcular los límites superior (LCS), inferior (LCI) y el valor medio (LC), de acuerdo a las Ecuaciones 1, 2 y 3.

$$LCS = \bar{X} + \frac{3S}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 1.} \quad LC = \bar{X} \quad \text{Ecuación 2.} \quad LCI = \bar{X} - \frac{3S}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_i, \quad S = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_i \quad \text{y} \quad n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k n_i$$

Donde $k = 7$, respectivo al número de filtros y \bar{X}_i , S_i y n_i son la media, la desviación estándar y el número de datos respectivos para cada filtro. En la Tabla 3 se reportan los valores calculados de los límites de control estadístico de calidad para O/W, TSS y O₂.

LÍMITE	PARÁMETRO		
	O/W	TSS	O ₂
LCS	13,97	25,42	129,31
LC	8,95	22,66	85,31
LCI	3,93	19,91	41,30
\bar{X}	8,95	22,66	85,31
S	26,73	15,48	247,36
n	255,29	283,71	284,43

Tabla 3. Valores de los límites de control estadístico de calidad para O/W, TSS y O₂

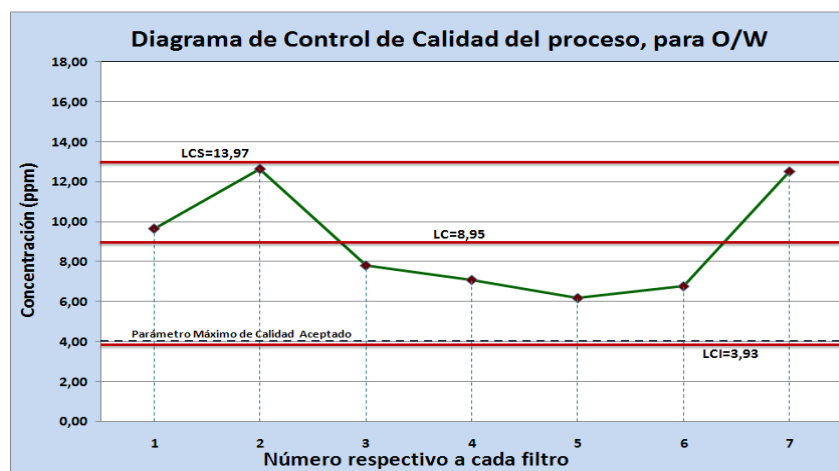


Figura 5. Diagrama de Control de Calidad y Operatividad del proceso, para Aceites y Grasas

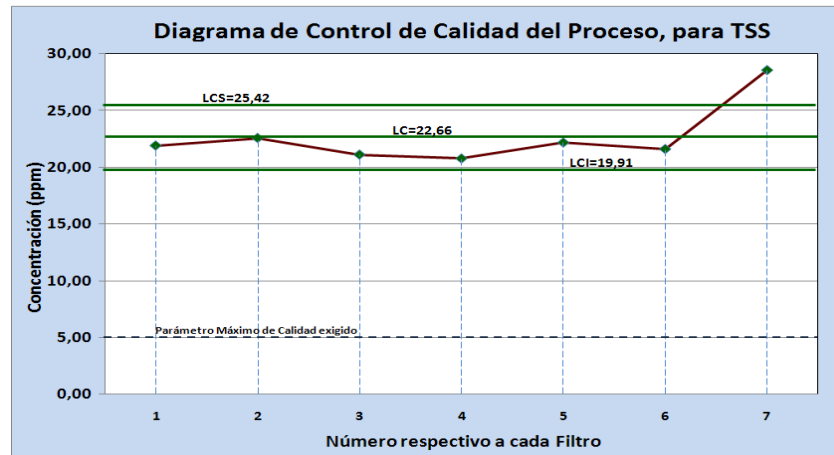


Figura 6. Diagrama de Control de Calidad y Operatividad del proceso, para Sólidos Suspendidos

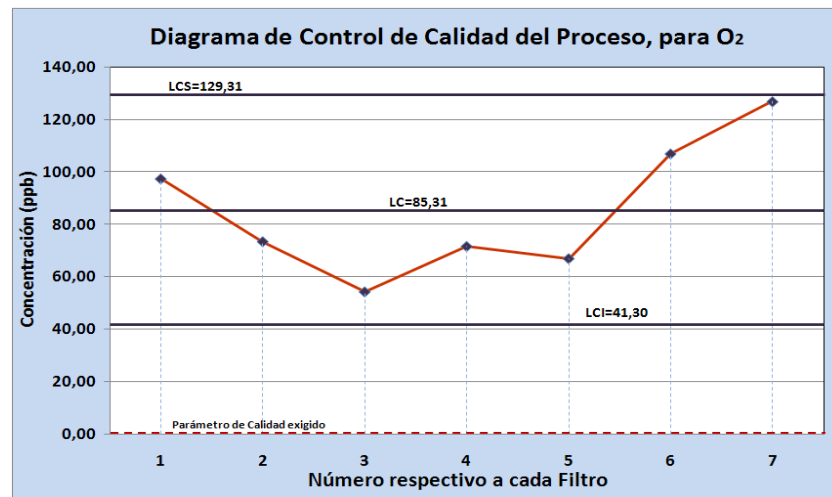


Figura 7. Diagrama de Control de Calidad y Operatividad del proceso, para Oxígeno Disuelto

Los diagramas de control mostrados anteriormente describen el funcionamiento del proceso, detallando su estado de operatividad y calidad del agua de la inyección.

En los tres gráficos se puede ver aparentemente que el proceso opera bien, ya que se encuentra en los límites de control establecidos estadísticamente, excepto la Figura 6, que tiene un punto fuera de los límites. Tomando los conceptos del anexo C, se conjetura que aunque todos los puntos se encuentran entre los límites de control estadístico, se ve una región donde existe una baja aleatoriedad de los datos. Este hecho está muy reflejado en la Figura 6 donde seis puntos de la gráfica están por debajo de la línea central y

el último punto está fuera de los límites de control, hecho por el cual se puede afirmar que el proceso en cuanto a funcionamiento mecánico y operativo está fuera de control.

Haciendo el análisis de la calidad con la que se está inyectando el agua se puede ver para los tres casos, aceites y grasas, sólidos suspendidos y oxígeno disuelto, el proceso opera por encima de las especificaciones requeridas. Por lo tanto se deduce que el intervalo de operación está en un valor superior al del parámetro de calidad máximo reportado en la Tabla 1.

Analizando qué filtros operan de una forma estabilizada y cuáles muestran una mejor calidad, según los parámetros de calidad referenciados en la Tabla 1, se citan las tres figuras anteriores para hacer el cuestionamiento anterior.

Se puede determinar que los filtros que tienen una mejor estabilidad en cuanto a operación mecánica son: de la figura 5, referida a O/W, el filtro 1; de la figura 6, referida a TSS, el filtro 2; de la Figura 7, referida a O₂, el filtro 2. Esto debido a que tienen el valor medio más cercano al que muestra el proceso (señalado por la línea central), respecto al valor medio de los otros filtros. Haciendo una interpretación fisicoquímica, se puede decir que son los filtros con mayor estabilidad en el proceso, en sus operaciones unitarias, su control automático y en una serie de factores externos que hacen que su variabilidad sea baja.

Ahora se presenta el análisis en cuanto a la calidad respecto a las especificaciones exigidas, se puede ver que los filtros que están más cerca de las exigencias de calidad son: de la Figura 5, referida a O/W, el filtro 5; de la Figura 6, referida a TSS, el filtro 4; de la Figura 7, referida a O₂, el filtro 3. Esto debido a que son los filtros que durante el periodo de tiempo analizado, sus valores medios se desvían en menor proporción que los otros filtros.

Para finalizar este análisis, en la Tabla 2 se reporta el porcentaje de puntos que no están dentro de las especificaciones requeridas, con su respectiva desviación. De esta forma se puede analizar que hay un déficit alto en el acondicionamiento del agua, ya que existe un gran porcentaje de puntos que no cumplen los estándares de calidad, esto se ve reflejado para los tres casos.

Comparando los datos de O/W y TSS en la Tabla 4, se puede ver que el O/W tiene menor porcentaje de puntos fuera de las especificaciones requeridas, pero mayor desviación, de lo cual se puede deducir que el hecho de que haya un mayor porcentaje de datos que no cumplan los requisitos esperados, no implica que exista una mayor variación o desviación, ya que puede que los datos estén fuera pero no muy alejados.

# Filtro	% Puntos Fuera del Intervalo de Calidad			Desviación Respecto al Intervalo de Calidad		
	O/W	TSS	O ₂	O/W	TSS	O ₂
Filtro 1	41,57	94,10	40,97	71,59	22,08	507,15
Filtro 2	42,17	92,99	42,28	73,04	23,41	285,42
Filtro 3	32,95	90,46	42,05	35,91	21,42	240,10
Filtro 4	26,67	89,22	45,15	47,54	20,80	342,74
Filtro 5	38,35	93,85	39,08	16,18	23,58	340,87
Filtro 6	36,36	94,13	47,22	23,77	23,20	427,37
Filtro 7	62,42	98,44	65,13	34,53	35,95	530,48
Media	40,07	93,31	45,98	43,22	24,35	382,02

Tabla 4. Reporte del porcentaje y la desviación respecto a las especificaciones de calidad, de los datos analizados

2.2 INTERFERENCIAS DEBIDO AL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO

Ya se evidenció la existencia de fallas en el proceso de remoción de aceites y grasas, sólidos suspendidos y oxígeno. A continuación, se dan explicaciones físicas a las causas presentadas.

2.2.1 Sistema de Filtración

En la Figura 8 se muestra la distribución del proceso de filtrado actual. Allí se pueden ver cuatro bombas encargadas del suministro de agua a los filtros para previamente ser clarificada mediante filtración. Las bombas no garantizan un funcionamiento correcto del sistema, debido a su número y su distribución. Además, normalmente en funcionamiento hay tres ya que la cuarta esta como relevo por si alguna falla o el nivel de agua sube a un valor superior al que pueden manejar.

En la figura también se aprecia que las bombas tienen el mismo cabezal de descarga, lo que hace que los filtros estén operando en forma paralela. Los filtros operan a presiones parecidas debido a que la cabeza de presión de las bombas es la misma.

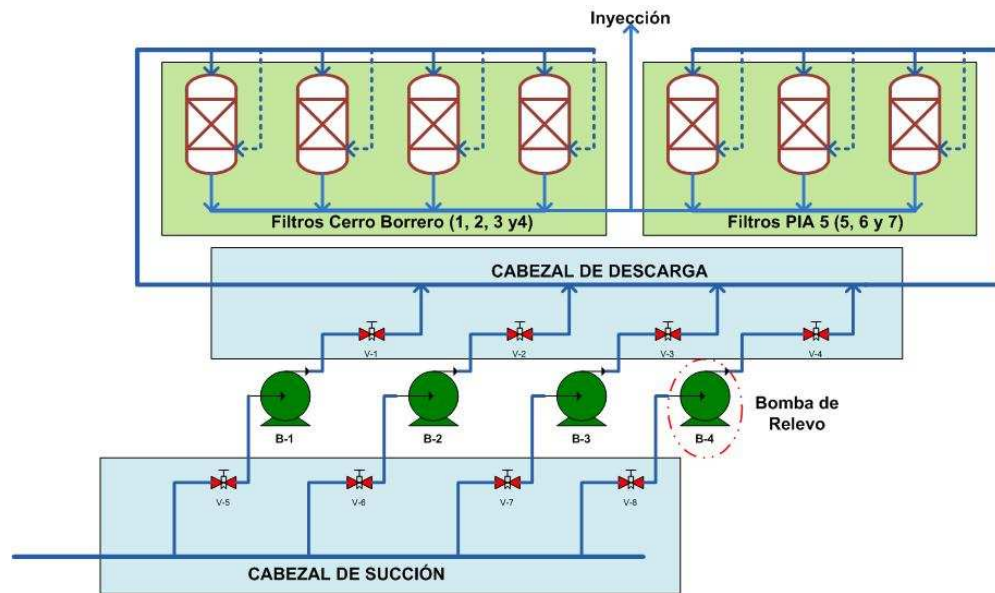


Figura 8. Sistema de Filtración actualmente llevado a cabo

El proceso antes mostrado consta de dos partes, la etapa de filtrado (Línea continua de entrada a los filtros) y la etapa de retrolavado o limpieza del lecho filtrante (esquematizada por la línea punteada que entra a los filtros), estas etapas se describen de forma detallada en el anexo B. El proceso funciona perfectamente en la etapa de filtrado pues está acondicionado a la presión del cabezal de descarga de las bombas, hasta que la caída de presión en algún filtro deja ver que el lecho está saturado, de tal forma que hay que regenerarlo o limpiarlo. Es ahí donde empieza la etapa de retrolavado, la cual requiere una presión y un caudal que permitan una fluidización correcta del lecho filtrante para que quede regenerado completamente.

En la Figura 9 se muestra una analogía del proceso de filtración con un circuito eléctrico en paralelo donde se analiza la resistencia a fluir del agua en cada etapa del ciclo para cada filtro.

Se toman como referencia los filtros de la PIA 5 (5, 6 y 7) con resistencias R5, R6 y R7, respectivamente. Tales filtros poseen características idénticas tales como profundidad del lecho, capacidad de flujo, lo que permite una comparación acertada.

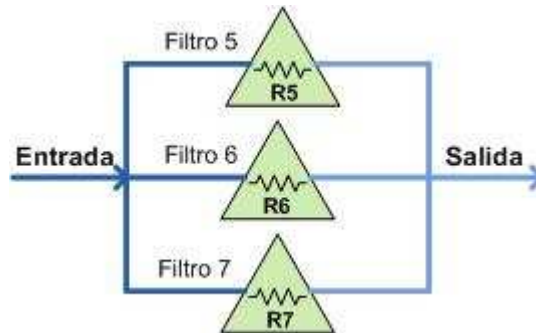


Figura 9. Comparación del sistema de filtrado con un circuito eléctrico

Se considera que los tres filtros se encuentran en la etapa de filtración, de lo que se puede decir que $R5 \approx R6 \approx R7$, en otras palabras, la resistencia que pone el filtro a dejar que el agua fluya sobre él, tiene un valor equivalente en los tres filtros, de modo que el agua fluye por las tres ramas del circuito sin tener alguna como preferencia. Ahora se considera que el filtro 5 entra a la etapa de retrolavado y que los filtros 6 y 7 se encuentran en la etapa de filtración, entonces se dice que $R5 > R6 \approx R7$. De una forma más detallada, la resistencia que pone el filtro 5 a dejar fluir el agua, incrementa debido a que tiene que superar el peso del lecho filtrante y realizar un recorrido ascendente hasta llegar a un grado de fluidización adecuado, el cual es necesario para una limpieza adecuada del lecho [10]. De acuerdo con esto es válido hacer la analogía con un circuito eléctrico donde la corriente fluye por el camino que le pone menos resistencia, entonces, se infiere que el agua escoge pasar por los filtros donde la resistencia a fluir es menor, causando así que el flujo en el filtro que se encuentra en retrolavado se disminuya y no se alcance el grado de limpieza en el lecho esperado. En la Ecuación 1 se describe la influencia de la tasa de filtración o lavado (dependiendo de la etapa del ciclo), con la resistencia del filtro, de la cual se puede observar que si la resistencia del filtro aumenta, la tasa de de lavado se hace menor [12]. Con esto se corrobora el

caso descrito anteriormente, donde va a pasar un mayor caudal por el filtro que tenga la menor resistencia.

$$Tasa\ de\ Filtraci3n\ o\ Lavado = \frac{Fuerza\ Impulsora}{Resistencia\ del\ Filtro} \quad \text{Ecuaci3n 4.}$$

En la Figura 10 se corrobora el hecho de que se necesita garantizar una velocidad de lavado para alcanzar el grado de limpieza requerido, adem1s, se muestra la relaci3n que hay entre la velocidad de lavado (directamente proporcional al caudal de entrada), con la expansi3n, la p3rdida de carga (grado de limpieza) y la modificaci3n en la profundidad del lecho filtrante.

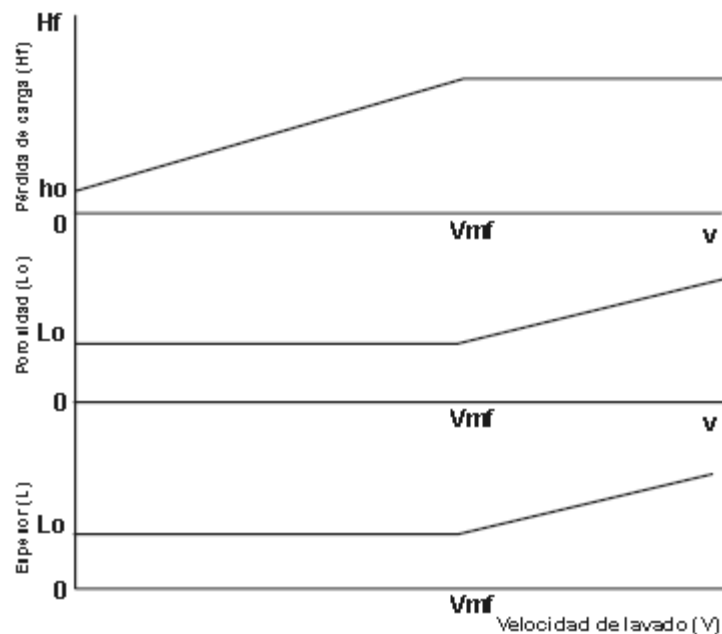


Figura 10. P3rdida de carga, profundidad del lecho y porosidad en funci3n de la velocidad de lavado (Caudal de lavado)

En la Figura 10 se aprecia que cuando la velocidad de lavado es baja, el lecho no se expande y su porosidad no se modifica mayormente. Si se aumenta la velocidad de lavado, la altura del medio filtrante se incrementará proporcionalmente a la velocidad del fluido y la porosidad crecerá de igual forma, pero conservando la velocidad intersticial y la resistencia al paso del agua aproximadamente iguales. S3lo cuando el lecho no est1 expandido la p3rdida de carga es una funci3n lineal de la velocidad del flujo ascendente, sin

embargo en cuanto este fluidifica, la pérdida de carga alcanza su valor terminal máximo [10].

De lo anterior se deduce que el sistema de filtración actualmente usado no está funcionando bien debido a su diseño y distribución que permite que la etapa de retrolavado en los filtros no se haga correctamente y que el lecho filtrante no quede completamente limpio. Como consecuencia de esto cuando empieza nuevamente la etapa de filtración, el lecho filtrante se satura antes del tiempo estipulado para la filtración, permitiendo que haya un tiempo entre la saturación y la finalización de la etapa de filtración en el que el agua pasa sin que haya retención de ningún tipo.

2.2.2 Sistema de flotación

El sistema de flotación presenta interferencias debido a la alta turbulencia generada por los inyectores de gas. Además, el tiempo de retención en los equipos de flotación es bajo para que se el fenómeno de coalescencia. La coalescencia consiste en la unión de pequeñas gotas de aceite que forman una de mayor tamaño que permite que ascienda con una mayor velocidad [11], su eficiencia depende del régimen en que se encuentre el fluido, de tal forma que cuanto mayor predominancia del régimen laminar mayor es la coalescencia.

En la figura 11, se ilustra el mecanismo por el cual el gas es inyectado en la celda de flotación. El gas inyectado forma burbujas que atrapan el aceite y lo arrastra a la superficie formando así, una capa sobrenadante [11].

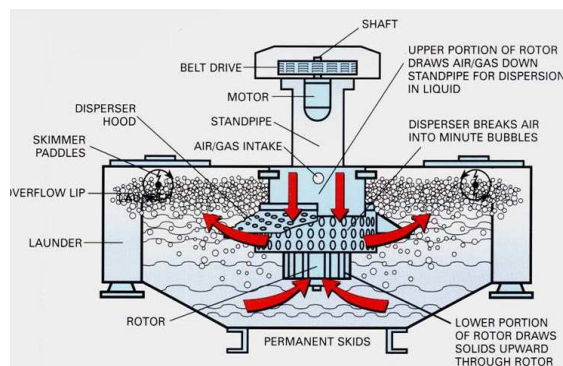


Figura 11. Unidad de flotación inducida por gas (IGF)

En la Figura 11 se nota una capa sobrenadante que se da por el arrastre de sólidos, aceite y grasas a la superficie causada por el gas inyectado, la cual es eliminada por una paleta que barre dicha capa cuando esta alcanza un nivel establecido. Una deficiencia notoria es la carencia de un nivel estándar en el equipo de flotación, de tal forma que cuando el nivel esta bajo hay que sacar el equipo de operación, de lo contrario la capa sobrenadante va a al sistema de filtración, excediendo los parámetros permisibles a la entrada de esta etapa, lo cual es de vital importancia que se mantengan estas condiciones para que haya un funcionamiento correcto.

2.3 INTERFERENCIAS DADAS POR LA PARTE OPERATIVA

En esta parte del texto se dan explicaciones físicas a las fallas producidas por la mano de obra y la manipulación por parte de los operarios, además se hace un análisis de que las fallas causadas por falta de mantenimiento en los equipos.

2.3.1 Mano de Obra y Manipulación de los equipos

Durante el trabajo de campo se hizo un seguimiento a la forma en que son operados los equipos en La Cira Infantas, el cual se evidenció que no hay parámetros estándares de operación. En otras palabras cada operario en su turno le asigna condiciones diferentes a los procesos dando mayor importancia al hecho de que el proceso funcione estabilizadamente, descuidando los estándares de calidad y las recomendaciones dadas por el proveedor en cuanto a operación de los equipos.

Un caso que influye de forma significativa en la baja calidad del agua de inyección es cuando a los filtros se les hace un bypass. Este fenómeno ocurre cuando el filtro ha terminado su etapa de filtración y en vez de que entre a la etapa de retrolavado se le hace una alteración en el programa que permita que el filtro no entre a retrolavado sino que prolongue la etapa en que se encuentra. De esto se deduce claramente que la calidad del agua se ve alterada, debido a que cuando se termina la etapa de filtración, el lecho de filtrado está completamente saturado, permitiendo que los sólidos suspendidos, grasas y

aceites y demás impurezas salgan en el efluente, registrando valores muy por encima de los valores máximos aceptados.

Otra falla que se le atribuye a errores de manipulación de los equipos es el hecho de no operarlos con el software original, lo cual causa controversias a la hora de operarlos, registrando valores ilógicos. Tomando un ejemplo visto durante el trabajo de campo, se detalló que un filtro en su etapa de llenado (llenado del filtro para iniciar la filtración) registraba en su volumen actual -3000 barriles, siendo un dato ilógico, debido a la mala manipulación en su sistema.

2.3.2 Mantenimiento de Equipos

Durante el análisis del funcionamiento de los equipos se pudo notar que hay una gran cantidad de equipos que desde que se instalaron no han recibido mantenimiento, lo que permite que disminuyan la eficiencia de separación y se altere la calidad del agua.

Algunos ejemplos de equipos que no han recibido mantenimiento son las celdas de flotación, los CPI (Interceptores de placas corrugadas) y el lecho de filtración de algunos filtros. En el primer caso, la falta de mantenimiento hace que el equipo retenga lodos, sedimentos y grasas por adherencia en las paredes, causando a su vez reducción en el espacio para la inyección del gas. En el segundo caso, se forma una capa sobre las platinas coalescedoras que genera reducción de la coalescencia del aceite. El último caso es el de mayor gravedad debido a que a medida que transcurre el tiempo la vida útil del lecho de filtración disminuye por el taponamiento de los poros del lecho causado por el incrustamiento de iones metálicos como hierro, calcio y magnesio, causando que el fenómeno de difusión no se vea afectado. Además el impacto inercial que causa el agua en el retrolavado hace que cada vez haya una cantidad de granos destruidos, los cuales tapan el filtro en la rejilla de salida.

De lo anterior se deduce que en La Cira Infantas se aplica la metodología correctiva que consiste en esperar que los equipos tengan fallas para hacerles mantenimiento y reparación. En la literatura se recomienda usar una metodología preventiva la cual está basada en un chequeo constante de los

equipos para prevenir fallas, lo cual hace que los costos por reparaciones y mantenimiento sean menores.

3. PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES A LAS INTERFERENCIAS PRESENTADAS

En esta etapa del texto se plantean algunas soluciones a los casos anteriormente presentados que causan interferencias en el proceso y hacen que la calidad del agua de inyección no cumpla los requerimientos establecidos. El planteamiento está basado en el mejoramiento del proceso actual y un nuevo diseño diligenciado por ICCD Ltda. y NEW GAS and OIL S.A.

3.1 MEJORAMIENTO DEL PROCESO ACTUAL

En la Figura 12 se muestra la distribución planteada para el sistema de filtración. Este planteamiento se hace siguiendo las recomendaciones técnicas del proveedor de filtros, que consisten en que cada filtro posea una bomba independiente para garantizar una presión y un caudal de entrada en cada filtro, sin importar la resistencia que este ponga.

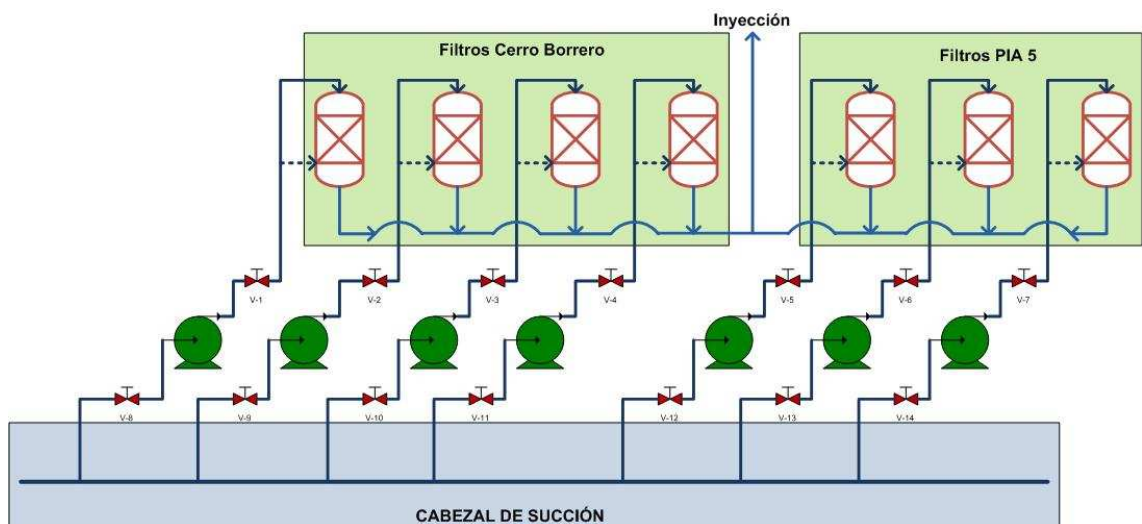


Figura 12. Sistema de filtración recomendado

Este sistema está actualmente montado en otros campos petroleros como Castilla II y Rubiales, de los cuales se puede decir que funcionan con eficiencias del 97 y 98 % en remoción de aceites y grasas y sólidos suspendidos.

En el sistema anteriormente mostrado, cada bomba cumple la función de acondicionar la fuerza impulsora (Proporcional a la presión), de tal forma que si algún filtro entra a la etapa de retrolavado, el agua va a encontrar una mayor resistencia por parte del filtro, entonces es necesario que la bomba aumente su presión de descarga junto con el caudal de succión, sin importar que las resistencias en los otros filtros sean menores. De esta forma se garantiza una tasa de lavado y una presión adecuada para que el lecho quede completamente limpio. Según la literatura la tasa de lavado debe ser alrededor de diez veces la tasa de filtración [9].

3.2 PLANTEAMIENTO DE UN NUEVO MONTAJE PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE AGUA PARA LA INYECCIÓN

En la Figura 13 se muestra el nuevo diseño propuesto para el acondicionamiento de aguas para la inyección, el cual es cortesía de las empresas prestadoras de servicio ICCD Ltda. y NEW GAS and OIL S.A. El proceso mostrado relaciona las variables de una manera óptima para garantizar un buen funcionamiento.

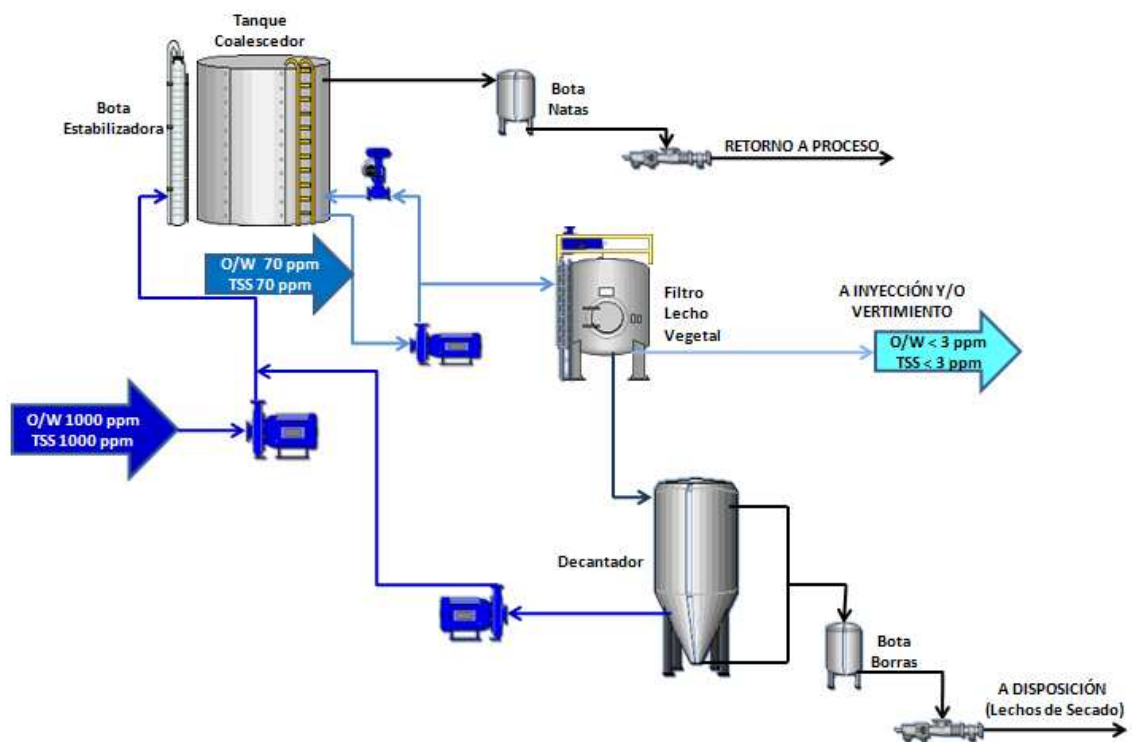


Figura 13. Diseño propuesto para el acondicionamiento de aguas en La Cira Infantas

La bota estabilizadora cumple la función de garantizar que al tanque coalescedor el agua entre en régimen laminar; el mecanismo por el cual lo hace, está limitado por derechos industriales que están patentados.

En el tanque coalescedor las gotas de aceite se separan por diferencia de densidades, viajan a la superficie del agua y se acumulan formando una nata que posteriormente se retirará. Cuanto mayor sea el tamaño de la gota de aceite mayor será la velocidad de ascenso, lo que significa que el aceite se podrá retirar en menor tiempo. Este fenómeno se describe con la ley de Stock, la cual se muestra a continuación:

$$V_o = \frac{1,78 * 10^6 * (\Delta SG) * (d^2)}{\mu_w} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Donde,

V_o : *Velocidad final de ascenso de la gota de aceite (ft/s)*

ΔSG: *Diferencia de gravedades específicas (Agua – Aceite)*

d: *Diámetro de la gota de aceite (μm)*

μ_w : *Viscosidad del agua (cp)*

De la Ecuación 5 se puede deducir que el tanque coalescedor está diseñado para que el diámetro de las gotas de aceite aumente, debido a la unión de gotas de diámetro menor, dando como resultado que el aceite se separe del agua rápidamente. Otro criterio que se puede dar para mejorar la separación es aumentar la temperatura del agua, ya que cuanto más alta es la temperatura, más baja es la viscosidad del agua y de esta manera se hace más grande la velocidad vertical.

Este diseño da una posible solución a los problemas que hay en la celda de flotación, tales como la turbulencia, el bajo tiempo de retención y la falta de un valor estándar en el nivel del agua, las cuales son variables muy influyentes en el buen funcionamiento del equipo.

Este tipo de equipo es utilizado en el tratamiento de aguas de producción, combinando la acción gravitacional con las propiedades de retención de medios coalescentes apropiados.

Los equipos son diseñados bajo la norma API, con dimensiones específicas de acuerdo a la necesidad de operación, su flujo es vertical y cuentan con un control automático para su operación.

El tanque se caracteriza por tener un volumen de gran capacidad que hace que el tiempo de retención sea aproximado a dos horas, el cual hace que se aumente la remoción de la carga de entrada. Las pruebas piloto han mostrado una alta eficiencia de remoción cuyo intervalo está entre el 97 y 98 %. En la Tabla 5 se muestran los parámetros máximos de entrada y salida característicos del diseño

Parámetros Máximos		
	Entrada	Salida
O/W (ppm)	1500	80
TSS (ppm)	500	80

Tabla 5. Parámetros de diseño máximos de entrada y salida en el tanque coalescedor

Como medio coalescente se utilizan paquetes de polipropileno de alta densidad los cuales garantizan la más alta eficiencia en la separación de aceites del agua. Los sólidos al estar expuestos al flujo ascendente de las pequeñas gotas de crudo son retirados por arrastre.

El flujo máximo para atravesar el medio coalescente es de 12 gpm/ft². La relación de volumen Vs área de contacto que usa este medio coalescente es de 132 ft³/ft². De acuerdo con estas características tiene altas eficiencias en la remoción de gotas de aceite mayores a 20 micras.

La separación del aceite se realiza por el contacto del medio de alta densidad con las gotas de aceite presentes en el agua las cuales se juntan y forman una gota lo suficientemente grande para flotar, formando una nata en la parte superior, eliminada por rebose. Además puede retornarse al proceso de crudo

En la Figura 14 se muestra las fases que se forman en el tanque coalescedor.

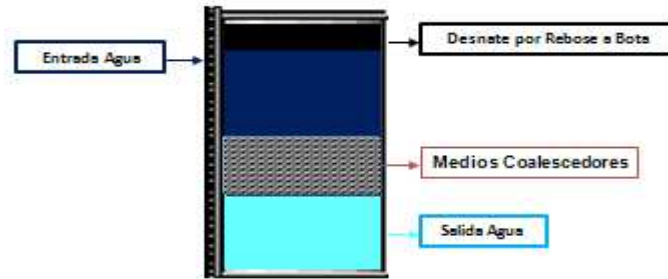


Figura 14. Separación de fases en el tanque coalescedor

Se implementa un sistema de control que garantiza que el nivel de agua en el tanque se mantenga en sus valores estándar. En la Figura 15 se muestra este esquema indicando los puntos donde se tendrá referencia del nivel de cada fase.

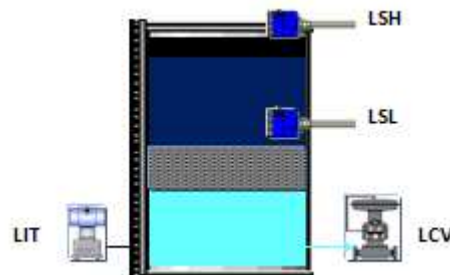


Figura 15. Esquema de control del nivel del tanque coalescedor

En la bota de natas se hace la recolección de la fase de aceites y grasas que se separa en el tanque coalescedor, donde previamente son retornadas al proceso para ser aprovechadas de una manera eficiente.

Los filtros reciben el agua clarificada del tanque coalescedor, la cual después de ser filtrada bajo las recomendaciones técnicas anteriormente dadas va directamente a ser inyectada en la formación del yacimiento. El agua de retrolavado se pasa por un decantador donde se separan tres fases, la fase de borras (capa espesa concentrada de aceites, grasas y sólidos suspendidos) que sale por la parte superior y la fase de lodos que sale por la parte inferior del decantador, la cual junto con la fase de borras va a disposición de un lecho de secado para previamente ser tratado. La fase media del decantador, es agua

mediamente clarificada que se recircula al inicio del proceso para aprovecharla nuevamente.

Características del proceso en general

- ✓ Garantiza la entrada del agua en régimen laminar al tanque coalescedor por medio de la bota estabilizadora.
- ✓ Un volumen relativamente grande en el tanque coalescedor hace que el tiempo de retención sea alto permitiendo que haya mayor tiempo para la separación.
- ✓ Los medios coalescentes hacen que las gotas de aceite tengan mayor contacto entre ellas para poder formar unas de mayor tamaño.
- ✓ El sistema de filtración opera en los intervalos de operación para los que está diseñado garantizando una salida que cumple los requerimientos de calidad.
- ✓ El proceso permite reutilizar el agua de las separaciones realizadas, con el objetivo de no hacer vertimientos al medio ambiente.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- ✓ De los resultados obtenidos en los gráficos de control de calidad, se puede establecer que es una forma muy acertada de estudiar el comportamiento de un proceso en cuanto a calidad y operatividad, ya que por este medio se pudo concluir que la calidad del agua inyectada en La Cira Infantas no está cumpliendo los requerimientos.
- ✓ Según la Figura 4 se puede concluir que la mayoría del tiempo la calidad del agua ha estado por encima de las especificaciones requeridas, lo que implica que es una alarma de advertencia para Ecopetrol S.A y demás empresas inversionistas, ya que si no se da solución inmediata, puede causar un taponamiento parcial o total en el yacimiento, requiriendo implementar trabajos de workcover, que tienen un costo muy elevado respecto a los costos del acondicionamiento por medio de facilidades.
- ✓ Con los gráficos de control de calidad se pudo focalizar que la variable con más incidencia en la baja calidad del agua es la de TSS, hecho que se corrobora en la Figura 4 donde se ve claramente que los valores están muy por encima de los de O/W.
- ✓ La baja eficiencia en el sistema de filtración se atribuye al diseño del sistema, el cual no cumple las especificaciones recomendadas por el proveedor, dentro de las cuales se incluye tener una bomba por cada filtro que garantice una filtración y un retrolavado correcto.
- ✓ En La Cira Infantas no existe un estándar de operación en los equipos, sino que en cada turno establecen patrones de operación diferentes, haciendo que lo importante sea que el proceso funcione en forma estabilizada, descuidando así la calidad del agua. Además, usan una

metodología correctiva para el mantenimiento de los equipos, lo cual requiere de un costo mayor.

- ✓ Garantizar el buen funcionamiento en los equipos de flotación implica que el proceso esté dentro de las especificaciones de calidad, de lo contrario, hace que la entrada en el sistema de filtración este por encima de las especificaciones y los parámetros permisibles, lo cual hace que la filtración no cumpla los requerimientos de calidad exigidos.

4.2 RECOMENDACIONES

- ✓ Los equipos implementados en La Cira Infantas garantizan un buen funcionamiento si se toman las indicaciones dadas por el proveedor, ya que han sido experimentados bajo estas condiciones dadas. Por lo tanto se recomienda emplear en el sistema de filtración una bomba por filtro ya que esto está dentro de las especificaciones del proveedor, además garantiza un correcto funcionamiento del proceso.
- ✓ Analizar y estudiar detalladamente los historiales de información proporcionados por NALCO S.A, que permiten ver el funcionamiento del proceso y las fallas más frecuentes que ocurren. Para este fin se pueden aplicar herramientas estadísticas que ayudan a describir la calidad del agua y a focalizar las variables con mayores fallas.
- ✓ Se recomienda la realización de mantenimientos periódicos a los equipos, lo que garantiza poder encontrar fallas que pueden ser relevantes, las cuales si no se controlan con tiempo pueden causar interferencias muy grandes.
- ✓ Evaluar el estado del lecho filtrante en los filtros, ya que puede encontrarse en estado de saturación y deterioro. En este caso es necesario cambiarla para que el proceso presente la eficiencia esperada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GOMÉZ PRADA, Luis G. Recobro Secundario Desplazamiento con Agua. Ing. De Petróleos, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Noviembre 1989. Cap. 1.
- [2] PEREZ UPEGUI, Jaime y BELTRAN WALTEROS, Gerardo. Estudio sobre inundación con agua e Inyección de gas como métodos usados en Recuperación Secundaria. Tesis (Ingeniería de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1959. Pág. 1-42.
- [3] RODRIGUEZ GUEVARA, Myriam y GOMEZ GOMEZ, Julián A. Evaluación de los tratamientos realizados al Agua de Inyección del campo Casabe. Tesis (Ingeniería de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1992. Pág. 4-52.
- [4] SIADO C., Celso y SANATAMARIA O., Efraín. Control y Disponibilidad del Agua Producida en Campos Petrolíferos. Tesis (Ingeniería de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1976. Pág. 1-62.
- [5] POWELL, Sheppard T. Acondicionamiento de Aguas para la Industria. Editorial LIMUSA, S.A. México, 1974. Pág. 45-48.
- [6] LA ROTTA MORA, Alexander. Evaluación del problema de Corrosión Asociado con la calidad del Agua de Inyección. Campo La Cira. Tesis (Ingeniería de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. 1993. Pág. 1-21.
- [7] LÓPEZ PEREZ, Cesar. Control Estadístico de la Calidad; Teoría Práctica y Aplicaciones Informáticas. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. México, 1999. Capítulos 2 y 7.
- [8] GRANT, Eugene L. Control de Calidad Estadístico. COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. México, 1976.
- [9] ROMERO ROJAS, Jairo A. Acuípurificación. Publicado por: Escuela Colombiana de Ingeniería. Santafé de Bogotá, D.C-Colombia, 1993.

[10] ING. MALDONADO YACTAYO, Víctor. Filtración. Capítulo 9.

[11] JAIMES CAMPOS, Diana M. y PICO JIMENEZ, María I. Diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales y de Producción evaluando las diferentes Alternativas Nacionales y Extranjeras- Aplicación Campo Colorado. Tesis (Ingeniería de Petróleos). Universidad Industrial de Santander. 2008. Cap 1 y 2.

[12] METCALF & EDDY. INGENIERÍA DE AGUAS RESIDUALES. Tratamiento, Vertido y Reutilización. Tercera Edición. Editorial McGraw-Hill. España, 1995. Volumen 1, Capítulos 6 y 7.

[13] NALCO CHEMICAL COMPANY. Oxygen Scavengers. Printed U.S.A, 2000. Versión Pdf online. Disponible en:
<http://www.onlinewatertreatment.com/literature/Nalco/docs/B-116.pdf>

[14] ARKEMA. ORGANIC CHEMICAL. Oxygen Scavengers. E-OrganicChemicals.com. Philadelphia, 2000. Versión Pdf online. Disponible en:
<http://www.arkema-inc.com/literature/pdf/346.pdf>

[15] Manual y Fichas Técnicas de Filtros New Water. NEW GAS and OIL S.A. Bucaramanga. Carrera 37 n° 52-4, oficina 1001. Tele fax: (7) 6574601-6435471.

[16] Tratamientos Químicos del Agua. Disponible en línea en:
http://www.madrimasd.org/experimentawiki/feria/Tratamientos_de_coagulación/floculación

[17] SANTIAGO REYES, Miguel Ángel. Crónica de la Concesión de Mares. Ecopetrol. Bogotá, 1986. Páginas 30-34.

ANEXOS

ANEXO A. INTERFERENCIAS Y CAUSAS DEBIDO A LA PRESENCIA DE OXIGENO Y HIERRO DISUELTO EN EL AGUA DE INYECCION

La presencia de oxígeno y hierro en el agua de La Cira Infantas se muestra en las Figuras 1A, 2A, 3A y 4A. Se toman como referencia los filtros 3 y 5, debido a que las gráficas de los siete filtros tienen un comportamiento muy similar. Con estas gráficas se corrobora la presencia de oxígeno y hierro en el agua, de lo que se puede deducir que tiene una capacidad corrosiva alta sobre los equipos y las líneas de conducción.

Lo que se quiere con el oxígeno es reducirlo totalmente hasta cero, ya sea por procesos de desoxigenación o por medio de agregación de secuestrantes de oxígeno, ya que su presencia por mínima que sea implica un grado de corrosión ya sea directamente en los equipos y/o líneas de conducción o por medio del hierro que se encuentra en solución.

Lo pretendido para el hierro actualmente en La Cira Infantas es mantenerlo en solución, de tal forma que no se precipite en los equipos. Para lograr tal objetivo se debe controlar el pH y que la cantidad de oxígeno sea cero.

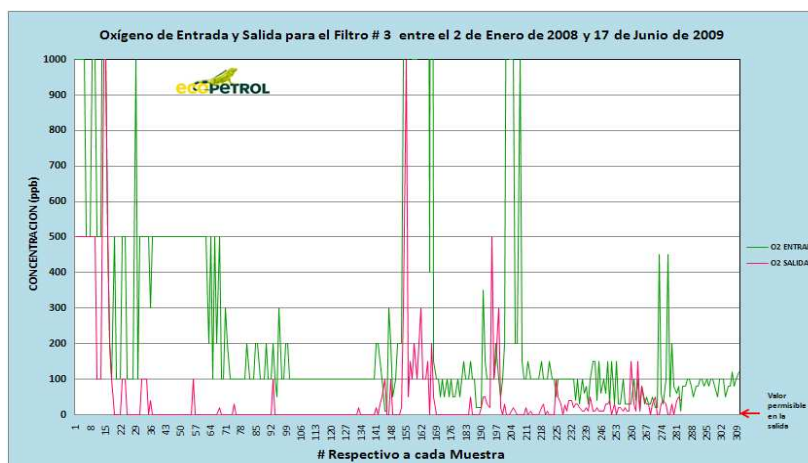


Figura 1A. Presencia de Oxígeno en el agua del filtro 3

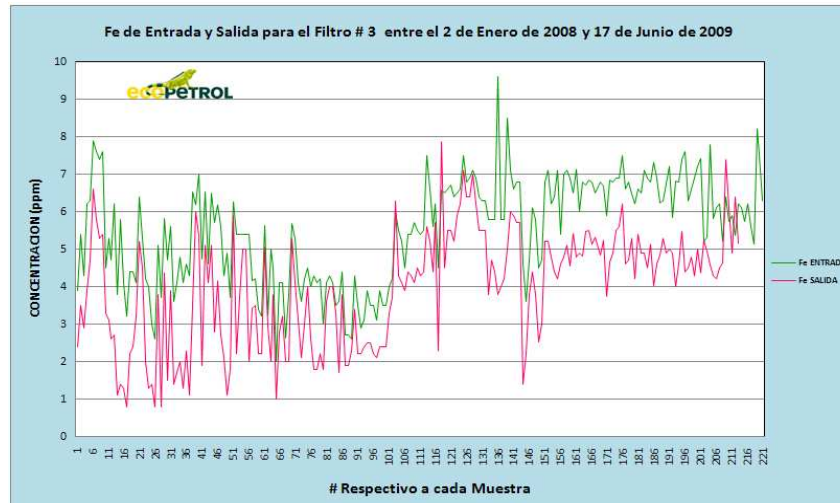


Figura 2A. Presencia de Hierro en el agua del filtro 3

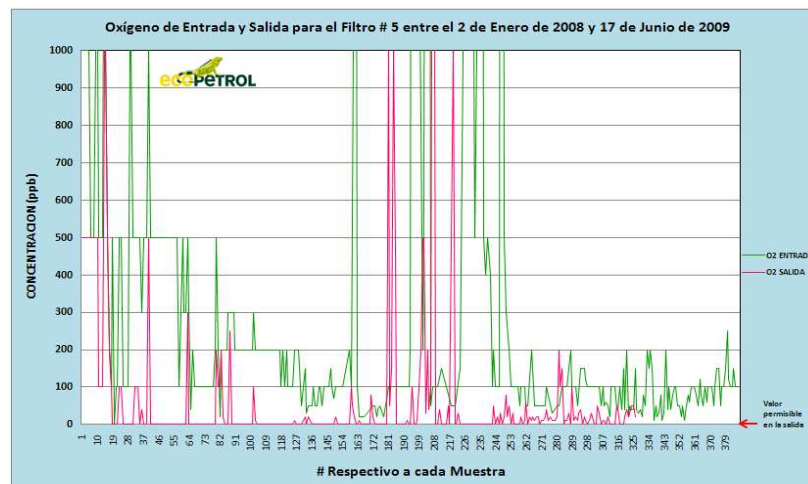


Figura 3A. Presencia de Oxígeno en el filtro 5

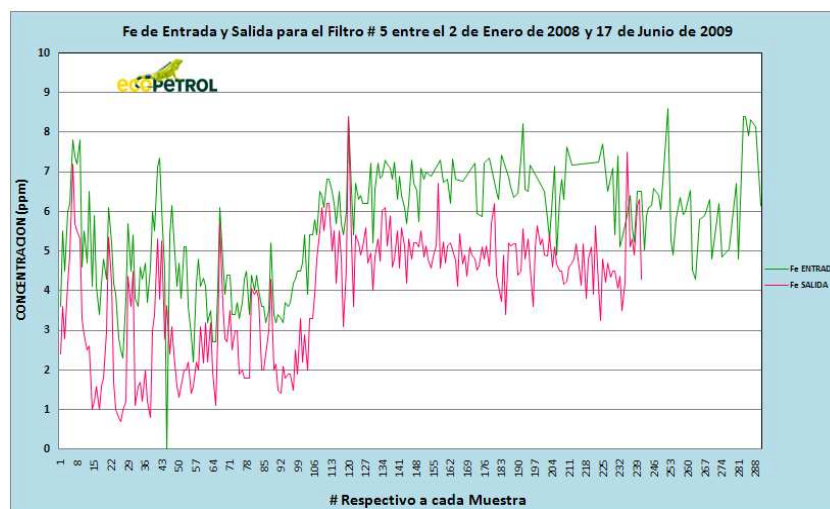


Figura 4A. Presencia de Hierro en el filtro 5

Causas debidas a la presencia de Hierro y Oxígeno en el agua

El oxígeno al entrar en contacto con el acero de los equipos o las tuberías causa efectos de corrosión como los describe la Figura 5A.

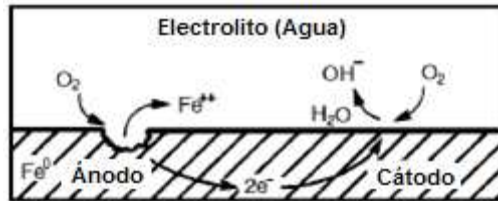
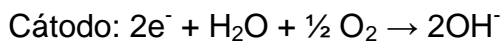
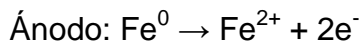


Figura 5A. Mecanismo de corrosión del acero de los equipos y las tuberías por causa del oxígeno disuelto.

Las reacciones que describen el fenómeno mostrado en la figura anterior son las siguientes [13]:



Debido al alto grado de corrosividad del agua, se muestran las figuras 6A y 7A, donde se puede apreciar el grado de corrosión en un filtro y unas bombas respectivamente.



Figura 6A. Corrosión de filtro New Water, debido al derrame de agua en el mantenimiento del scrubber.



Figura 7A. Corrosión en las bombas debido al alto grado de corrosividad del agua.

Tratamiento químico por medio de secuestrantes de Oxígeno e inhibidores de Corrosión

Estos tratamientos reducen de una manera significativa la corrosividad del proceso, hasta un punto donde esta se hace despreciable. A continuación se describe claramente cada tratamiento.

Secuestrantes de Oxígeno

Los secuestrantes de oxígeno son sustancias químicas añadidas, para remover el oxígeno residual disuelto, debido a que el oxígeno disuelto puede causar el daño de corrosión a las altas presiones encontradas en equipos, por lo cual debe ser eliminado. Su función es reaccionar rápidamente con el oxígeno, pasivando la superficie del acero, sin tener alguna volatilidad, es por esto que no todos cumplen con estas especificaciones [14].

A continuación en la Figura 8A se muestran dos gráficas que comparan las velocidades de reacción de varios secuestrantes de oxígeno, a 70 °F y distintos valores de pH. En esta Figura se puede apreciar la cantidad de oxígeno disuelto al transcurrir el tiempo, donde se ve claramente que la cantidad de oxígeno disuelto va disminuyendo [14].

De la Figura 8A se puede deducir que los secuestrantes que presentan una mayor eficiencia a las condiciones mostradas son el sulfito y el DEHA

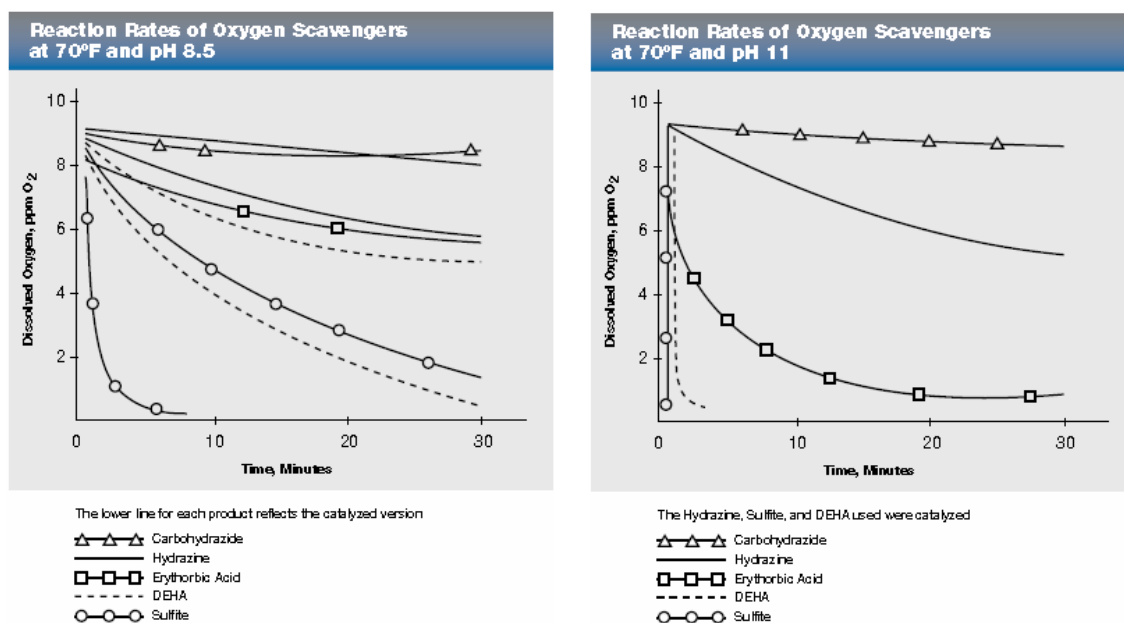


Figura 8A. Velocidades de reacción de diversos secuestrantes de oxígeno a 70°F y valores de pH de 8,5 y 11.

Inhibidores de Corrosión

Los inhibidores son sustancias químicas que reaccionan con una superficie metálica, o con el ambiente a la que está expuesta la superficie, dándole un cierto nivel de protección. Los inhibidores con frecuencia trabajan por la absorción de sí mismos en la superficie metálica, protegiendo la superficie metálica mediante la formación de una película. Los inhibidores están normalmente distribuidos en solución o dispersión. Algunos se encuentran incluidos en una formulación de pintura protectora. Los inhibidores hacen que el proceso de corrosión se lleve lentamente mediante:

- ✓ El aumento del comportamiento de polarización anódica o catódica (pendientes de Tafel).
- ✓ La reducción de la circulación o difusión de los iones a la superficie metálica.
- ✓ El aumento de la resistencia eléctrica de la superficie metálica.

Por definición, un inhibidor de corrosión es una sustancia química que, cuando se añade en pequeñas concentraciones a un ambiente, efectivamente disminuye la velocidad de corrosión. La eficacia de un inhibidor se expresa así por una medida de esta mejora:

$$\text{Eficiencia del Inhibidor (\%)} = \frac{CR_{\text{Sin Inhibición}} - CR_{\text{Inhibida}}}{CR_{\text{Sin Inhibición}}} \times 100$$

$CR_{\text{Sin Inhibición}}$: velocidad de corrosión del sistema sin inhibición

CR_{Inhibida} : velocidad de corrosión del sistema inhibido

En la Tabla 1A se presentan algunos sistemas corrosivos y los inhibidores usados para protegerlos.

SISTEMA	INHIBIDOR	METALES	CONCENTRACIÓN
Agua Potable	Bicarbonato de Sodio	Acero, Fe fundido	10 ppm
..	Polifosfato	Fe, Zn, Cu, Al	5-10 ppm
..	Hidróxido de Calcio	Fe, Zn, Cu	10 ppm
..	Silicato de Sodio	..	10-20 ppm
Máquinas Refrigerantes	Cromato de sodio	Fe, Pb, Cu, Zn	0.1-1%
..	Nitrito de sodio	Fe	0.1-1%
..	Bórax	..	1%
Glicol/agua	Bórax + MBT	Todos	1% + 0.1%
Aguas de campos petroleros	Silicato de Sodio	Fe	0.01%
..	Cuaternarios	..	10-25 ppm
..	Imidazolina	..	10-25ppm
Agua de mar	Silicato de sodio	Zn	10 ppm
..	Nitrito de sodio	Fe	0.5%
..	Bicarbonato de sodio	Todos	Dependiendo del pH

Tabla 1A. Sistemas Corrosivos con sus inhibidores usados para su protección

ANEXO B. ACONDICIONAMIENTO FISICO Y QUIMICO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE INYECCION

ACONDICIONAMIENTO FÍSICO

Aireación

Este proceso se realiza en una piscina de aireación, la cual tiene una relación de área superficial/volumen alta, la cual hace que el contacto agua-aire sea considerado alto. Se basa en la separación gravitacional y, al igual que en algunos sistemas de tratamiento primario, se encuentran expuestos a la atmosfera para reducir la concentración de aceite soluble por efecto de la presión, disminuir la temperatura y eliminar el H_2S y CO_2 al permitirse la aireación del agua. En ellas también se produce la biodegradación de compuestos orgánicos disueltos y la sedimentación de sólidos [11]. En la Figura 9A se muestra una fotografía de una piscina de aireación.



Figura 1B. Piscina de Aireación.

Flotación

Este proceso es encargado de separar sólidos suspendidos, aceites y grasas que se encuentran en el agua. Se inyecta un gas inerte, el cual hace que se generen microburbujas que se adhieren a los sólidos y aceites llevándolos a la superficie, para luego ser eliminado por una paleta que limpia la capa superior. Este proceso mejora la separación de las gotas de aceite de la fase continua. Este objetivo es alcanzado por el incremento de la diferencia entre la densidad de los dos fluidos al juntar las burbujas de gas con las de aceite. Este proceso requiere hacer una reducción significativa en el tiempo de retención en los equipos [11]. En la Figura 10A se muestra un equipo donde se realiza el proceso de flotación.

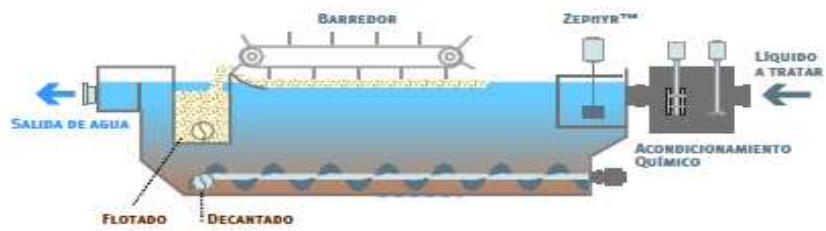


Figura 2B. Sistema de Flotación por Gas Inducido.

Filtración

La filtración consiste en la remoción de partículas suspendidas, disueltas y coloidales (turbiedad) presentes en una solución acuosa que pasa a través de un medio poroso. En general la filtración es la operación final de clarificación que se realiza en una planta de tratamiento de agua y, por consiguiente, es la responsable de la producción de agua de calidad coincidente con los estándares requeridos. A continuación se muestran las principales variables y los mecanismos de remoción predominantes que influyen en la filtración [9].

VARIABLE	SIGNIFICADO
1. Características del medio filtrante <ul style="list-style-type: none"> a. Tamaño de grano b. Distribución granulométrica c. Forma, densidad y composición del grano d. Carga del medio 	Afecta la eficiencia de remoción de partículas y el incremento en pérdida de carga.
2. Porosidad del lecho filtrante	Determina la cantidad de sólidos que pueden almacenarse en el filtro.
3. Profundidad del lecho filtrante	Afecta la pérdida de carga y la duración de la carrera.
4. Tasa de filtración	Determina el área requerida y la pérdida de carga. Afecta la calidad del afluente.
5. Pérdida de carga disponible	Variable de diseño.
6. Características del afluente <ul style="list-style-type: none"> a. Concentración de sólidos suspendidos b. Tamaño y distribución del floc c. Resistencia del floc d. Carga eléctrica del floc e. Propiedades del fluido 	Afectan las características de remoción del filtro.

MECANISMO	DESCRIPCIÓN
1. Cribado a. Mecánico b. Oportunidad de contacto	<p>Partículas más grandes que los poros del medio son retenidos mecánicamente.</p> <p>Partículas más pequeñas que los poros del medio son retenidas por oportunidad de contacto.</p>
2. Sedimentación	<p>Las partículas se sedimentan sobre el medio filtrante, dentro del filtro.</p>
3. Impacto inercial	<p>Las partículas pesadas no siguen las líneas de corriente.</p>
4. Intercepción	<p>Muchas partículas que se mueven a lo largo de una línea de corriente son removidas cuando entran en contacto con la superficie del medio.</p>
5. Adhesión	<p>Las partículas floculentas se adhieren a la superficie del medio filtrante. Debido a la fuerza de arrastre del agua, algunas son arrastradas antes de adherirse fuertemente y empujadas más profundamente dentro del filtro. A medida que el lecho se tapona, la fuerza constante superficial aumenta hasta un límite para el cual no hay remoción adicional. Algún material se fugará a través del fondo del filtro haciendo aparecer turbiedad en el efluente.</p>
6. Adsorción química a. Enlace b. Interacción química	<p>Una vez que una partícula ha entrado en contacto con la superficie del medio filtrante o con otras partículas, la adsorción, física y/o químicas, permite su retención sobre dichas superficies.</p>
7. Adsorción física a. Fuerzas electrostáticas b. Fuerzas electrocinéticas c. Fuerzas de Vander Waals	
8. Floculación	
9. Crecimiento biológico	<p>Partículas más grandes capturan partículas más pequeñas y forman partículas aún más grandes.</p> <p>Reduce el volumen del poro y puede promover la remoción de partículas.</p>

El ciclo de filtración comprende dos etapas, la etapa de filtración y el retrolavado del filtro. El funcionamiento de estas etapas se describe a continuación:

Filtración: La figura 3B ilustra la etapa de filtración de un filtro New Water [15].

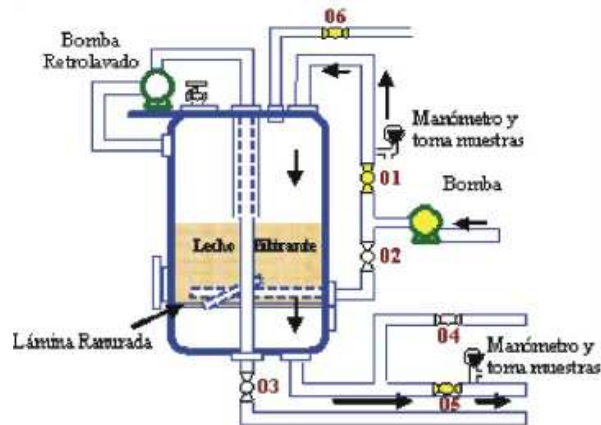


Figura 3B. Funcionamiento en la etapa de filtrado de un filtro.

- ✓ El flujo es vertical descendente.
- ✓ Las válvulas 01, 05 y 06 permanecen abiertas y las válvulas 02, 03 y 04 deben permanecer cerradas.
- ✓ El venteo de gas y de aceite del techo es hecho continuamente a través de la válvula 06.

Retrolavado: El funcionamiento de esta etapa se ilustra en la Figura 4B [15].

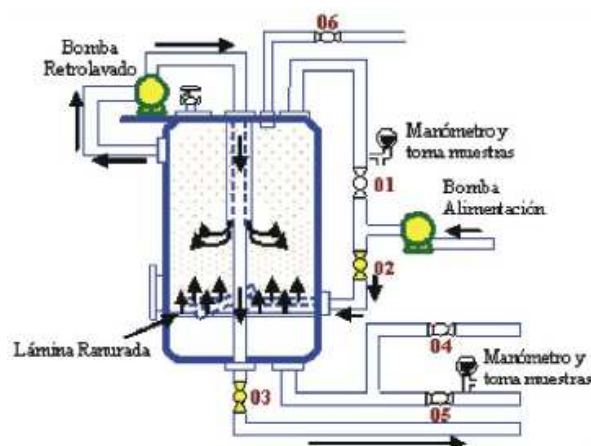


Figura 4B. Funcionamiento en la etapa de retrolavado en un filtro

- ✓ El flujo es ascendente para fluidizar el lecho filtrante y así retirar sólidos y residuos aceitosos.
- ✓ Las válvulas 02 y 03 están abiertas y las válvulas 01, 04, 05 y 06 están cerradas.
- ✓ Activación de la bomba de retrolavado, la cual cumple un efecto de restregado del lecho filtrante.

Características del lecho filtrante de los filtros

- ✓ Su nombre comercial es cascarilla de palma africana.
- ✓ Su aspecto físico es granulado tamizado de color café.
- ✓ Su pH se encuentra entre 6,5 y 8,5.
- ✓ Su densidad está comprendida entre 0,7 y 0,8 g/ml
- ✓ El porcentaje de humedad es 10,27%
- ✓ El porcentaje de grasa es 0,86%
- ✓ El coeficiente de uniformidad es $< 1,5$
- ✓ Posee propiedades oleofílicas que permiten que haya afinidad para retener los aceites y las grasas.



Figura 5B. Lecho filtrante (cascarilla de palma africana)

Decantación

La decantación es un método físico de separación de mezclas heterogéneas, que consiste en utilizar las fuerzas de gravedad para separar una partícula de densidad superior a la del líquido hasta una superficie o zona de almacenamiento.

Para que pueda haber una separación efectiva se precisa, además, que las fuerzas de gravedad tengan un valor suficientemente elevado con relación a sus efectos antagonistas: efectos de rozamiento, turbulencia, repulsión electrostática, corrientes de convección, etc. Para facilitar la comprensión de los fenómenos que intervienen deben distinguirse los efectos relacionados con el movimiento de la partícula y los relacionados con el movimiento del líquido [9].

El objeto de la decantación es el de conseguir que se depositen las partículas que se encuentran en suspensión en el agua, tanto si se trata de partículas presentes en el agua bruta como si se deben a la acción de un reactivo químico añadido en el tratamiento e incluso de las que resultan de una floculación física ligada a una acción biológica.

TRATAMIENTOS QUÍMICOS

Coagulación Química

La coagulación química puede definirse como un proceso unitario usado para causar la coalescencia o agregación de material suspendido no sedimentable y partículas coloidales de aguas residuales. Es el proceso por el cual se reducen las fuerzas repelentes existentes entre partículas coloidales para formar partículas de mayor tamaño y de esta forma aumentar la sedimentación. El proceso está compuesto por la adición de sustancias químicas al agua, las cuales proporcionan una distribución uniforme en ella, formando un floc fácilmente sedimentable.

La coagulación acondiciona el agua para la sedimentación, incrementando grandemente la eficiencia de los sedimentadores, además tiene como función principal desestabilizar, agregar y unir las sustancias coloidales presentes en el agua. El proceso remueve turbiedad, color, bacterias, algas y otros organismos planctónicos, fosfatos y sustancias proveedoras de olores y sabores.

Las aguas crudas naturales contienen tres tipos de sólidos no sedimentables: suspendidos, coloidales y disueltos. Los sólidos suspendidos son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua; los más

pequeños (menos de 0,01 mm) no sedimentan rápidamente y se consideran sólidos no sedimentables y los más grandes (mayores de 0,01 mm) son generalmente sedimentables. La siguiente tabla permite visualizar la lentitud de asentamiento de las partículas en el agua.

Diámetro de Partícula (mm)	Partícula Representativa	Tiempo requerido para una profundidad de asentamiento de 0,3 m
Sedimentables		
10	Grava	0,3 s
1	Arena Gruesa	3 s
0,1	Arena Fina	38 s
0,01	Limo	33 min
No Sedimentables		
0,001	Bacterias	55 horas
0,0001	Color	230 días
0,00001	Coloides	6,3 años
0,000001	Coloides	63 años

Tabla 1B. Velocidad de Sedimentación de partículas dependiendo del diámetro

En la figura de a continuación, se muestra como los coagulantes cancelan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide permitiendo la aglomeración y la formación de flocúlos. Estos flocúlos inicialmente son pequeños, pero se juntan y forman aglomerados mayores capaces de sedimentar. Para favorecer la formación de aglomerados de mayor tamaño se adicionan un grupo de productos denominados floculantes, destinados a favorecer la formación de un flocúlo voluminoso, pesado y coherente.

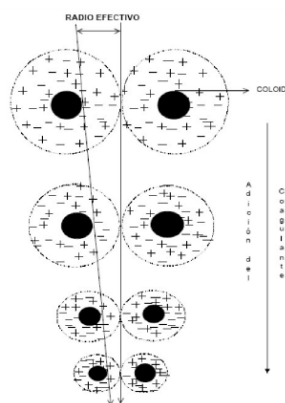


Figura 6B. Desestabilización del coloide y compresión de la capa difusa

Floculación

La floculación es una operación basada en la agregación de las partículas coloidales previamente desestabilizadas en la etapa de coagulación, formando partículas de mayor tamaño (flóculos) que permitan su sedimentación. La formación de estos flóculos se favorece con la adición de polielectrolitos que se caracterizan por moléculas orgánicas poliméricas que son ionizables. Estos compuestos forman puentes entre las partículas, dando lugar a fenómeno de floculación con partículas de mayor tamaño que resultan sedimentables [16].

En el proceso de floculación es importante conseguir el flóculo de mayor peso y cohesión posible, ya que estas características facilitan su eliminación, en general algunos de los siguientes medios favorecen el engrosamiento y consecuentemente, la sedimentabilidad del flóculo:

- ✓ Una coagulación previa tan perfecta como sea posible.
- ✓ Un aumento de la cantidad de flóculos en el agua. Así, conviene poner el agua en contacto con los precipitados ya formados por el tratamiento anterior (recirculación de fangos, lecho de fangos, etc.), tratando de conseguir la mayor concentración posible.
- ✓ Una agitación lenta y homogénea del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas coloidales descargadas eléctricamente se encuentren con un flóculo.
- ✓ El empleo de ciertos productos llamados floculantes.

Los floculantes, llamados también coadyuvantes de floculación, son productos destinados a favorecer el proceso de floculación es decir, la formación de un flóculo voluminoso, pesado y coherente; la acción puede ejercerse al nivel de la velocidad de reacción (floculación más rápida) o al nivel de la calidad del flóculo. En muchos casos, los floculantes vienen a resolver problemas importantes, tales como flóculos pequeños, de sedimentación lenta, formados durante la coagulación a baja temperatura o flóculos frágiles que se fragmentan al someterse a las fuerzas hidráulicas en los estanques y filtros de arena [16].

ANEXO C. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS Y GRÁFICOS DE CONTROL

El control de calidad consiste esencialmente en medir las características de calidad de un producto, compararlas con las especificaciones o requisitos y, cuando existe discrepancia, realizar las correcciones adecuadas.

Se puede considerar como un proceso como una combinación de máquinas, materiales, métodos, mano de obra, medio ambiente y mantenimiento, que intervienen en la producción y calidad. Esto en cualquier proceso se caracteriza por un cierto grado de variabilidad que no se puede eliminar completamente, debido a que las condiciones de trabajo no son constantes por motivos como las variaciones en las materias primas, el desgaste de las herramientas, operarios poco entrenados, etc. Dentro del concepto general de variabilidad, se conoce como variabilidad natural a la producida por innumerables pequeñas causas no asignables, comunes o aleatorias, que son tan ligeras que no pueden considerarse individualmente como razón única de una desviación del proceso. Son de naturaleza aleatoria, y como depender del azar, se puede realizar su estudio por métodos estadísticos. Por otra parte se denomina variación accidental a la producida por causas asignables, especiales o atribuibles, es decir, la que podemos investigar hasta dar razón específica que la produce y que además suelen ocasionar desviaciones relativamente grandes en el resultado del proceso [7].

Gráficos de Control

Cuando en un proceso de fabricación la variabilidad inherente o natural (efecto acumulativo de muchas causas fortuitas, esencialmente incontrolables o no asignables) es relativamente pequeña, suele considerarse un nivel aceptable del funcionamiento del proceso. En el marco de control estadístico de calidad de un proceso que funciona con sólo variabilidad natural se considera un proceso bajo control estadístico.

Otro tipo de variabilidad que puede estar presente ocasionalmente en el resultado de un proceso es la variabilidad accidental, producida por causas

asignables como ajuste incorrecto de máquinas, errores de operarios o defectos en las materias primas (o alguna combinación de estos factores). Esta variabilidad es en general mayor que la natural, y normalmente representa un nivel inaceptable del funcionamiento del proceso. En el marco del control estadístico de calidad de un proceso que funciona en presencia de causas asignables (o atribuibles) se considera como proceso fuera de control estadístico.

Los diagramas de control o gráficos de control han tenido un largo historial de uso en las industrias de Estados Unidos y Japón, así como en muchas industrias de otros países. Hay muchas razones por las que los gráficos de control siguen utilizándose actualmente en control de calidad.

Principios estadísticos Básicos de un Diagrama de Control

Un diagrama de control es una representación gráfica de una característica de calidad, medida o calculada a partir de muestras del producto, en función del número de las muestras o el tiempo. La gráfica tiene una línea central que representa el valor medio de las características de calidad correspondientes al estado bajo control (es decir, solamente hay causas fortuitas). Además en la gráfica se muestran también otras dos líneas horizontales, llamadas límite superior de control (LSC) y límite inferior de control (LIC). Mientras los puntos se encuentren entre los límites, se considera que el proceso está bajo control y no es necesario tomar ninguna acción, como se puede ver en la Figura 1B.

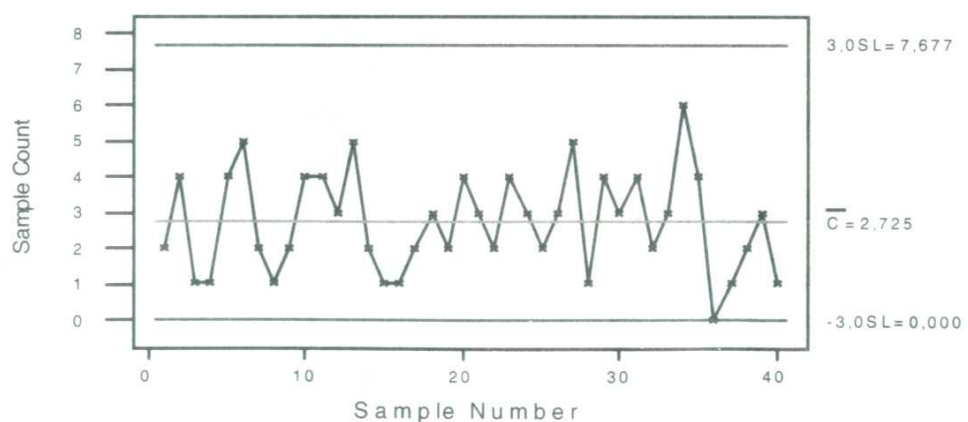


Figura 1B. Características de un proceso bajo Control

Sin embargo, un punto que se encuentre fuera de los límites de control se interpreta como una evidencia de que el proceso está fuera de control, y son necesarias acciones de investigación y corrección a fin de encontrar con el fin de eliminar la o las causas asignables a este comportamiento, hecho que se puede ver en la Figura 2B, en el gráfico de control de la parte inferior. Se acostumbra a unir los diferentes puntos muestrales en el diagrama de control mediante segmentos rectilíneos con objeto de visualizar mejor la evolución de la secuencia de los puntos en el tiempo [7, 8].

Incluso si todos los puntos se hallan comprendidos entre los límites de control, pero se comportan de manera sistemática o no aleatoria, esto indica que el proceso está fuera de control. Por ejemplo, en el gráfico de control de la parte superior de la Figura 2B todos los puntos hasta la mitad de la gráfica se encuentran por debajo de la línea central, aunque estén por encima del límite inferior de control, y de media gráfica en adelante todos los puntos salvo uno se encuentran por encima de la línea central. Este comportamiento indica ausencia de aleatoriedad. Además se observa cierta periodicidad en la primera mitad y hay dos puntos por encima del límite superior de control con lo que se conjetura que algo anda mal. Si el proceso está bajo control todos los puntos deben tener un esquema esencialmente aleatorio. Por lo general hay una causa por lo que aparece cierto patrón no aleatorio en un diagrama de control, y si se puede encontrar y eliminar, es posible mejorar el funcionamiento del proceso.

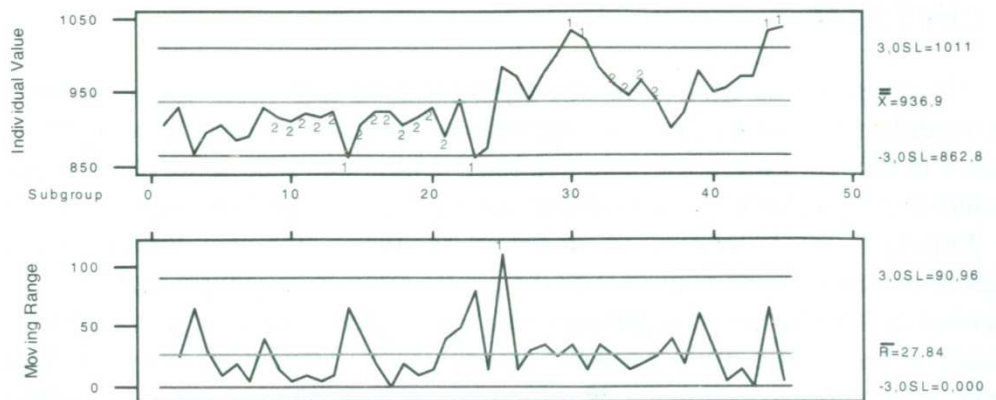


Figura 2B. Características de Proceso fuera de control

MODELO DE SHEWHART PARA GRÁFICOS DE CONTROL

Dada la importancia de los diagramas de control como herramientas de rastreo y vigilancia de los procesos, como herramientas de reducción de la variabilidad de los procesos y también como herramientas de estimación de los parámetros de producto o de proceso, se estableció un modelo general para la construcción de los gráficos de control que puede especificarse de la forma siguiente:

Sea T un estadístico muestral que mide alguna característica de calidad de interés, y supóngase que la media de T es μ_T , y su desviación estándar, es σ_T . Entonces la línea central y los límites superior e inferior del gráfico de control son:

$$\text{LSC} = \mu_T + k\sigma_T$$

$$\text{Línea Central} = \mu_T$$

$$\text{LIC} = \mu_T - k\sigma_T$$

donde k es la distancia entre los límites de control y la línea central, expresada en desviaciones estándares. El doctor Walter A. Shewhart propuso esta teoría general de los diagramas de control por primera vez, y dichas gráficas, desarrolladas según estos principios, se llaman frecuentemente **diagramas de Shewhart** [7].

Ya sabemos que en ocasiones se utilizan dos conjuntos de límites de control en los diagramas, límites exteriores y límites interiores. Los **límites exteriores o límites normales de acción**, que normalmente son los límites 3 sigmas, se obtienen haciendo $k=3$ en el modelo de Shewhart, con lo que estos límites de control vendrán dados por:

$$\text{LSC} = \mu_T + 3\sigma_T$$

$$\text{Línea Central} = \mu_T$$

$$\text{LIC} = \mu_T - 3\sigma_T$$

Los **límites interiores o límites de advertencia**, que normalmente son los límites 2 sigmas, se obtienen haciendo $k=2$ en el modelo de Shewhart, con lo que estos límites de control vendrán dados por:

$$\text{LSCA} = \mu_T + 2\sigma_T$$

$$\text{Línea Central} = \mu_T$$

$$\text{LICA} = \mu_T - 2\sigma_T$$

Diagrama de control para la media con patrón dado

Suponga que una característica de calidad X cuantitativa está distribuida normalmente, **con media μ y desviación estándar σ , ambas conocidas**. Si $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ es una muestra de X de tamaño N , entonces la media muestral \bar{X} sigue una distribución normal de media μ y desviación típica σ/\sqrt{N} . Como normalmente los datos muestrales vienen agrupados en subgrupos racionales o estratos, podemos suponer que se dispone vienen agrupados en subgrupos racionales o estratos, podemos suponer que se dispone de k muestras $(x_{11}, \dots, x_{1n_1}), \dots, (x_{k1}, \dots, x_{kn_k})$ cada una con n_i observaciones de la característica de calidad X dada ($i=1, \dots, k$ y $N=\sum n_i$). Por lo general los n_i serán pequeños, muchas veces igual a 4,5 o 6. Estos tamaños resultan e la construcción de subgrupos racionales, y del hecho de que los costos de muestreo e inspección asociados a mediciones de variables, son, por lo regular, relativamente altos. Sean $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k$ las k medidas de las muestras. Entonces, el mejor estimador de μ , la media del proceso, es la gran media de las medias de las k muestras. Su valor será:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{x}_i, \text{ siendo } \bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} \quad i=1, \dots, k$$

Como $E(\bar{x}_i) = \mu \Rightarrow E(\bar{\bar{X}}) = \mu$

Sabemos que $E(\bar{x}_i) = \mu$ y $\sigma[\bar{x}_i] = \sigma/\sqrt{n_i}$. Entonces, por el teorema central del límite se cumple que:

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n_i}} \rightarrow N(0,1)$$

Por lo tanto, mediante la distribución normal $N(0,1)$, para un α dado, podemos calcular k_α tal que:

$$P\left(-k_\alpha \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n_i}} \leq k_\alpha\right) = 1 - \alpha$$

Pero de esta expresión se deduce que $F_{N(0,1)}(k_\alpha) - F_{N(0,1)}(-k_\alpha) = 1 - \alpha \Rightarrow F_{N(0,1)}(k_\alpha) - (1 - F_{N(0,1)}(k_\alpha)) = 1 - \alpha \Rightarrow 2F_{N(0,1)}(k_\alpha) - 1 = 1 - \alpha \Rightarrow F_{N(0,1)}(k_\alpha) = 1 - \alpha/2$ con lo que k_α valdrá $F^{-1}(1 - \alpha/2)$, siendo F la función de distribución de la normal $N(0,1)$.

Como para $i=1, \dots, k$ se cumple que:

$$-k_\alpha \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n_i}} \leq k_\alpha \Leftrightarrow \mu - k_\alpha \sigma / \sqrt{n_i} \leq \bar{X} \leq \mu + k_\alpha \sigma / \sqrt{n_i}$$

ya tenemos los límites probabilísticos al nivel de α para cada $i=1, \dots, k$ de la forma siguiente:

$$\text{LSCP} = \mu + k_\alpha \sigma / \sqrt{n_i}$$

$$\text{Línea Central} = \mu$$

$$\text{LICP} = \mu - k_\alpha \sigma / \sqrt{n_i}$$

Tal y como se expuso en el capítulo anterior, se acostumbra a reemplazar k_α por 3, que aproximadamente equivale a $\alpha=0,002$, de manera que se usan límites de tres sigmas y se obtienen los diagramas de Shewhart. Con lo que los límites de control quedan de la siguiente forma:

$$\text{LSC} = \mu + 3\sigma / \sqrt{n_i}$$

$$\text{Línea Central} = \mu$$

$$\text{LIC} = \mu - 3\sigma / \sqrt{n_i}$$

Una vez que tenemos límites de control para cada muestra, podemos optar por graficarlos tal y como se obtienen, con lo que las líneas de control no serán líneas rectas. Otra opción, útil cuando los tamaños n_i no difieren mucho, es tomar como valor común n del tamaño de todas las muestras la media de los n_i para $i=1, \dots, k$ ($n=\sum n_i/k$). También se puede optar por tomar un n común e igual al mayor valor de los n_i , con lo que obtendríamos unos límites de control bastante sensibles, ya que la amplitud de la franja que indica proceso en estado de control es inversamente proporcional al tamaño de la muestra. Pero en la mayoría de los casos n suele ser igual para todas las muestras, con lo que el problema se reduce. Los límites de control quedarían de la forma siguiente:

$$LSC = \mu + 3\sigma/\sqrt{n} = \mu + A\sigma$$

$$\text{Línea Central} = \mu$$

$$LIC = \mu - 3\sigma/\sqrt{n} = \mu - A\sigma$$

$A = 3/\sqrt{n}$ es un valor conocido

Se ha supuesto aquí que la distribución de la característica de calidad es normal. Sin embargo, los resultados anteriores son aproximadamente correctos a partir de un determinado tamaño n de la muestra, aunque la distribución subyacente no sea normal, ya que el teorema central del límite asegura que para $n > 30$, se cumple que [7]:

$$\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \rightarrow N(0,1)$$

Estimación de la desviación Típica y Media de una muestra de datos

Media Muestral:
$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Donde: n = Número de datos de la muestra

Desviación Estándar:
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

ANEXO D. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA, HISTORIA Y DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO LA CIRA INFANTAS

Los trabajos iniciales, descritos en el Acta de San Vicente de Chucurí que se suscribió el 14 de junio de 1916, fueron realizados por la Troco (Tropical Oil Co.) por delegación que les hiciera el concesionario don Roberto De Mares. En 1917 la Tropical introdujo un equipo de taladro con el cual comenzó a perforar los primeros dos pozos, pero por dificultades mecánicas éstos tuvieron que ser abandonados.

Terminando el montaje de nuevas calderas se reiniciaron labores de perforación en lugares contiguos a la zona trabajada inicialmente. El 29 de abril de 1918 se completó el pozo Infantas N° 2, que se constituyó en el pozo descubridor del campo, con una producción inicial de 42 barriles. En el mismo año, meses más tarde, se completaron los pozos N° 1 y N° 3. El pozo Infantas N° 1 fue terminado el 11 de noviembre de 1918 a 2285 pies de profundidad y su producción inicial fue de 2000 barriles/día fluyendo. Se dice que aquel día hubo alarma entre los vecinos al ver que el chorro de aceite, negro y pegajoso, se derramaba abundantemente en todas las direcciones y resultaban insuficientes los tanques que se habían preparado para contenerlo.

A medida que pasaba el tiempo y proseguían los trabajos de perforación fueron surgiendo nuevos campos. Así se levantaron los Campos 21 y 23 alrededor de las perforaciones, 13 y 18 en la región de La Cira, el Campo 2 para trabajos del ferrocarril, el 12 para empleados taladreros y luego los Campos 13 y 14 con iguales propósitos.

En el transcurso de las faenas del ferrocarril los geólogos de la compañía notaron varios buzamientos discordantes y después de un minucioso estudio de la zona se descubrió la estructura de La Cira. El 9 de julio de 1926 se completó el primer pozo en este importante campo.

El campo Cira-Infantas alcanzó su máxima producción en los años 40 cuando se producían 60 mil barriles de crudo por día. En 1951 pasó a manos del Estado colombiano por cuenta de la Reversión De Mares, que también le dio

vida a la entonces Empresa Colombiana de Petróleos, hoy Ecopetrol S.A. El campo, que hacia los años 90 inició su época de mayor declinación, comenzó el proceso de reactivación hace dos años por cuenta de un contrato de colaboración empresarial firmado entre Ecopetrol y Occidental Andina.

Gracias a la implementación de tecnologías de punta, que han incluido estrategias focalizadas de recobro mejorado, perforación de pozos productores e inyectores, fracturamiento hidráulico, optimización de infraestructura y estrategias activas de socialización del proyecto con las comunidades de influencia, la producción se ha incrementado de forma considerable [17].

De los 5 mil barriles que se producían al inicio del proyecto en el año 2005, hoy se logran extraer 15 mil barriles diarios, cifra que se espera incrementar a 20 mil barriles para el 2011.

- Ubicación: Corregimiento El Centro, a 20 km aprox. de la cabecera municipal de Barrancabermeja.
- Área aproximada: 160 km²
- Abarca 30 veredas, entre ellas están: Tierradentro, Planta Nueva, La Ceiba, Oponcito, La Lejía, Campo 23, Pueblo Regao, Tenerife, Las Mercedes, Cretáceo, La Forest, Alfonso López, La María, Diamante, El Progreso, El Palmar, Campo 16, Campo 25, Campo 5, Campo 14 y Quemadero.
- Cobija aproximadamente a 2796 familias para una población de 13980 habitantes.

Instalaciones de producción:

Estaciones de recolección	7
Plantas deshidratadoras	1
Plantas compresoras	1
Plantas de gasolina	1
Plantas de inyección de agua	2
Plantas de tratamiento de aguas	1
Vías (km)	578
Tuberías (km)	1856

Tabal 1D. Plantas de tratamiento e instalaciones en La Cira Infantas

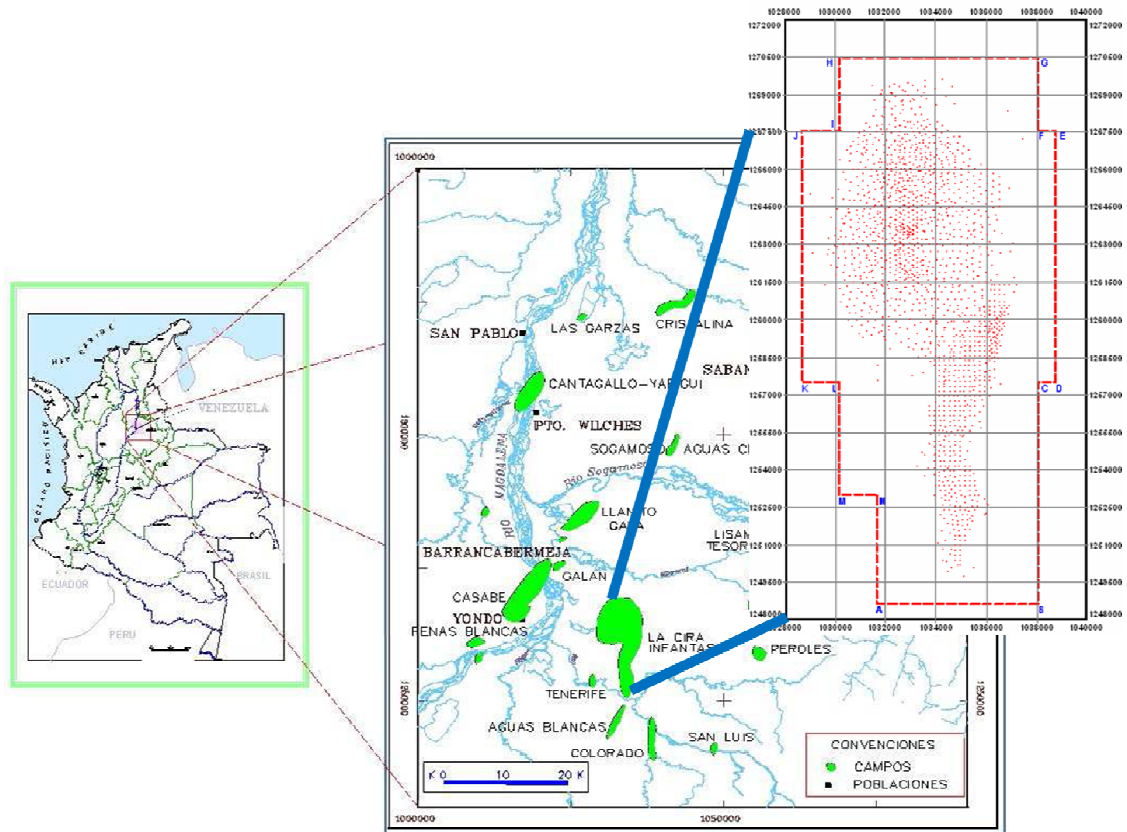
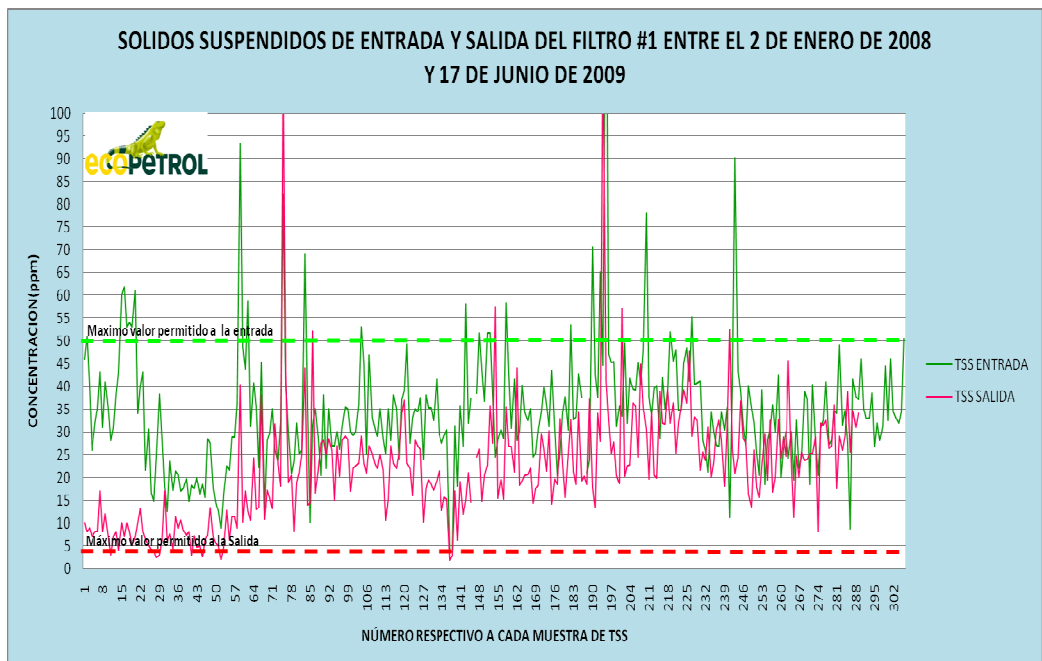
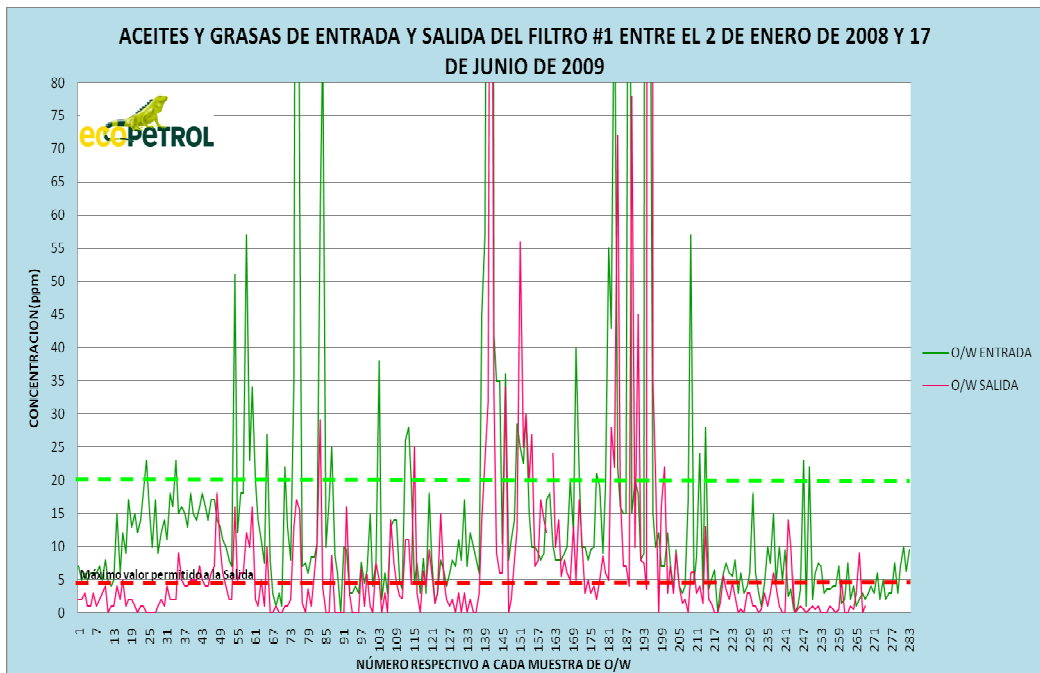
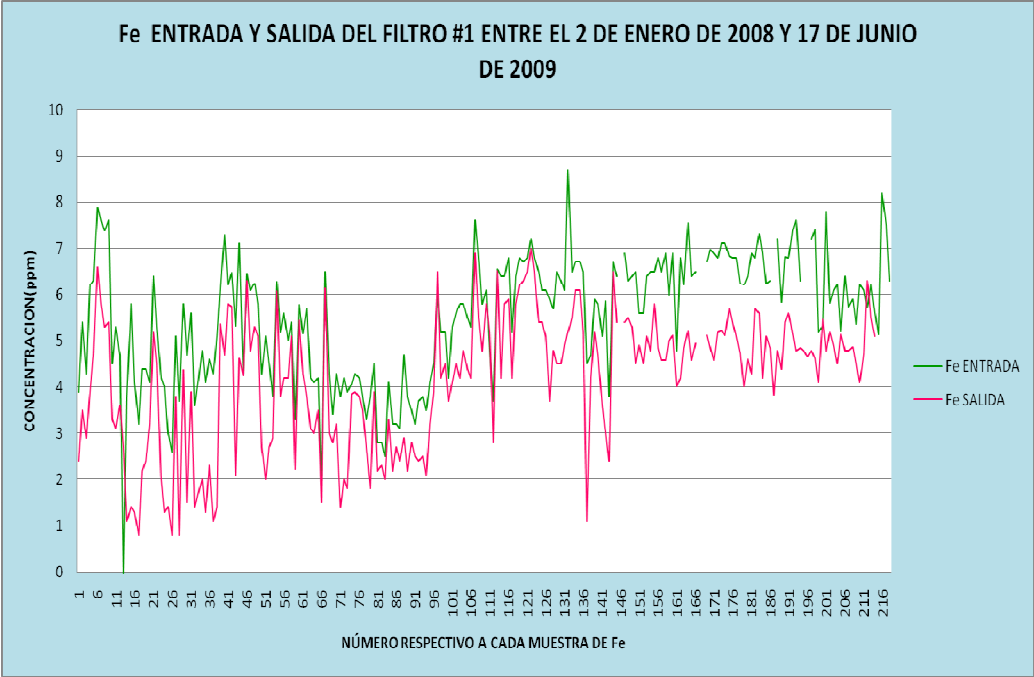
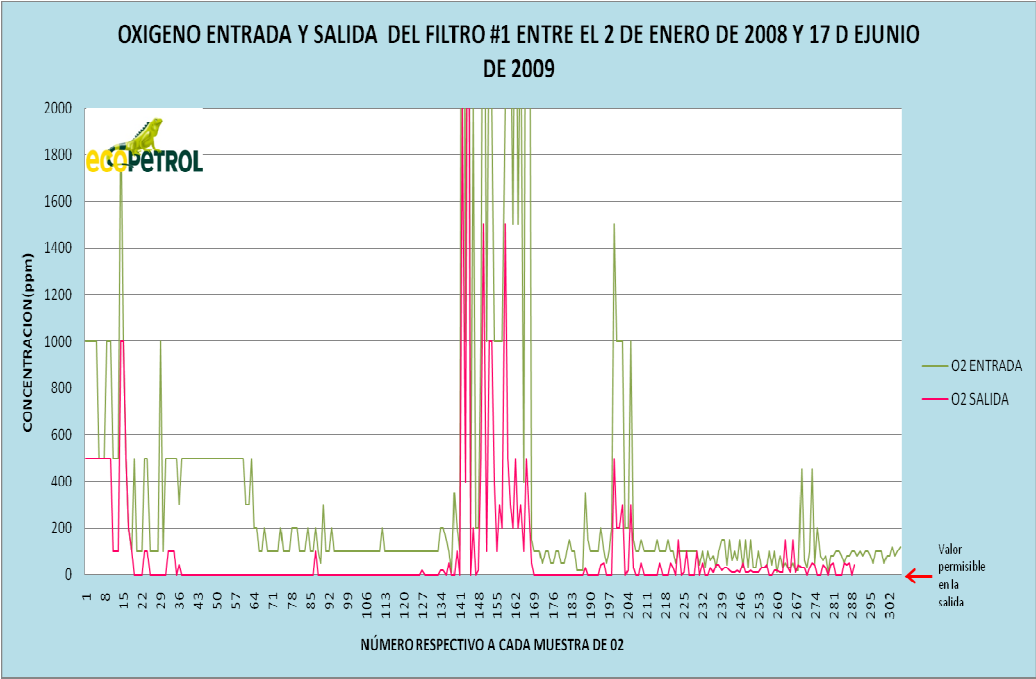


Figura 1D. Localización geográfica del campo La Cira Infantas

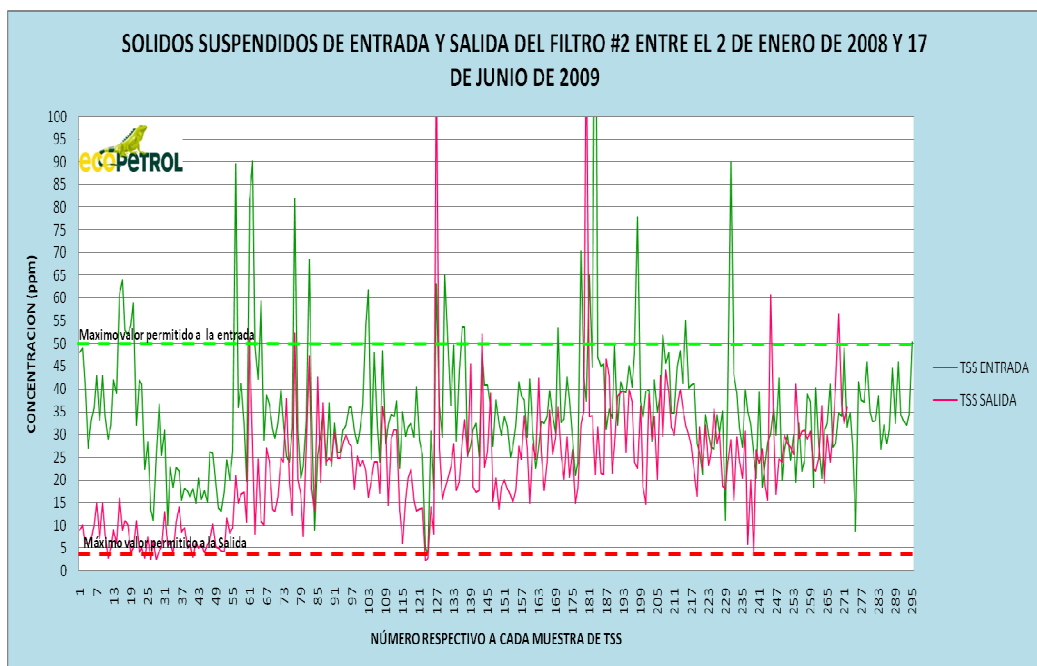
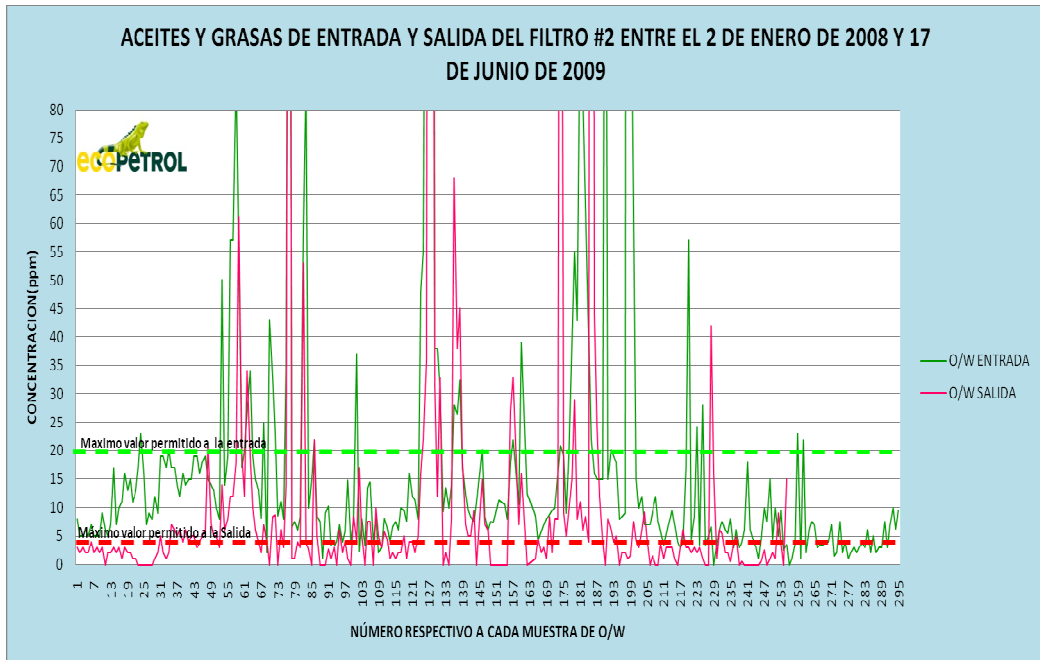
ANEXO E. GRAFICAS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS INDICADORES DE CALIDAD A LA ENTRADA Y SALIDA EN LOS FILTROS DE LA CIRA INFANTAS

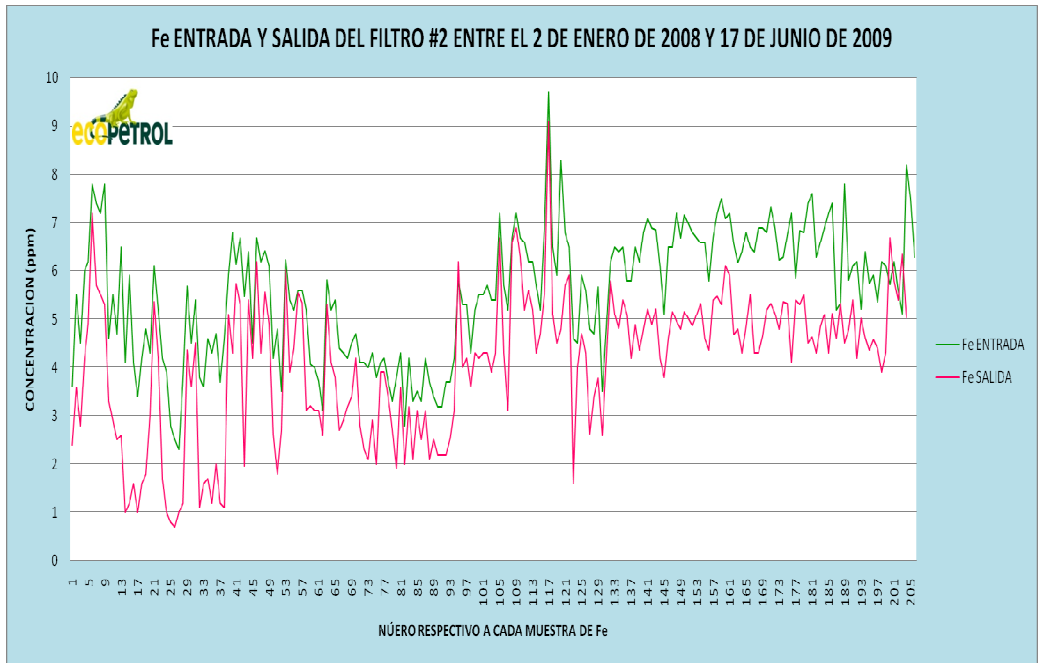
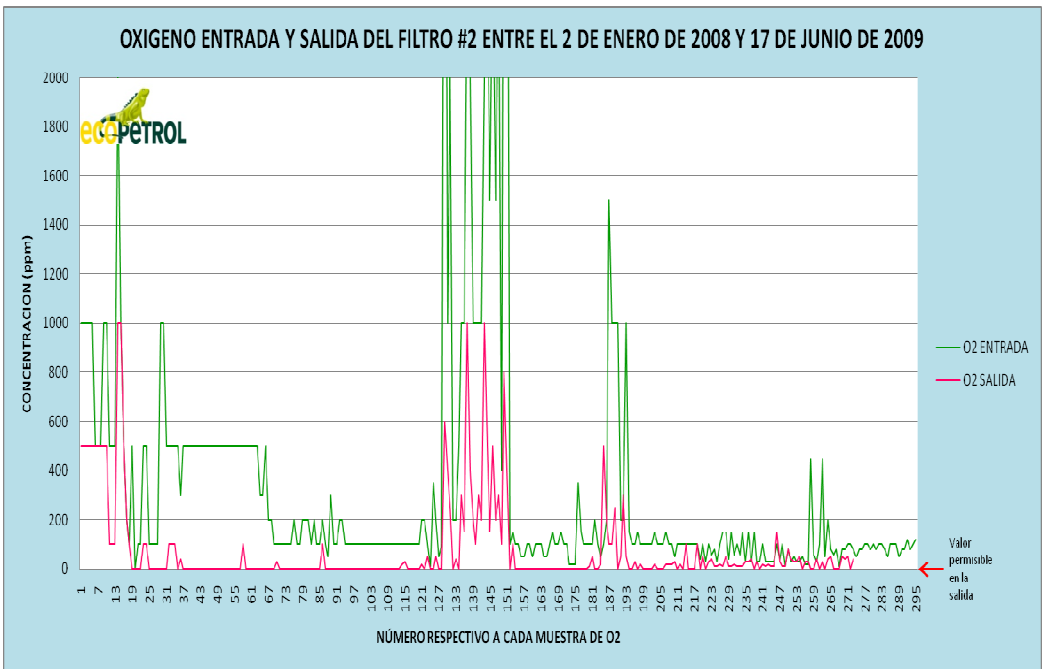
GRÁFICAS FILTRO # 1



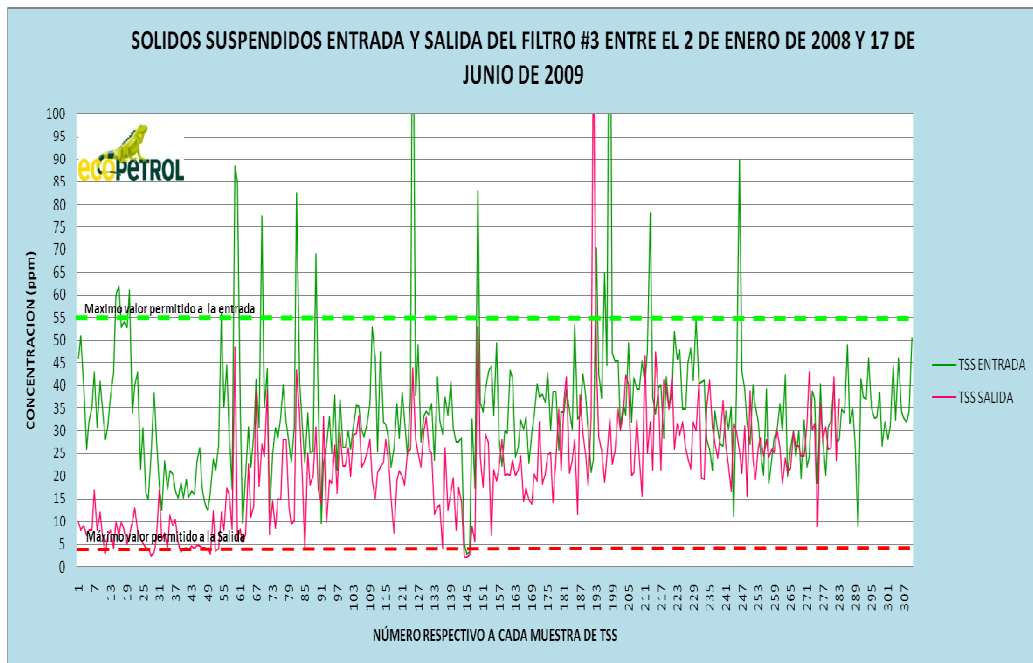
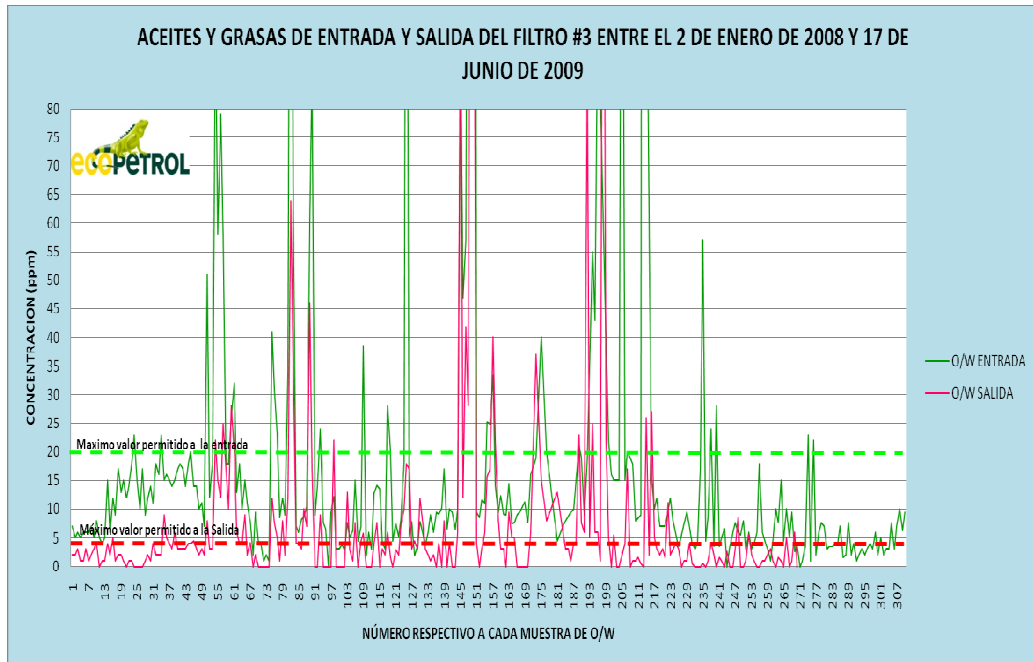


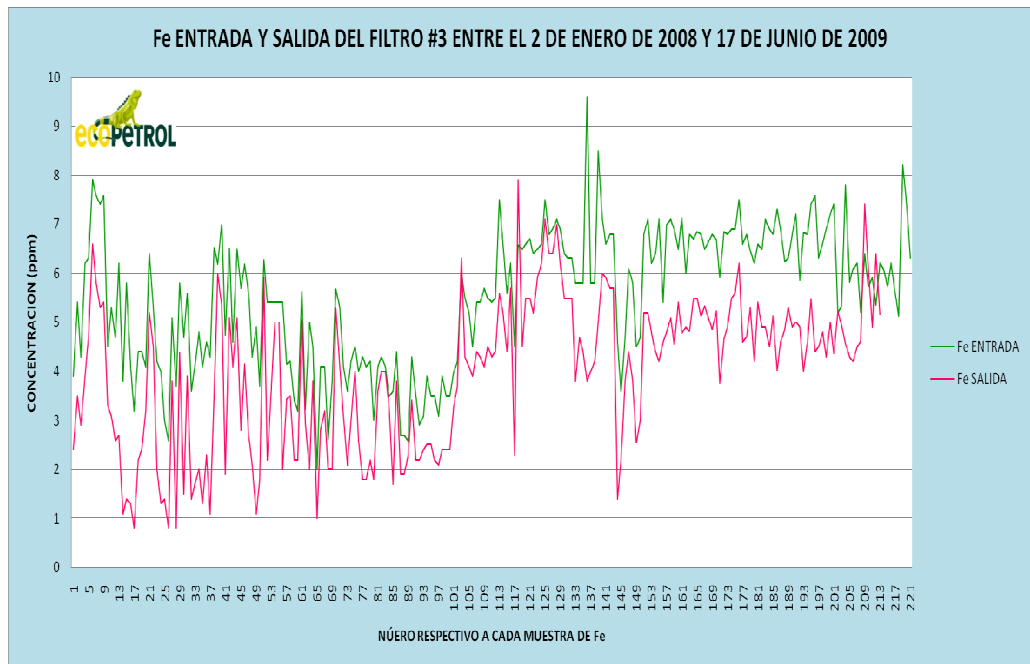
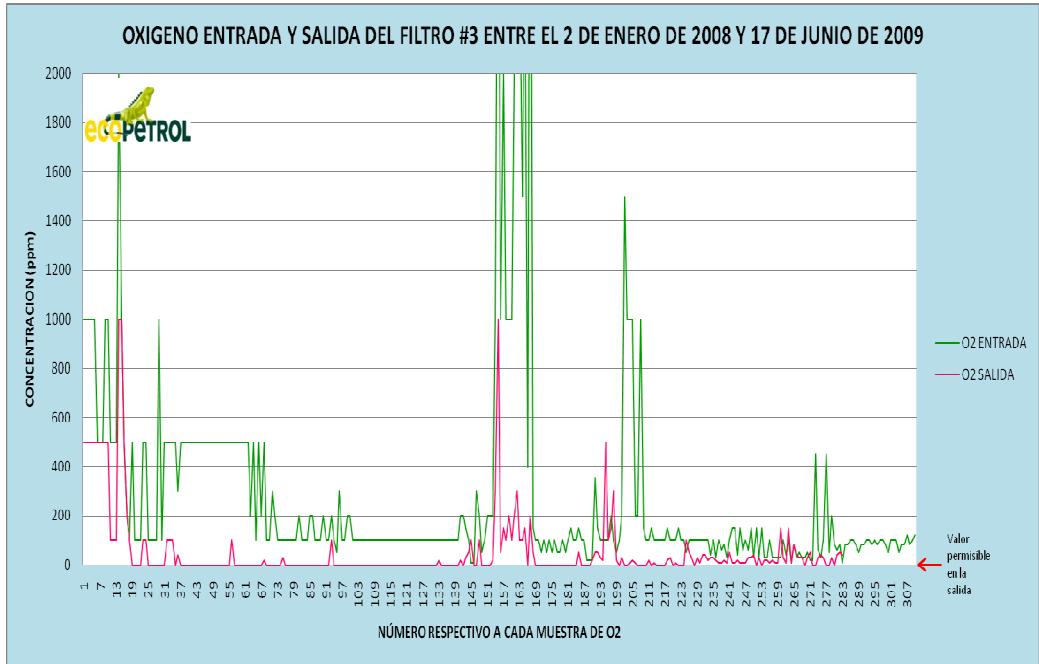
GRAFICAS FILTRO # 2



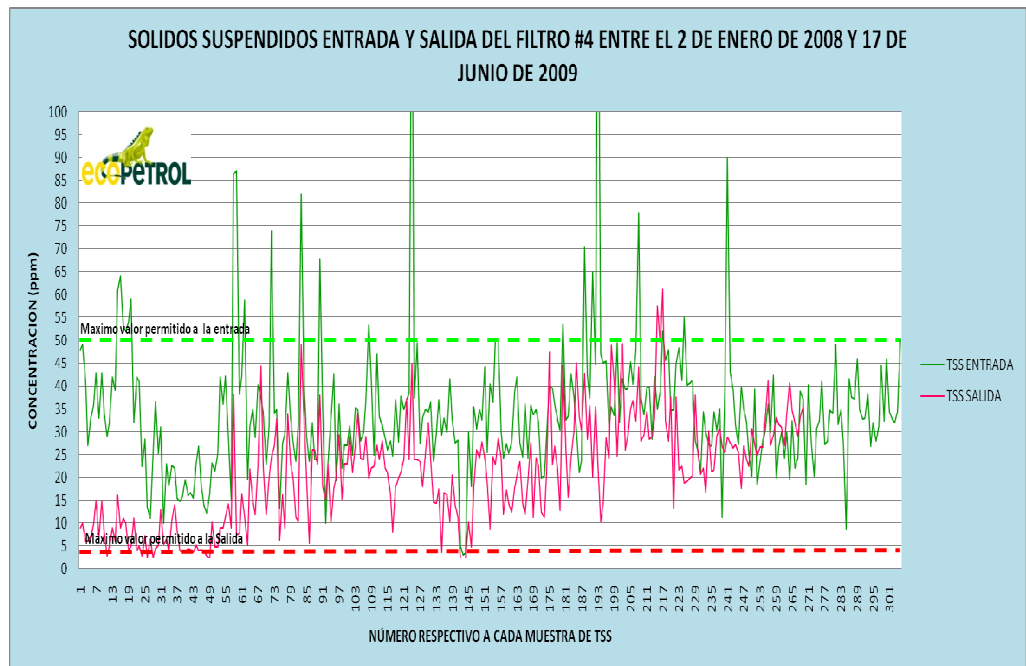
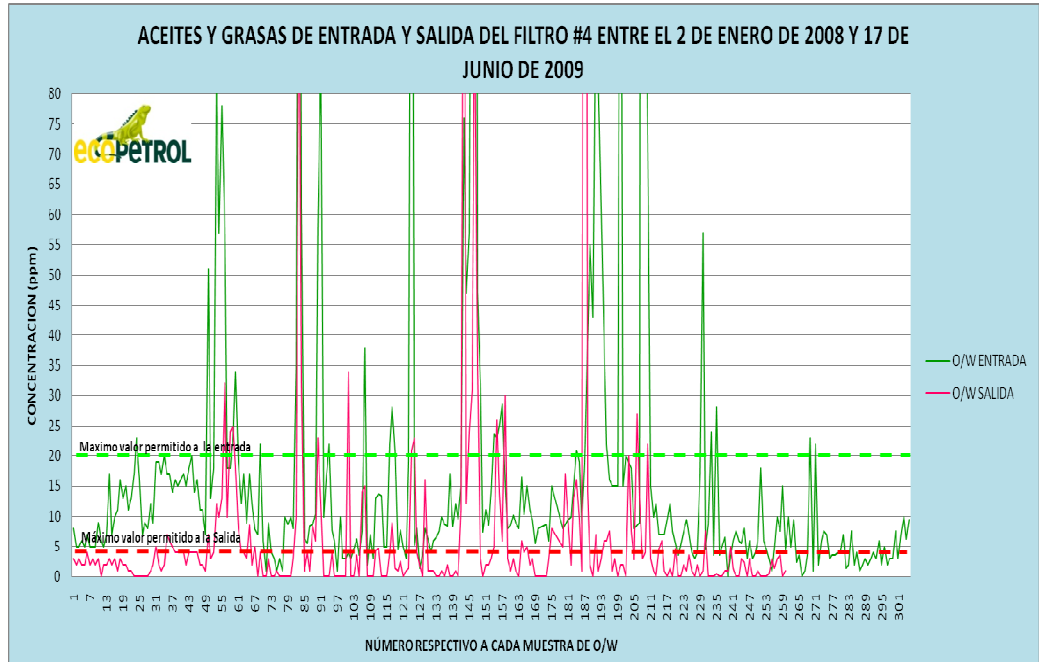


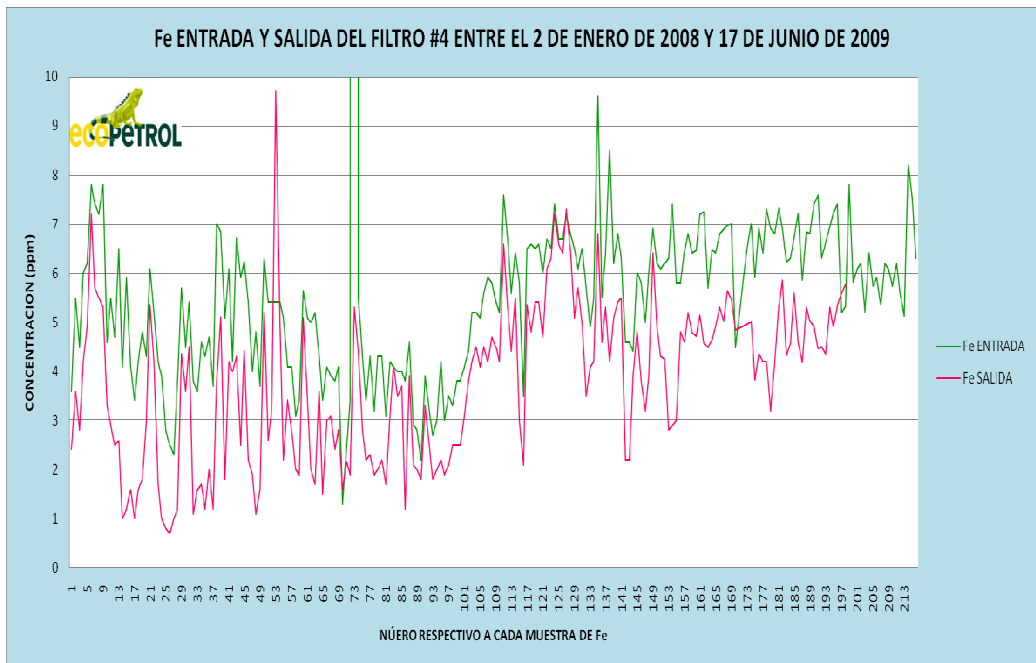
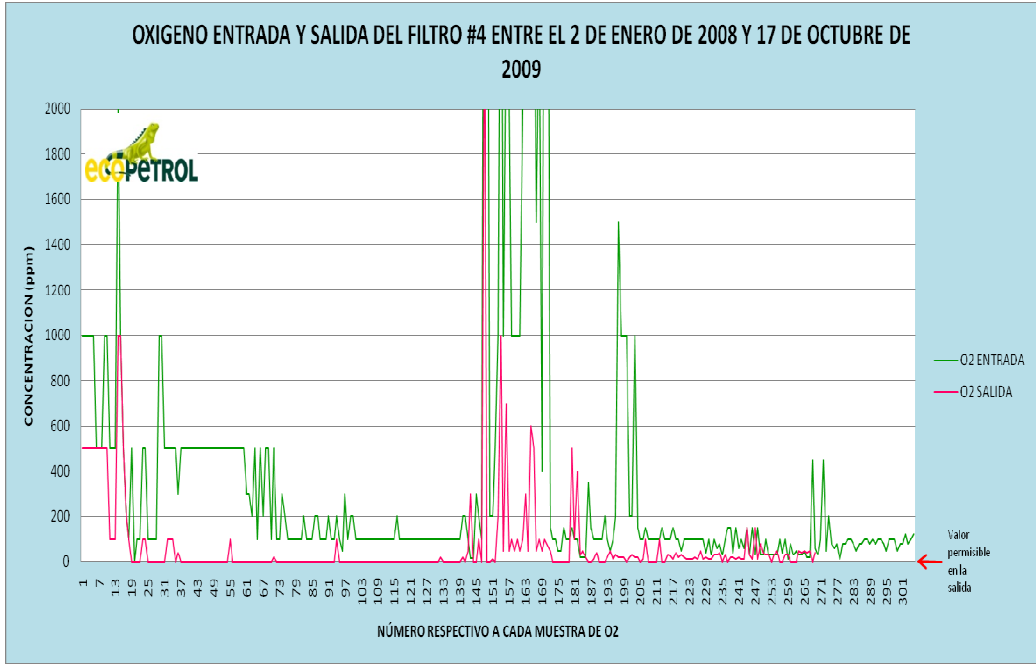
GRAFICAS FILTRO # 3



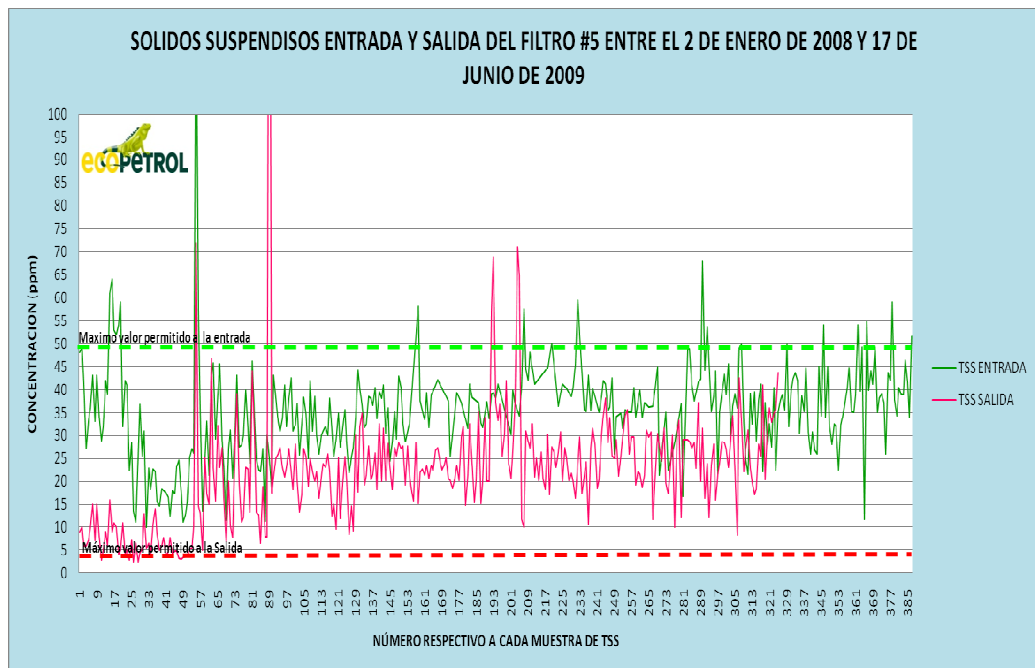
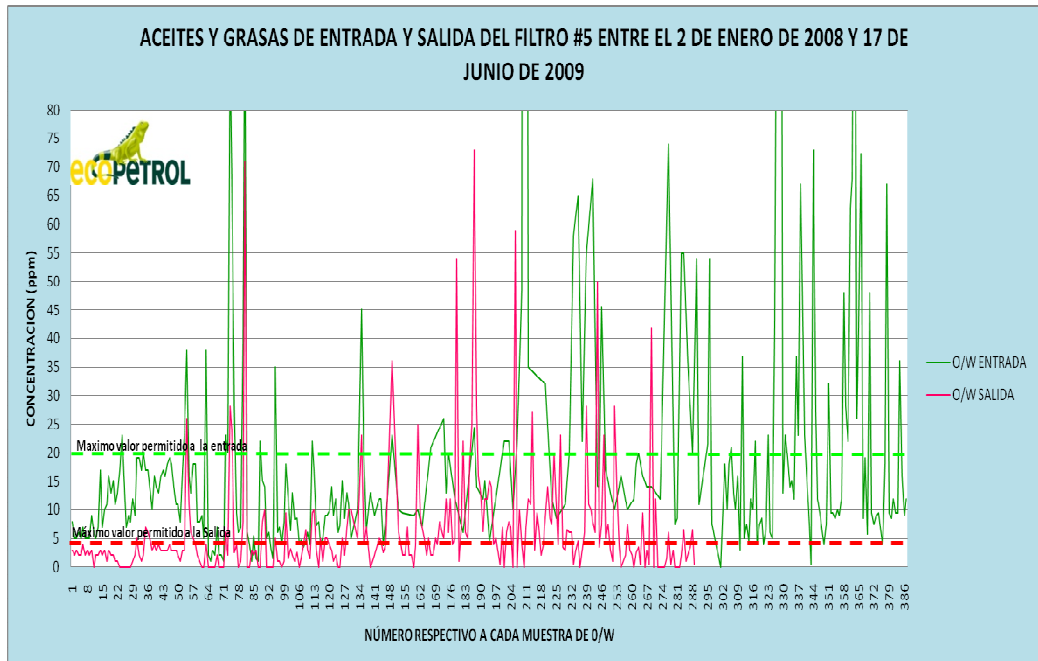


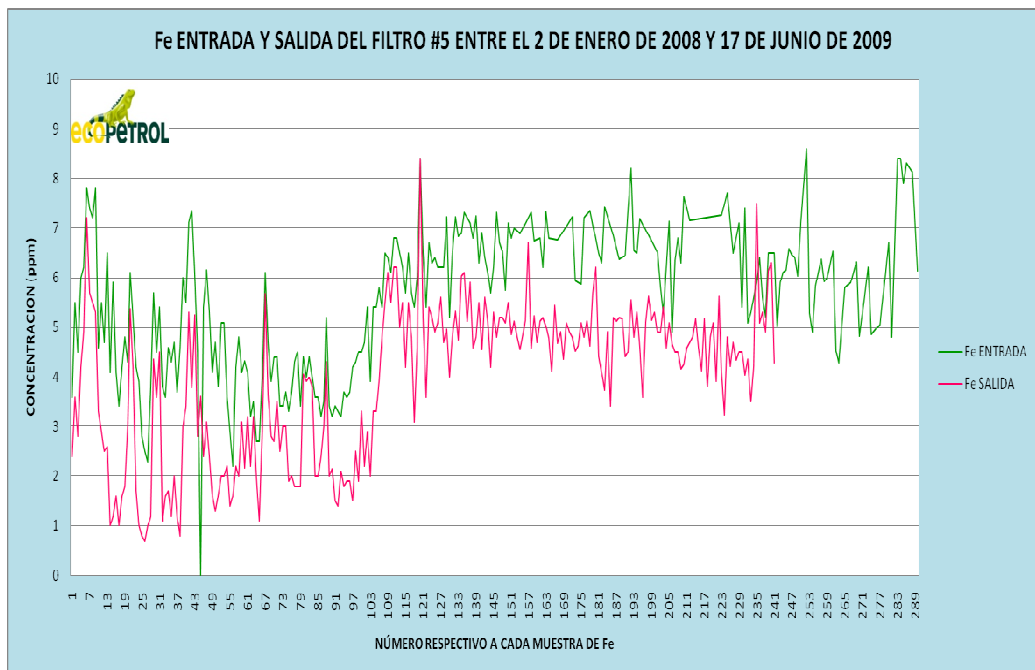
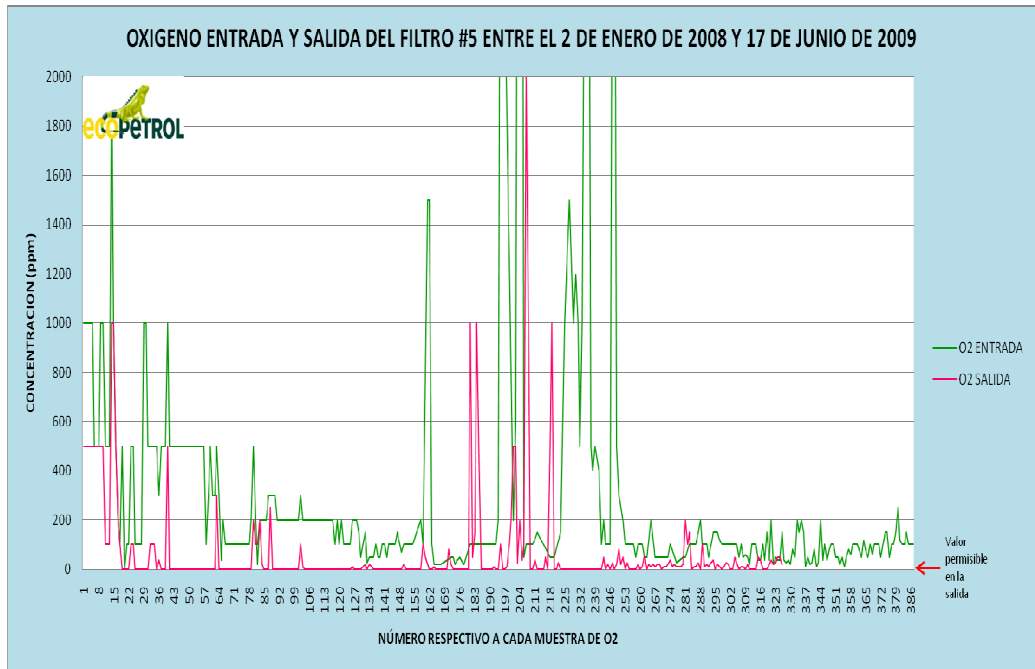
GRÁFICAS FILTRO # 4



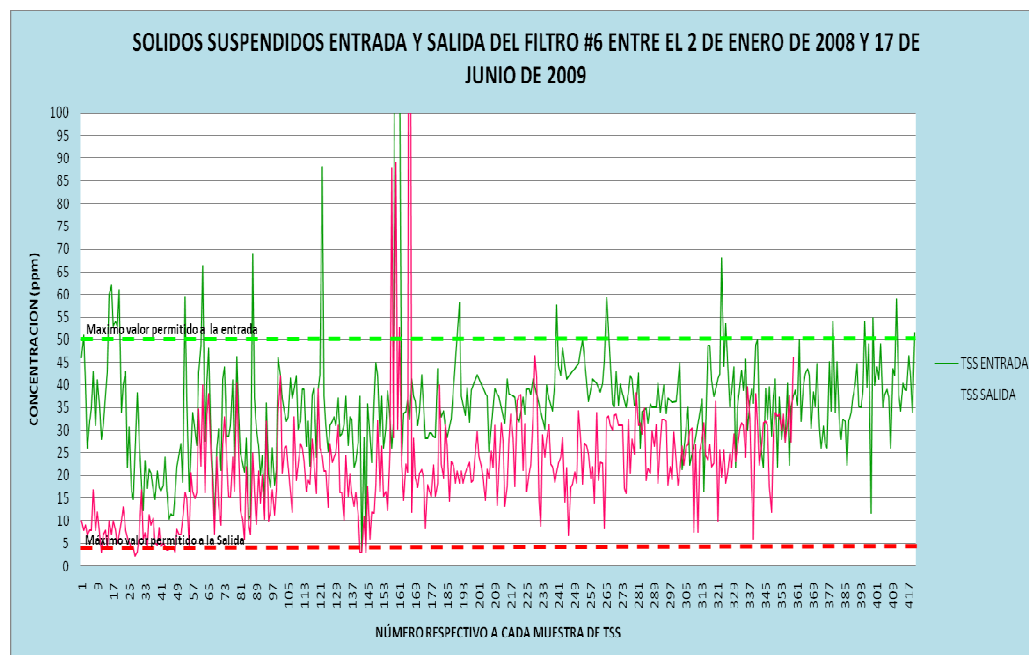
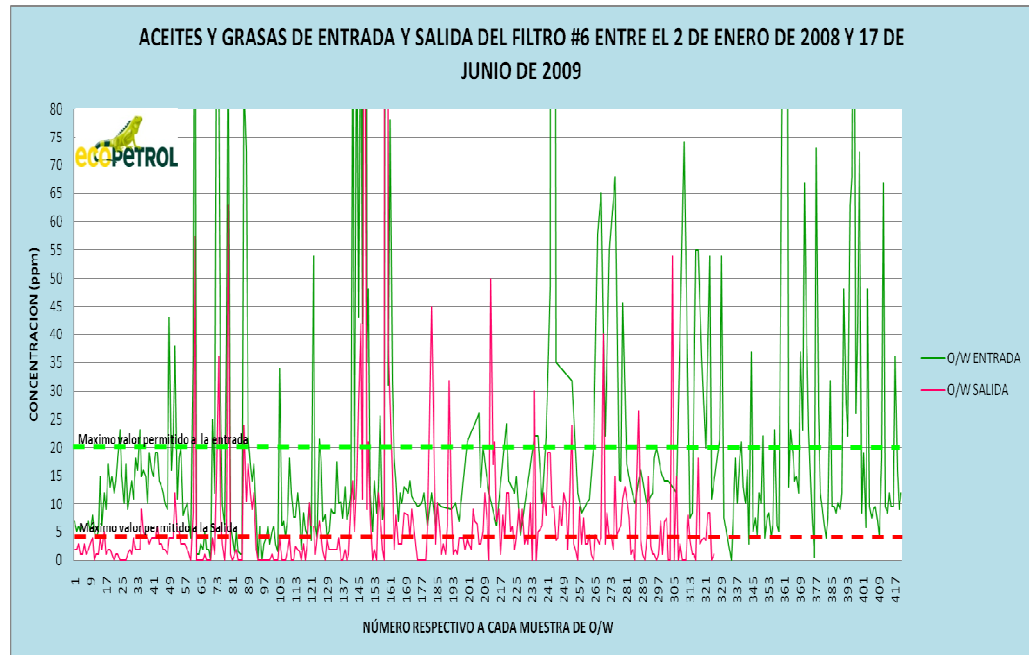


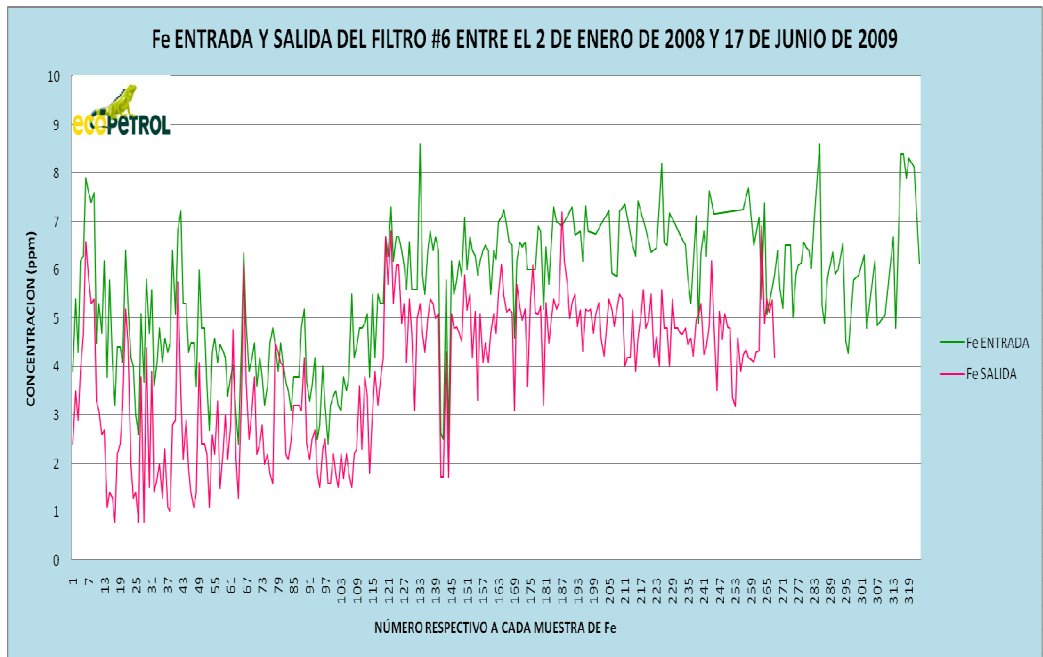
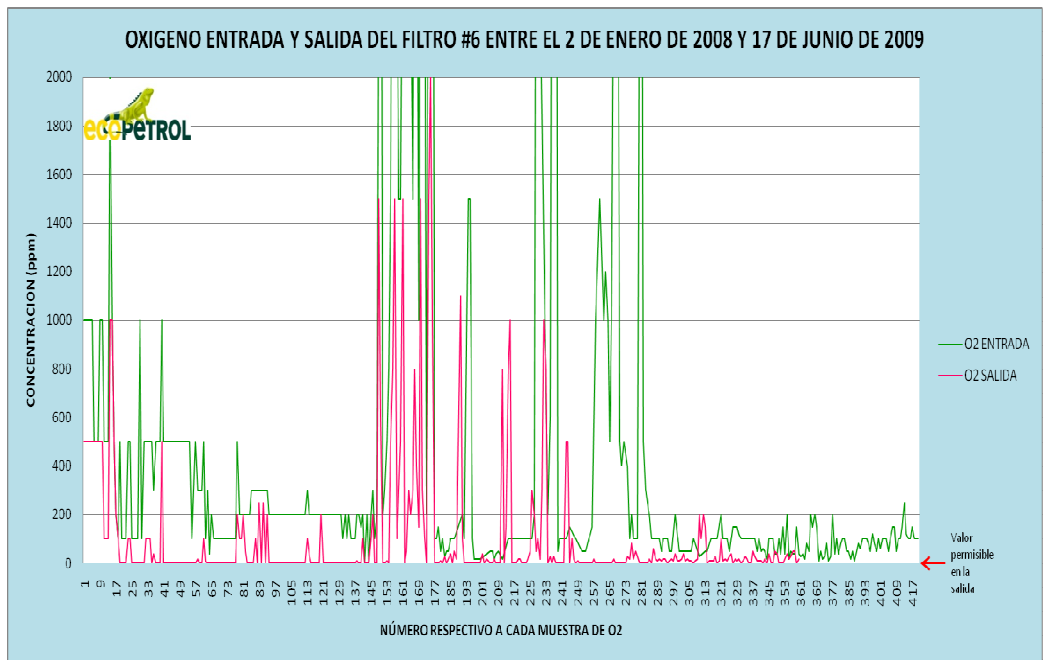
GRÁFICAS FILTRO # 5





GRÁFICAS FILTRO # 6





GRÁFICAS FILTRO # 7

