



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de la eliminación de partículas en suspensión en agua*

### Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** José Daniel González-Aller Joly

**DIRECTORES:** Rosa Devesa Rey  
Santiago Urréjola Madriñán

**CURSO ACADÉMICO:** 2014-2015

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Título del trabajo*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida<sub>de</sub>Vigo



# RESUMEN

Con el objetivo de utilizar compuestos de baja toxicidad en el proceso de eliminación de partículas en suspensión durante el tratamiento de aguas, se optimizó la dosis de un coagulante-floculante como alternativa a los usados comúnmente.

Para ello, se analizaron tres compuestos diferentes mediante una serie de procesos experimentales; diatomea, lactato cálcico y ácido láctico. Se utilizó un agua contaminada artificialmente con sedimentos para hallar cuál de los tres compuestos realiza mejores funciones como coagulante-floculante al reducir la turbidez de agua con mayor efectividad.

Una vez obtenido el mejor coagulante-floculante se procedió a su optimización. Se utilizó el método Box-Behnken donde se realizaron quince experimentos que permitieron estandarizar las variables utilizadas para conseguir la optimización de la salinidad, cantidad de sedimentos y cantidad del coagulante-floculante para la obtención de la menor turbidez.

## **PALABRAS CLAVE**

Partículas en suspensión, coagulación-floculación, ácido láctico, turbidez, optimización

# **AGRADECIMIENTOS**

Al personal de la Escuela Naval Militar que me ayudó a entender el funcionamiento de las depuradoras de la piscina de la Escuela Naval y el correcto empleo de la diatomea como floculante, el capitán de corbeta Carrascosa, el sargentos don David y la cabo Ana.

A los tutores Rosa Devesa Rey y Santiago Urréjola Madriñán, quienes me introdujeron un poco más al mundo de la descontaminación del agua de una forma didáctica y práctica que no me esperaba y me permitió disfrutar de las horas de laboratorio.

A mi familia, que desde el principio me apoyaron a realizar un trabajo por el que me sintiera satisfecho y motivado para acabar de la mejor forma mis estudios en la Escuela Naval.









## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos .....	6
1.1 Justificación .....	6
1.2 Objetivos .....	7
1.3 Antecedentes .....	7
1.3.1 La contaminación del agua .....	7
1.3.2 Procesos de descontaminación .....	8
1.3.3 Teoría de separación de partículas en suspensión .....	9
1.3.4 Coagulación y floculación .....	10
1.3.5 Clasificación .....	12
1.3.6 Optimización.....	13
1.3.7 Test de jarras.....	13
2 Estado del arte .....	15
2.1 Estudios de optimización de coagulantes y floculantes .....	15
2.1.1 Uso del lactato cálcico en la clarificación de aguas .....	15
2.1.2 Evaluación de coagulantes-floculantes no convencionales para la reducción de la turbidez del agua .....	15
2.1.3 Proceso de coagulación-floculación para el tratamiento de aguas residuales .....	16
2.1.4 Optimización de los mecanismos de coagulación-floculación mediante un sensor “FBRM” en una Central Térmica de Ciclo Combinado.....	16
2.1.5 Optimización del proceso de sedimentación de precipitados procedentes del tratamiento de efluentes.....	16
3 Desarrollo del TFG.....	18
3.1 Materiales y métodos .....	18
3.2 Procesos .....	20
3.2.1 Elección del coagulante-floculante.....	20
3.2.1 Proceso de optimización para reducción de turbidez .....	21
3.2.2 Método de optimización Box-Behnken .....	22
4 Resultados y discusión .....	25
4.1 Resultados elección coagulante-floculante .....	25
4.2 Resultados método Box-Behnken.....	26
4.2.1 Ajuste del modelo .....	28

4.2.2 Gráficos de Pareto.....	29
4.2.3 Gáficos de efectos principales para la turbidez .....	31
4.2.4 Gráficas de interacción de factores para turbidez.....	33
4.2.5 Gráficas de superficie de respuesta.....	35
5 Conclusiones y líneas futuras .....	41
5.1 Conclusiones .....	41
5.2 Líneas futuras .....	42
6 Bibliografía.....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Planta de tratamiento ( <a href="http://commons.ns.wikimedia.org/wiki/File;2015">http://commons.ns.wikimedia.org/wiki/File;2015</a> ) .....	8
Figura 1-2 Decantador primario (centros5.pntic.mec.es Insitituto de Enseñanza Secundaria Recesvinto, Palencia, 2015) .....	9
Figura 1-3 Esquema de distribución de iones alrededor del coloide. Disponible en < <a href="http://www.malvern.com/labeng/technology/images/zeta_potential_schematic.png">http://www.malvern.com/labeng/technology/images/zeta_potential_schematic.png</a> > .....	10
Figura 1-4 Representación efecto de coagulación en sistema coloidal disperso (Servyeco, 2015) .	11
Figura 1-5 Representación efecto de aglomeración de flóculos (Servyeco, 2015) .....	11
Figura 1-6 Floculador utilizado en el test de jarras .....	13
Figura 3-1 Suelo usada para las mezclas .....	18
Figura 3-2 Mezclador (Cienytech) .....	19
Figura 3-3 Turbidímetro (Eutech Instrument) .....	19
Figura 3-4 Muestras antes de comenzar el proceso de agitación controlado por rev/min y tiempo.	20
Figura 3-5 Muestras al finalizar el proceso de test de jarras controlado por rev/min y tiempo. ....	21
Figura 4-1 Valores predichos vs. Observados para turbidez a los 5 minutos (gráfica superior), 15 minutos (gráfica intermedia) y 30 minutos (gráfica inferior). ....	29
Figura 4-2 Gráfico de Pareto estandarizado para turbidez a 5 minutos .....	29
Figura 4-3 Gráfico de Pareto estandarizado para turbidez a 15 minutos .....	30
Figura 4-4 Gráfico de Pareto estandarizado para turbidez a 30 minutos .....	30
Figura 4-5 Gráfico efectos principales de las variables para la turbidez a 5 min.....	32
Figura 4-6 Gráfico efectos principales de las variables para la turbidez a 15 min.....	32
Figura 4-7 Gráfico efectos principales de las variables para la turbidez a 30 min.....	33
Figura 4-8 Interacción entre variables después de 5 min. ....	33
Figura 4-9 Interacción entre variables después de 15 min. ....	34
Figura 4-10 Interacción entre variables después de 30 min. ....	35
Figura 4-11 Gráfica de la salinidad Vs cantidad de sedimento para valor inferior (-1) del ácido láctico a 5 min. ....	35
Figura 4-12 Gráfica de la salinidad Vs cantidad de sedimento para valor central (0) del ácido láctico a 5 min. ....	36
Figura 4-13 Gráfica de la salinidad Vs cantidad de sedimento para valor superior (1) del ácido láctico a 5 min. ....	37
Figura 4-14 Gráfica de cantidad de ácido láctico Vs cantidad de sedimento para valor inferior (-1) de la salinidad a 5 min.....	37
Figura 4-15 Gráfica de cantidad de ácido láctico Vs cantidad de sedimento para valor central (0) de la salinidad a 5 min.....	38
Figura 4-16 Gráfica de cantidad de ácido láctico Vs cantidad de sedimento para valor superior (1) de la salinidad a 5 min.....	38

Figura 4-17 Gráfica de cantidad de ácido láctico Vs cantidad de salinidad para valor inferior (-1) de la cantidad de sedimento a 5 min. ....39

Figura 4-18 Gráfica de cantidad de ácido láctico Vs cantidad de salinidad para valor central (0) de la cantidad de sedimento a 5 min. ....39

Figura 4-19 Gráfica de cantidad de ácido lácteo Vs cantidad de salinidad para valor superior (1) de la cantidad de sedimento a 5 min. ....40

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cantidades usadas en el segundo proceso .....	22
Tabla 2 Variables independientes usadas en el experimento .....	23
Tabla 3 Variables dependientes usadas en el experimento .....	24
Tabla 4 Resultados turbidez de las muestras del proceso de elección del coagulante-floculante ....	26
Tabla 5 Resultado turbidez frente a las variables dependientes e independientes. ....	27
Tabla 6 Niveles de significación para las variables estudiadas .....	31

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Justificación

La potabilización del agua procedente de efluentes industriales, escorrentías, lluvia, etc. requiere una serie de tratamientos para la eliminación de los componentes no deseados, potencialmente tóxicos y/o patogénicos. Una de las etapas iniciales en el tratamiento de aguas, y clave para que el proceso de potabilización sea eficaz, es la eliminación de partículas en suspensión. Las partículas suspendidas en el agua son una mezcla de diferentes materiales sólidos y líquidos que pueden variar significativamente de tamaño, forma y composición.

De entre los efectos negativos que suceden a la existencia de partículas en suspensión se encuentran: el elevado grado de fotoestabilidad de estas partículas, lo que da una idea de su persistencia; que pueden servir de nutriente para el crecimiento de microorganismos y, por lo tanto, afectar a los procesos de desinfección, y que pueden actuar como portadores de contaminación, que puede estar adsorbida en su superficie (De Lima et al., 2009). Estas partículas serán las causantes de la falta de transparencia del agua (turbidez). A mayor concentración de partículas, mayor será la apariencia de suciedad en el agua y mayor será la turbidez. La turbidez por tanto es una forma de analizar la calidad del agua y, como se ha mencionado anteriormente, la finalidad del trabajo será estudiar su reducción mediante diferentes métodos.

El estudio de los coagulantes y floculantes es de suma importancia para garantizar la calidad, potabilidad y funciones que requiere el agua. Para no perjudicar la salud de los usuarios ni intervenir de forma contaminante en el medio ambiente, es necesario realizar un estudio detallado de los métodos y sustancias empleados en el proceso de tratamiento del agua.

La eliminación de las partículas en suspensión se realiza típicamente con floculantes sintéticos, que reducen o neutralizan las cargas electrostáticas de estas partículas en agua, favoreciendo su agregación y sedimentación (Reynolds y Richards, 1995). Los compuestos más utilizados son derivados del aluminio y del hierro, aunque son conocidos sus problemas de toxicidad, por lo que se tiende a reducir su uso.

Una de las alternativas para la reducción de los floculantes tradicionales es sustituirlos parcialmente por nuevos floculantes, como por ejemplo, polímeros o minerales (Nacheva et al., 1996; Rytwo et al., 2011). Estos materiales presentan la ventaja de ser más ecológicos, biodegradables y no tóxicos. Así, el desarrollo de nuevos materiales que puedan emplearse como floculantes en un área de gran interés.

En este trabajo, se estudia el procedimiento de eliminación de partículas en suspensión en el agua para un uso adecuado de ésta. Para obtener agua potable, doméstica e industrial, aguas adecuadas para



practicar deporte en piscinas y en instalaciones, es necesario que pasen una serie de procedimientos de descontaminación. Para ello, el uso de coagulantes y floculantes son unos de los pasos más importantes durante el tratamiento de las aguas, pues se encargan de la eliminación de las partículas en suspensión y son el objeto de estudio de este trabajo.

## 1.2 Objetivos

El objetivo global del trabajo es realizar un análisis de las diferentes formas de reducir o eliminar las partículas en suspensión en el agua. La reducción del nivel de turbidez y la optimización del proceso serán las líneas generales en las que se basará el estudio.

Dentro de esta área, en este proyecto se propone el uso de tres nuevos compuestos para la etapa del proceso de coagulación-floculación. Por un lado, se propone el uso de tierra de diatomeas, compuesto ampliamente utilizado en la industria alimentaria para clarificar los tanques de reacción y también utilizado en el tratamiento de aguas; por otro lado, se propone el uso de lactato cálcico, que ya había sido probado con anterioridad para tratamiento de aguas residuales con variación de pH; y por último, se propone el uso del ácido láctico, un compuesto utilizado también en la industria alimentaria por su carácter biocida y que podría, por lo tanto, ampliar su espectro de aplicación.

Así, en este estudio se planteó como objetivo global la reducción de la turbidez en aguas a partir de compuestos no tradicionales, de menor toxicidad. Para ello, se plantearon los siguientes objetivos individuales:

- Estudiar la reducción de turbidez en aguas, utilizando partículas que hayan sido particularmente difíciles de eliminar con otros tratamientos.
- Comparar tres compuestos: tierra de diatomeas, lactato cálcico y ácido láctico en la reducción de turbidez.
- Decidir el compuesto que produce la menor turbidez y optimizar sus condiciones de uso.

## 1.3 Antecedentes

### 1.3.1 La contaminación del agua

El tratamiento de aguas consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes en el agua para el uso humano. El objetivo es obtener agua limpia o reutilizable. La contaminación del agua es cualquier cambio físico, químico o biológico en la calidad del agua, que se produce cuando se deposita alguna sustancia, que puede disolverse totalmente o bien permanecer en suspensión, tendiendo a la sedimentación en períodos de tiempo variable.

En la actualidad, la causa fundamental de la contaminación del agua es el ser humano. La segunda causa más importante de mortalidad infantil en el mundo es la combinación de agua no tratada con la falta de servicios de saneamiento. Se estima que alrededor del 70% del agua dulce es usada para la agricultura, el 20% de uso industrial y el 10% de uso doméstico. Por lo que se puede deducir que la contaminación del agua es muy negativa tanto para el desarrollo económico y social de las poblaciones (ecolísima/la contaminación del agua, 2015).

La mayoría de vertidos de aguas residuales que se hacen en el mundo no son tratados, se descargan en ríos, mares o lagos y se deja que la naturaleza y el medio ambiente degraden los desechos de forma natural con mayor o menor eficiencia. En algunos países desarrollados las aguas son tratadas antes de que se pongan en contacto con el medio ambiente a través de estaciones depuradoras de aguas residuales. El tratamiento de aguas residuales es una cuestión prioritaria a nivel mundial, es importante disponer de agua de calidad y en suficiente cantidad, permitiendo una mejora del medio ambiente, la salud y la calidad de vida. En la figura 1-1 se puede observar un ejemplo de planta de tratamiento de aguas residuales.



**Figura 1-1** Planta de tratamiento (<http://commons.ns.wikimedia.org/wiki/File;2015>)

Las aguas residuales son aquellas que resultan del uso doméstico o industrial. Se les llama también aguas negras o aguas cloacales. Son residuos al haber sido agua usada (IBASA, 2015). Las industrias producen todo tipo de residuos, muchas de ellas como la papelera, textil y siderúrgica necesitan agua para desarrollar su actividad, la consecuencia es el vertido de aguas residuales cargadas de materia orgánica, metales, aceites, etc. Por su parte, las labores domésticas contaminan sobre todo con residuos fecales y detergentes.

Los residuos que demandan oxígeno como la materia orgánica son unos de los principales elementos que contribuyen a la contaminación del agua al afectar en su desoxigenación. Agentes infecciosos y productos químicos también repercuten en la calidad del agua, así como el petróleo, sedimentos formados por partículas y minerales de los fondos, sustancias radiactivas procedentes de residuos de la industria minera y todo tipo de objetos o sustancias procedentes de la manipulación humana en el medio marino.

### *1.3.2 Procesos de descontaminación*

Para evitar o reducir las consecuencias de esta contaminación, es necesario realizar una serie de procesos en plantas depuradoras por los cuales el agua mejore considerablemente su calidad. Dichos procesos se pueden dividir en cuatro etapas; preliminar, primaria, secundaria y terciaria. El tratamiento preliminar debe medir y regular el caudal de la planta y extraer los sólidos de gran tamaño, arenas y grasas mediante filtraciones. Se usan rejillas, tamices y trituradores.

Los procesos del tratamiento primario serán la base de estudio de este trabajo, tienen como objetivo eliminar las partículas en suspensión por medio de un proceso de sedimentación simple por gravedad o asistida usando coagulantes y floculantes. Las estructuras encargadas de esta función son los tanques de sedimentación primarios, son diseñados para suprimir aquellas partículas que tienen tasas de sedimentación de 0,3 a 0,7 mm/s, como el que se puede observar en la figura 1-2.



**Figura 1-2 Decantador primario (centros5.pntic.mec.es Insitituto de Enseñanza Secundaria Recesvinto, Palencia, 2015)**

El tratamiento secundario tiene como objetivo eliminar la materia orgánica en disolución mediante un proceso de oxidación seguido de sedimentación. Dicho proceso es controlado y se usan microorganismos presentes en el agua residual, que se desarrollan en un reactor o cuba de alimentación. Estos microorganismos, que suelen ser bacterias, se alimentan de sólidos en suspensión, originándose una biomasa bacteriana que precipita en el decantador secundario. El agua queda limpia a cambio de la producción de fango.

Por último, el tratamiento terciario suprime algunos contaminantes específicos presentes en el agua residual como los fosfatos que provienen de detergentes domésticos. (ELAI-UPM, 2015).

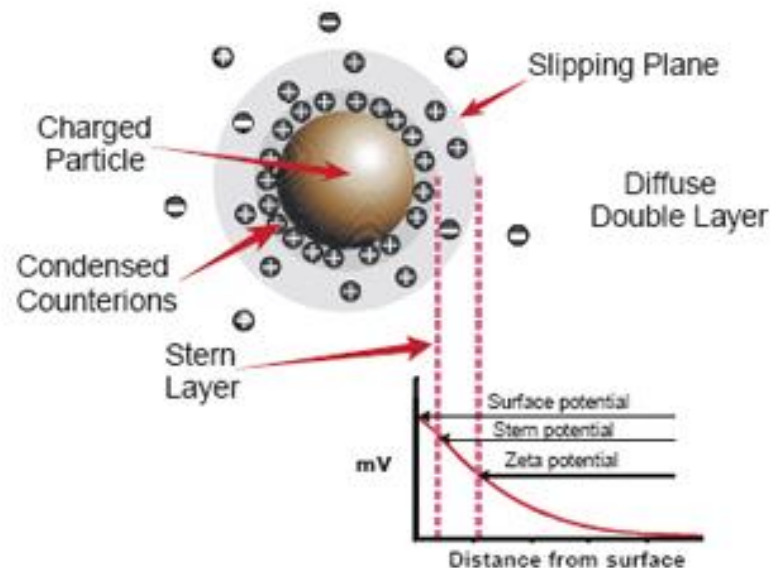
### *1.3.3 Teoría de separación de partículas en suspensión*

Dentro de este apartado se engloban los procesos de coagulación-floculación, objeto de este trabajo. Éstos junto a la separación de partículas (sedimentación y filtración) se pueden englobar en los procesos de clarificación, que tienen como objetivo la eliminación de sustancias en suspensión, separación de partículas y la supresión de la flora microbiana.

Los coloides son partículas de muy bajo diámetro que son responsables de la turbidez o del color del agua superficial. Debido a su muy baja sedimentación, la mejor manera de eliminarlos es por los procesos de coagulación-floculación. Son sistemas físico-químicos estables formados por dos fases; una continua (fluidos) y otra dispersa (partículas).

La teoría de la doble capa eléctrica, es la teoría de la estabilidad de los coloides y estudia cómo se modela la superficie intermedia entre la partícula coloidal y el seno del líquido. La primera teoría (Hemholtz, 1879) parte de la base de que las partículas superficiales de la partícula coloidal atraen iones de carga opuesta, estableciéndose un estado de carga neutra entre la partícula y su alrededor más cercano. El continuo movimiento de las partículas de agua en esta zona de carga neutra crea una capa

difusa de cargas eléctricas que se extienden en el agua. Aparecen así diferentes zonas; la capa superficial del coloide con carga negativa, la capa de Stern de cargas positivas y fuertemente atraídas por la superficie coloidal y la capa difusa de Gouy-Chapman, constituida por el resto de iones móviles hasta la superficie neutra del líquido. En la figura 1-3 se muestra un esquema de la distribución de las cargas alrededor del coloide.



**Figura 1-3** Esquema de distribución de iones alrededor del coloide. Disponible en [http://www.malvern.com/labeng/technology/images/zeta\\_potential\\_schematic.png](http://www.malvern.com/labeng/technology/images/zeta_potential_schematic.png)

Por consiguiente, la partícula coloidal tiene un cierto potencial eléctrico respecto a la solución en la que se halla que impide la aproximación de las partículas a una distancia suficiente como para que las fuerzas atractivas de Van der Waals puedan agrupar los coloides (Pérez de la Cruz, 2015). Aparece entonces una repulsión eléctrica entre cargas de igual signo. Para conseguir la formación de agregados de partículas habrá que reducir el potencial eléctrico rompiendo la estabilidad de los coloides. Habrá que tener en cuenta, por lo tanto, que las distintas moléculas se ven afectadas por las fuerzas de Van der Waals, una fuerza cohesiva atómica, resultante de la atracción de todos los átomos. Por otro lado, también estará presente la fuerza gravitacional, que solo decantará algunas partículas presentes en el agua debido a su tamaño, superficie específica y peso.

### 1.3.4 Coagulación y floculación

Una vez definidos los fenómenos que impiden la decantación de las partículas en suspensión de forma natural, se van a estudiar los procesos que dan pie a la realización de este trabajo y que anteriormente se citaron en la etapa primaria de depuración, coagulación y floculación.

La coagulación es el proceso de desestabilización y posterior agregación de partículas en suspensión coloidal presentes en el agua para potenciar la etapa de decantación. La desestabilización se consigue neutralizando las cargas eléctricas, con las que dejan de actuar las fuerzas de repulsión, el potencial entre los coloides y la solución se anula permitiendo que los coloides puedan agregarse debido a la atracción entre masas, se cambian las propiedades de los elementos insolubles como

procedimiento previo a la decantación. Es más sencillo separar partículas grandes y pesadas que partículas ligeras y de poca superficie específica. La coagulación tenderá a agrupar partículas pequeñas en otras mayores y más pesadas, denominadas flóculos, y el sistema será inestable debido a esta agregación de partículas. Los factores más importantes que intervienen en este proceso son el tipo y cantidad de coagulante, el pH del agua, el período de coagulación, la temperatura del agua y la agitación. En la figura 1-4 se muestra como la coagulación evita la repulsión de los coloides reduciendo el sistema disperso.

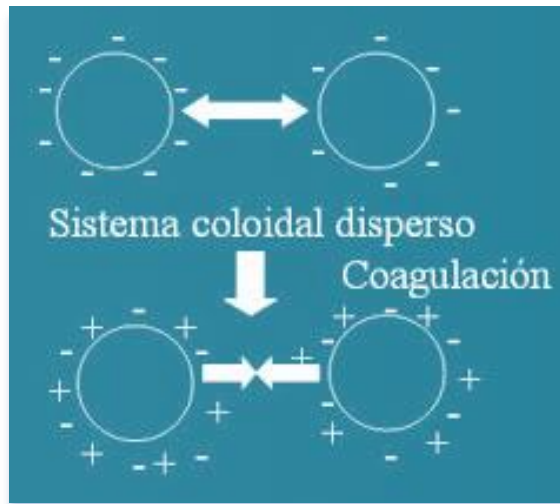


Figura 1-4 Representación efecto de coagulación en sistema coloidal disperso (Servyeco, 2015)

El proceso de floculación precede al de coagulación. La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas, primero en microfloculos, y después en flóculos más grandes que tienden a depositarse en los decantadores, en el fondo de los recipientes construidos para ese fin. Durante el proceso se intenta conseguir flóculos lo más pesados y grandes posibles para facilitar su sedimentación y eliminación. En la figura 1-5 se observa como los centros activos creados por el floculantes atraen a las partículas desestabilizadas.

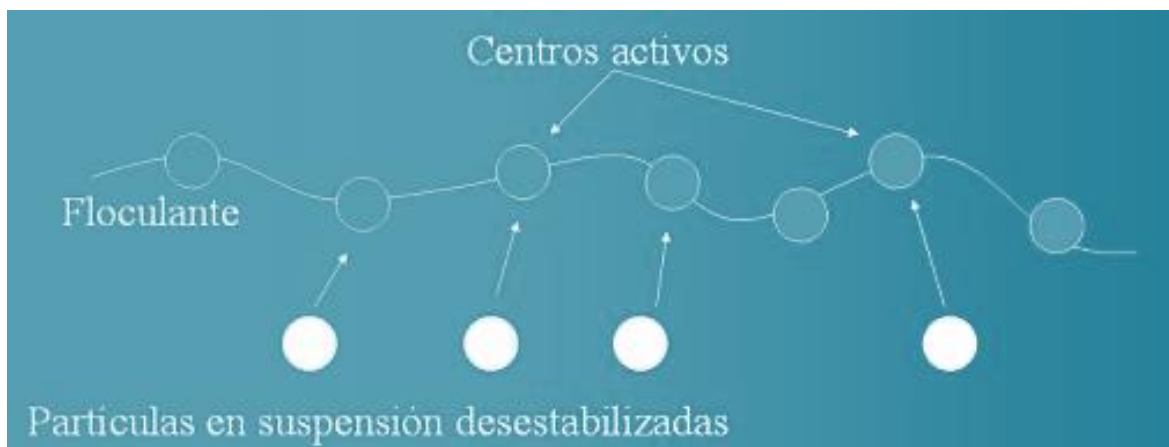


Figura 1-5 Representación efecto de aglomeración de flóculos (Servyeco, 2015)

Pueden diferenciarse las funciones de los dos procesos resumiendo que la coagulación anula las fuerzas repulsivas entre las partículas coloidales iniciando la formación de microfloculos, mientras que la floculación engloba estos microfloculos aumentando su tamaño y densidad de modo que sedimenten de forma más rápida y fácil (Urrea, 2015).

### *1.3.5 Clasificación*

Los floculantes pueden clasificarse por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (sintético o natural) o el signo de su carga eléctrica. Entre los floculantes minerales están la sílice activa y los agentes adsorbentes (arcillas, carbonato cálcico, carbón activo, tierra de diatomeas) y entre los orgánicos los denominados polielectrolitos.

Hasta el descubrimiento de los polielectrolitos, la sílice activada ocupaba un lugar especial en el tratamiento químico de las aguas, pero hoy se utiliza con frecuencia. La sílice activada proporciona ciertas ventajas como un aumento de velocidad de la coagulación, empleo de dosis más reducidas de coagulante, márgenes de pH amplios para una coagulación óptima, formación de floculos mayores y mejor eliminación del color. Sin embargo, también presenta inconvenientes al necesitarse un minucioso control para evitar que gelifique, puede ser ineficaz para ciertos tipos de aguas y la sobredosificación puede inhibir la floculación.

Los polielectrolitos aumentan considerablemente el tamaño de los floculos, pero como ocurre con la sílice, existe una dosis óptima que, sobrepasada, produce una floculación deficiente. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes es su posible toxicidad, por lo que es indispensable tener en cuenta la legislación vigente.

Los principales coagulantes utilizados son las sales de aluminio o de hierro. También se pueden emplear polímeros inorgánicos como los de hierro y aluminio como coagulantes, como el policloruro de aluminio. Inicialmente se pensó que las sales formaban un hidróxido insoluble y con ello un ácido que reducía el pH de la solución, luego se observó que cuando se añaden al agua, interviene casi instantáneamente en una serie de reacciones de tipo hidróxido multivalentes. En estas sustancias se insertan dos o más iones de aluminio o de hierro en un proceso de polimerización (Leonardo, 2015).

Es frecuente la utilización de sales de aluminio para el tratamiento de aguas como coagulantes para reducir la turbidez, el color y el contenido de materia orgánica y microorganismos. Este uso puede incrementar la concentración de aluminio en el agua tratada, y alcanzar cierta toxicidad no deseada.

A través del Real Decreto 140/2003 del 7 febrero, se reflejan las normas y técnicas reguladoras de las actividades relacionadas con la calidad del agua potable para consumo humano. En la SSI/304/2013 del 19 de febrero, donde se especifican las sustancias destinadas a la producción de agua potable se puede observar que las sales de aluminio y de hierro deben utilizarse bajo unas cantidades controladas y especificadas.

Cuando se adicionan las sales de aluminio o de hierro al agua se obtienen reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos, producen hidróxidos de aluminio o hierro que forman precipitados y son insolubles (Cárdenas, 2015).

Las sales de aluminio son los coagulantes más usados. No obstante, presentan varios inconvenientes al requerirse un control elevado del pH, la remoción de material orgánica es limitada, presenta problemas con aguas con mucha turbidez, suelen requerir un ayudante de floculación (polímero) para flocular, y su alto contenido presenta problemas residuales y de toxicidad (Murillo, 2011).

### 1.3.6 Optimización

Con el fin de conseguir unos resultados óptimos en la descontaminación del agua, es necesario estudiar y analizar qué flocculantes y coagulantes se utilizarán en la primera fase de descontaminación del agua donde se eliminarán las partículas en suspensión. Igual de necesario es obtener unos resultados a través de análisis experimentales de optimización, donde se establezcan las cantidades idóneas respecto a la cantidad de agua a tratar que garanticen los efectos deseados de los coagulantes y flocculantes.

Los métodos de Superficie de Respuesta son un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para analizar problemas en los que una o más variables de interés (variables dependientes) dependen de otras (variables independientes). Una vez que se han identificado los factores clave en el rendimiento de un proceso, el siguiente paso es determinar condiciones óptimas de los factores. En este tipo de estudios factoriales, los diseños para la optimización implican por lo menos tres niveles por cada factor para poder estimar la curvatura. El objetivo es optimizar la variable de interés. Las variables independientes se agrupan en una función de respuesta, típicamente polinómica, que permite obtener una superficie de respuesta, en dos ó tres dimensiones, que se utilizará para predecir el comportamiento de la/s variable/s de interés.

### 1.3.7 Test de jarras

Entre los diferentes métodos de optimización de coagulantes y flocculantes, destaca el test de jarras por su común uso en los laboratorios, donde se simulan las operaciones que realizarían estos compuestos en las plantas de tratamiento y purificación de las aguas. En la figura 1-8 se presenta un flocculador utilizado en el presente trabajo durante la optimización de un compuesto utilizando este método.

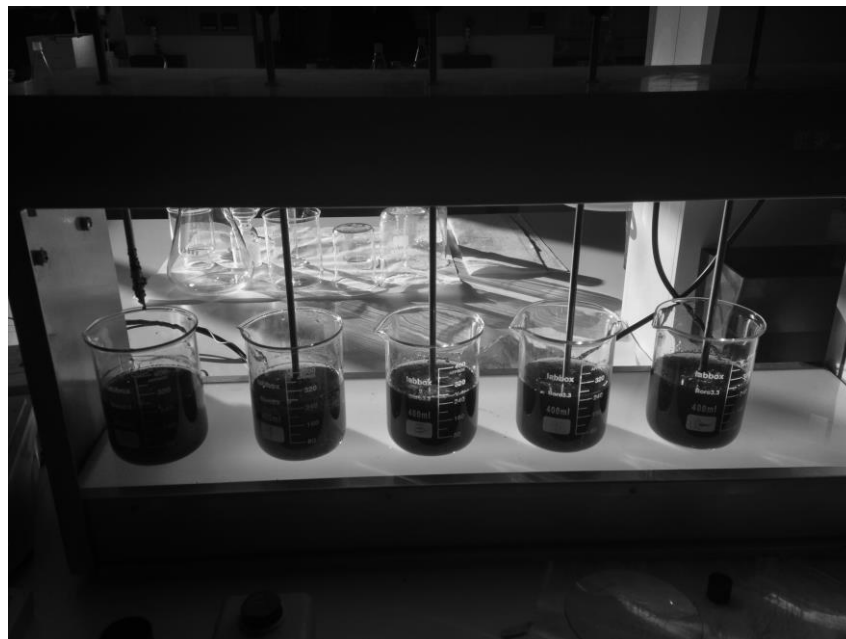


Figura 1-6 Flocculador utilizado en el test de jarras

Se realizan pruebas en el laboratorio con diferentes dosis químicas. Se realizan mezclas a diferentes velocidades y se toman muestras a diferentes tiempos de reposo. El fin es obtener la dosis ideal mínima de coagulante-floculante requerida para alcanzar la calidad de agua deseada.



## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Estudios de optimización de coagulantes y floculantes

Actualmente existen numerosos floculantes y coagulantes con probada efectividad en el uso del tratamiento de las aguas. No obstante, se realizan estudios y análisis con el fin de encontrar nuevos productos más ecológicos o menos tóxicos con efectividad semejante en una concentración óptima. En este apartado se exponen algunos trabajos recientes acerca del uso de nuevos materiales para su uso en la coagulación-floculación de partículas en suspensión.

#### *2.1.1 Uso del lactato cálcico en la clarificación de aguas*

En el artículo de la optimización del lactato cálcico como un nuevo coagulante publicado en 2011 por Devesa-Rey, N.Fernández y J.M Cruz, mediante el uso de herramientas de optimización, se realizó un estudio donde se comprobó la eficacia del lactato cálcico como coagulante para aguas residuales que pudiesen experimentar variación de pH. Las condiciones experimentales, a nivel de laboratorio, para calcular una eficiente eliminación de las partículas en suspensión del agua se realizaron a partir del uso de un diseño factorial, donde se toman valores medios, máximos y mínimos de cada variable en 3D para evaluar el efecto de la dosis de los siguientes componentes en la reducción de la turbidez del agua; lactato cálcico entre 2 y 10 gr/l, un pH entre 5 y 7, y una cantidad de gramos de sedimentos entre 4 y 16 gr/l.

Los resultados mostraron que entre los rangos de las variables utilizados, las mayores reducciones de la turbidez fueron alcanzadas con una concentración moderada de lactato cálcico y pH 5. Después de dos horas de tratamiento del ácido cálcico, la turbidez del agua se redujo entre el 77 y 88% respecto a la muestra inicial. Además, 6 y 2 gr/l de ácido cálcico redujeron la turbidez de 300 NTU a 2,5 y 5,5 NTU respectivamente después de 18 horas de tratamiento con un pH 5. Para estos periodos tan cortos de tiempo, se pudo deducir que el pH fue la variable más importante.

#### *2.1.2 Evaluación de coagulantes-floculantes no convencionales para la reducción de la turbidez del agua*

En el marco de la utilización de compuestos novedosos y más biodegradables, Devesa-Rey et al. (2011) evaluaron diferentes compuestos: lactato de sodio y ácido cítrico. Los resultados se compararon con el coagulante convencional  $AlCl_3$ , comúnmente empleado en la reducción de agregados. También

para comparar el resultado de la reducción de la turbidez, se usaron otros componentes como sodio dodecil sulfato y carbón activo.

La utilización del lactato de sodio resultó tener que ser más restrictiva, debido a la mayor concentración de sodio en el agua tratada con lactato de sodio que puede ser fitotóxico y ecotóxico. Sin embargo, la utilización de ácido cítrico dio valores de turbidez mayores que cuando fue empleado el ácido láctico como coagulante, por lo que se pudo concluir que solo las sales de ácido láctico obtienen mejores resultados que el  $\text{AlCl}_3$ .

El uso de carbón activo puede resultar beneficioso en el tratamiento de aguas, aunque es conocido que su papel es el de adsorbente, reteniendo sobre su superficie y en su estructura interna de poros los contaminantes disueltos en agua. Resulta, por tanto, menos eficaz en el tratamiento de aguas con partículas de mayor tamaño que no pueden resultar retenidas por el carbón activo. Para estas partículas debe buscarse un tratamiento que facilite su agregación y posterior sedimentación.

### *2.1.3 Proceso de coagulación-floculación para el tratamiento de aguas residuales*

Ramírez et al. (2012) realizaron una investigación para desarrollar la utilización de nuevos compuestos en la utilización de lodos. Se probó el proceso de coagulación-floculación como una etapa de pretratamiento de las aguas residuales producidas en la ciudad de Méjico. El interés de la investigación se centró en evaluar la eficiencia del tratamiento obtenida con nuevos productos de coagulación-floculación comparada con la obtenida con productos comerciales de probada efectividad. De los coagulantes estudiados, se utilizó una sal cuaternaria de amonio tanínico y también tres floculantes de carga eléctrica distinta. Todos los productos utilizados produjeron aguas con una calidad aceptable, desde el punto de vista físico-químico para ser reutilizadas en riego y otras actividades no relacionadas con el consumo humano. Los resultados de los nuevos productos analizados fueron perfectamente comparables con los obtenidos con los productos comerciales.

### *2.1.4 Optimización de los mecanismos de coagulación-floculación mediante un sensor "FBRM" en una Central Térmica de Ciclo Combinado*

Pérez et al. (2014) desarrollaron un método para optimizar la concentración de coagulantes y floculantes en una central térmica de ciclo combinado. En este estudio, después de analizar las diferentes técnicas disponibles para evaluar y mejorar los procesos de floculación, se decidió seleccionar la técnica FBRM (Focused Beam Reflectance Measurement) para supervisar, optimizar y controlar la floculación en el tratamiento de aguas residuales de una central térmica de ciclo combinado. El objetivo fue desarrollar un método que calculase el tipo y la dosis óptima del floculante.

FBRM, microscopio láser sin imagen o sistema de medida por reflexión de rayo enfocado, es una técnica basada en una óptica de precisión que realiza medidas de cuerdas de partículas o agregados a través de la reflexión de una luz láser que barre la muestra con un movimiento circular a alta velocidad. Se realizaron diversos ensayos con la sonda FBRM determinando el tamaño medio de cuerda y la estabilidad frente a la agitación. Se determinó que los floculantes aniónicos con los que se obtuvieron los mejores resultados fueron los de elevado peso molecular y densidad de carga media.

### *2.1.5 Optimización del proceso de sedimentación de precipitados procedentes del tratamiento de efluentes*

Por último, Blasco (2012) realizó un estudio para optimizar el proceso de sedimentación de lodos de una depuradora físico-química de aguas residuales industriales que trata el agua procedente de una

empresa de recubrimiento de superficies metálicas. Se obtuvieron las condiciones óptimas de operación del proceso de coagulación-floculación, que garanticen una menor producción de lodo así como la producción de un efluente lo más clarificado posible. Se obtuvo el modelo que mejor ajusta la velocidad de sedimentación de los lodos en función de la concentración de sólidos suspendidos. Se estudió la variación de velocidad de sedimentación aplicando las condiciones de operación óptimas anteriormente obtenidas y acondicionando el lodo con el uso de un polielectrolito. Por último se determinó la superficie mínima necesaria para el correcto espesado del lodo.

## 3 DESARROLLO DEL TFG

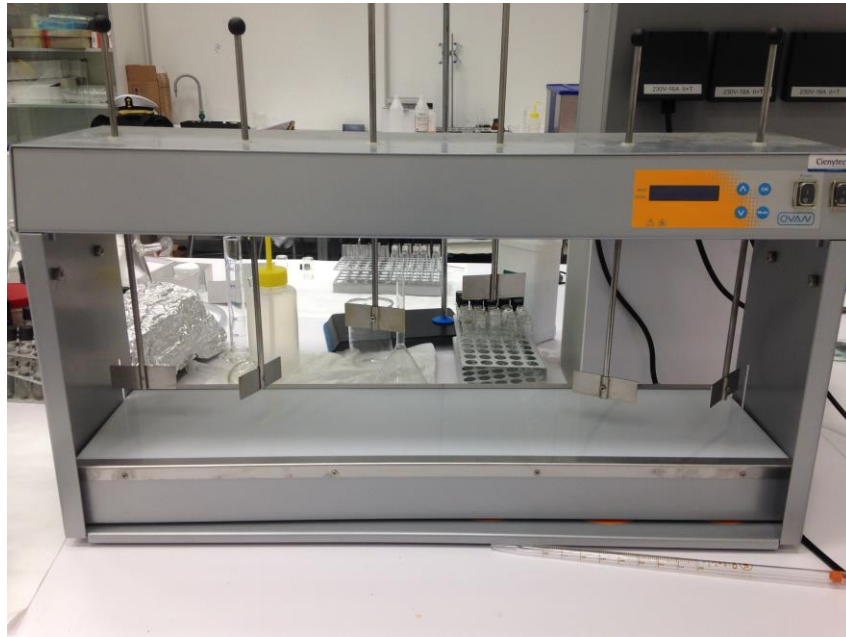
### 3.1 Materiales y métodos

En el proceso de elección del mejor coagulante, se evaluaron el ácido láctico, la tierra de diatomeas y el lactato cálcico. Se utilizó lactato cálcico de pureza 100% de la marca “Fagron”; la tierra de diatomeas se obtuvo de la sala de mantenimiento de la piscina de la ENM; el ácido láctico comercial de pureza 100% se obtuvo de Merck. Como contaminante se utilizó el suelo de grano grueso de la figura 3-1 (Compo Sana Universa).



Figura 3-1 Suelo usada para las mezclas

Las mezclas de suelo en agua con los floculantes se realizaron en un test de jarras, que permite controlar las revoluciones por minuto de agitación, el tiempo de agitación y reposo y permite realizar seis análisis en paralelo. Para ello se utilizó el floculador de la figura 3-2.



**Figura 3-2 Mezclador (Cienytech)**

La turbidez de las diferentes muestras se midió con un nefelómetro o turbidímetro, calibrado, y que se muestra en la figura 3-3.



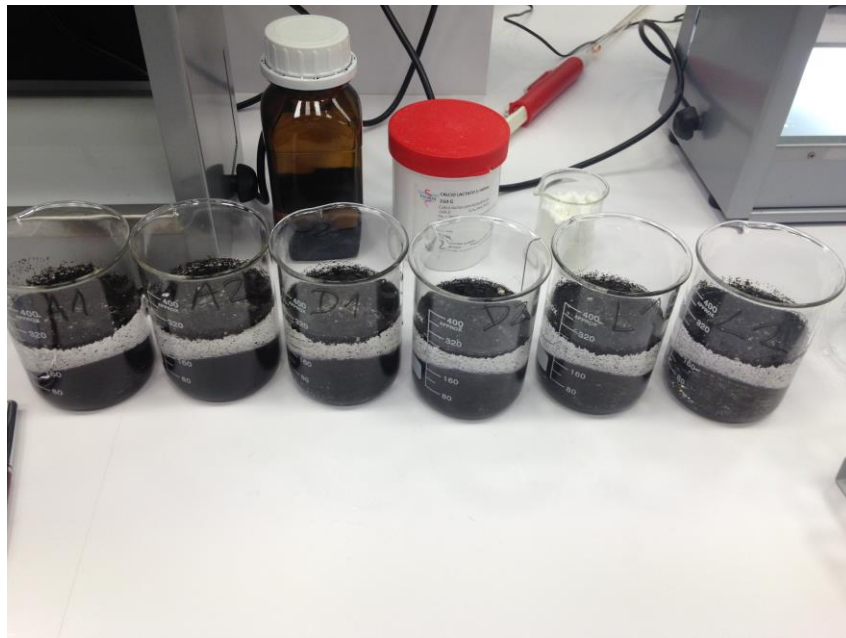
**Figura 3-3 Turbidímetro (Eutech Instrument)**

### 3.2 Procesos

Para cumplir el objetivo principal del proyecto, y poder determinar el coagulante-floculante más efectivo en su óptima cantidad para ser aplicado en aguas con materia en suspensión, se utilizaron los siguientes procedimientos: en el primero de ellos se determina el compuesto más adecuado para realizar un estudio en base a sus cualidades coagulantes y floculantes. Posteriormente, en el segundo proceso, se buscará una optimización para el uso de dicho componente.

#### 3.2.1 Elección del coagulante-floculante

Se presentan tres diferentes componentes como alternativa a los coagulantes floculantes usados normalmente y mencionados en la introducción. Estos componentes fueron el ácido láctico, la tierra de diatomea y el lactato cálcico. Sus muestras aparecen en la siguiente figura 3-4. Para analizar cuál entre los tres es más efectivo se tomaron seis muestras, dos por cada componente. En cada muestra, se mezclaron 250 ml de agua con 2,5 gr de suelo. Para cada una de las muestras se añadió 1 gr/l de cada coagulante.



**Figura 3-4 Muestras antes de comenzar el proceso de agitación controlado por rev/min y tiempo.**

A continuación, las seis muestras se sometieron a un proceso de agitación mediante un test de jarras controlado por revoluciones y tiempo. El procedimiento de agitación utilizado fue: agitación a 200 rev/min durante 5 minutos y, posteriormente, agitación durante 10 minutos a 75 rev/min. En la figura 3-5 se pueden ver las muestras una vez finalizadas las mezclas.



**Figura 3-5 Muestras al finalizar el proceso de test de jarras controlado por rev/min y tiempo.**

A continuación, se dejaron reposar las mezclas y se tomaron mediciones de la turbidez a cada una de ellas durante una hora. Estas mediciones se hicieron al cabo de 1, 5, 10, 20, 40 y 60 minutos de haber terminado el proceso de agitación.

### *3.2.1 Proceso de optimización para reducción de turbidez*

En este segundo proceso experimental, se calculó la cantidad óptima del coagulante seleccionado en base a los resultados del procedimiento anterior. Las variables elegidas para la optimización del proceso fueron: concentración de coagulante, concentración de suelo en agua y efecto de la salinidad, por ser éste un factor que puede ser relevante en el tratamiento de aguas procedentes de agua de mar.

Para ello, se prepararon 15 muestras, en las que se variaron las cantidades de gramos de sedimentos, salinidad y gr/l de coagulante. En el diseño experimental se incluyen tres puntos centrales (experimentos 13-15) fijados a las concentraciones medias de cada variable, para evaluar la calidad del proceso experimental. Como en el anterior proceso, las muestras fueron sometidas a un esquema de agitación para asegurar la mezcla de los componentes. Así, 200 rev/min durante 5 min y 75 rev/min durante 10 min fueron las pautas para asegurar el buen mezclado. Se realizaron medidas de la turbidez del agua al cabo de 5, 15 y 30 minutos después de finalizar la agitación de las muestras.

Las condiciones experimentales empleadas en cada uno de los quince experimentos se recogen en la tabla 1:

Tabla 1 Cantidades usadas en el segundo proceso

Muestras	Coagulante (g/l)	Suelo (g)	Salinidad (g)
1	1,5	2,5	0
2	1,5	7,5	0
3	1,5	2,5	8,4
4	1,5	7,5	8,4
5	0,5	2,5	4,2
6	0,5	7,5	4,2
7	2,5	2,5	4,2
8	2,5	7,5	4,2
9	0,5	5	0
10	0,5	5	8,4
11	2,5	5	0
12	2,5	5	8,4
13	1,5	5	4,2
14	1,5	5	4,2
15	1,5	5	4,2

### 3.2.2 Método de optimización Box-Behnken

Para la optimización del coagulante más efectivo se utilizó el método Box-Behnken, en el cual se utilizan técnicas matemáticas y estadísticas para obtener un modelo en base a los datos obtenidos durante el proceso experimental. Son diseños rotatorios de segundo orden basados en diseños factoriales incompletos de tercer nivel. En estos diseños la varianza de la respuesta predicha en cualquier punto de la superficie es función sólo de la distancia al punto central. El número de experimentos requeridos (N) se obtiene con la siguiente fórmula;  $N = 2k(k-1) + C_0$ , donde k es el número de factores y  $C_0$  el número de valor central. La función (1) describe la función lineal.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + e \quad \text{eq (1)}$$

Donde  $b_0$  es el factor constante,  $b_i$  representa el coeficiente de parámetros lineales,  $k$  es el número de variables,  $x_i$  representa las variables, y  $e$  es el factor residual asociado a los experimentos. Cuando un resultado experimental no se ajusta a una ecuación lineal, es deseable incluir niveles en las variables de entrada. En este caso, se debe generar una respuesta polinómica, ecuación (2). Los experimentos Box-Behnken fueron diseñados para situaciones en las cuales es deseable crear un modelo de segundo orden.



$$y = b_0 \mathring{a}_{i=1}^k b_i x_i + \mathring{a}_{i=1}^k \mathring{a}_{j^3i}^k b_{ij} x_i x_j + e \quad \text{eq (2)}$$

Donde  $\beta_{ij}$  representa el coeficiente de interacción de parámetros. Estos diseños incluyen un punto central usado para determinar la curvatura, y condiciones críticas y óptimas son deducidas por la función (3) de segundo orden que incluye términos cuadráticos;

$$y = b_0 \mathring{a}_{i=1}^k b_i x_i + \mathring{a}_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \mathring{a}_{i=1}^k \mathring{a}_{j^3i}^k b_{ij} x_i x_j + e \quad \text{eq (3)}$$

Donde  $\beta_{ii}$  representa el coeficiente de los términos cuadráticos. Los resultados experimentales permiten el desarrollo de métodos empíricos que describen las relaciones entre las variables experimentales y de cálculos por ecuaciones que incluyen términos lineales, de interacción y cuadráticos.

El rango de variables independientes y dependientes estudiados son incluidos en las tablas 2 y 3.

**Tabla 2 Variables independientes usadas en el experimento**

<b>VARIABLES INDEP.</b>			
VARIABLE	NOMENCLATURA	UNIDADES	RANGO VARIACIÓN
Concentración de ácido láctico	[Láctico]	gr/l	0,5 – 2,5
Concentración de sedimento	[Sed]	%	2,5 – 7,5
Salinidad	[S]	gr/l	0 - 100

<b>VARIABLES CODIFICADAS ADIMENSIONALES</b>			
VARIABLE	NOMENCLATURA	UNIDADES	RANGO DE VARIACIÓN
Concentración de ácido láctico, adimensional	$x_1$	$([\text{Láctico}]-3)/1,5$	(-1, 1)
Concentración de sedimento, adimensional	$x_2$	$([\text{Sed}]-10)/5$	(-1, 1)
Salinidad, adimensional	$x_3$	$([S]-100)/50$	(-1, 1)

**Tabla 3 Variables dependientes usadas en el experimento**

<b>VARIABLES DEPENDIENTES</b>		
<b>VARIABLE</b>	<b>NOMENCLATURA</b>	<b>UNIDADES</b>
Turbidez, 5 min	$y_1$	NTU
Turbidez, 15 min	$y_2$	NTU
Turbidez, 30 min	$y_2$	NTU

En el método estandarizado, se usan límites para las diferentes variables, que oscilan entre (-1,1), definidas como cantidad de ácido láctico ( $x_1$ ), cantidad de sedimentos ( $x_2$ ), y salinidad ( $x_3$ ). Por lo tanto la función cuadrática (4) obtenida por estas tres variables es;

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 \quad eq. (4)$$

La variable dependiente es  $y$ ,  $\beta$  es el coeficiente de regresión y  $x$  representa las variables independientes.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados elección coagulante-floculante

Los resultados del primer proceso experimental reflejaron que el ácido láctico realizaba mejores funciones de coagulante-floculante respecto a la tierra de diatomea y el ácido cálcico. Se observó cómo la turbidez del agua en todos los tiempos analizados fue menor en la utilización del ácido láctico.

Desde el primer minuto de reposo se pudo observar cómo el ácido láctico sedimentaba más cantidad de partículas. Dicho efecto se reflejaba visualmente en el color de las muestras. A medida que transcurrían los minutos este efecto se acentuaba más, se observaba como las muestras de ácido láctico tomaban un tono más transparente que las otras. Esta reducción de la turbidez se verificó usando el turbidímetro. Los datos recogidos de la turbidez mostraron una mayor efectividad en el ácido láctico con el transcurso del tiempo (Tabla 4). Dichos resultados fueron suficientes para seleccionar a dicho ácido como el mejor componente de estudio y proceder a su optimización en el segundo proceso.

El ácido láctico a partir de los cinco minutos mostró datos de la turbidez considerablemente bajos respecto del inicial. Por otro lado, para conseguir esos mismos valores (20-25 NTU) la diatomea y el lactato cálcico necesitaron más de veinte minutos.

Transcurridos cuarenta minutos, se redujo la velocidad de variación de la turbidez de todas las muestras.

Los otros dos productos que se eliminaron, tierra de diatomea y lactato cálcico, mostraron datos en la reducción de la turbidez parecidos. En los primeros minutos la diatomea parecía ser el segundo mejor coagulante-floculante, sin embargo, en los últimos minutos de reposo el lactato cálcico ofreció mejores datos.

Debido a las bajas desviaciones obtenidas entre las diferentes medidas de turbidez de las muestras, se pudo validar la selección del ácido láctico.

En la tabla 4 se reflejan los resultados de la turbidez de los tres productos para los diferentes tiempos de reposo. También se reflejan las desviaciones entre las diferentes muestras de cada producto.

Tabla 4 Resultados turbidez de las muestras del proceso de elección del coagulante-floculante

Tiempo	Ácido Láctico		Tierra de Diatomea		Lactato Cálcico	
	<u>Turbidez</u> <u>media</u>	<u>Desviación</u>	<u>Turbidez</u> <u>media</u>	<u>Desviación</u>	<u>Turbidez</u> <u>media</u>	<u>Desviación</u>
<b>1 min</b>	35	2,82	56	7,07	75,5	2,12
<b>5 min</b>	24,5	3,53	43	11,1	55	1,41
<b>10 min</b>	17,5	0,7	34,5	6,36	37	2,82
<b>20 min</b>	15	1,14	24,5	4,94	27	2,82
<b>40 min</b>	11,5	0,63	18	1,41	14,5	0,07
<b>60 min</b>	9,3	0,84	10,55	0,35	10,3	0,14

#### 4.2 Resultados método Box-Behnken

A continuación, en este apartado se reflejan los resultados obtenidos en la optimización del ácido láctico a través del método Box-Behnken. Los resultados experimentales de las tres variables (ácido láctico, sedimentos y salinidad) frente a las variables dependientes dependientes del tiempo (5 min, 15 min y 30 min), se exponen en la tabla 5 donde el resultado es la medición de la turbidez de las quince muestras estudiadas. Las variables independientes  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  representan en las columnas del ácido láctico, sedimentos y salinidad respectivamente.

Las relaciones entre las variables dependientes e independientes, fueron establecidas por ecuaciones lineales en base a sus variaciones máximas y mínimas, de acuerdo a la siguiente ecuación (5);

$$x_i = \left( \frac{z_i - z_i^0}{Dz_i} \right) \beta_d \quad eq. (5)$$

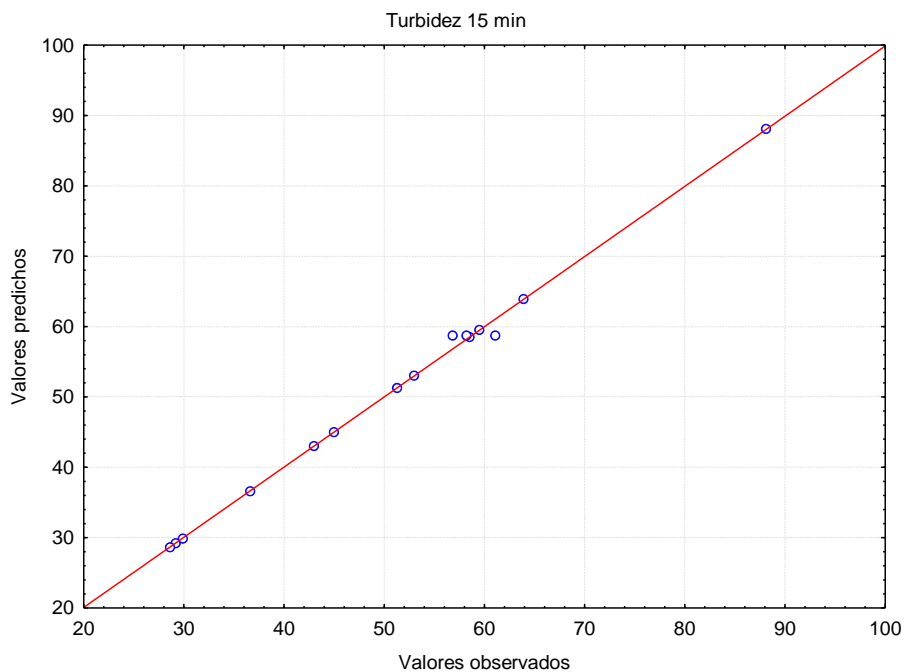
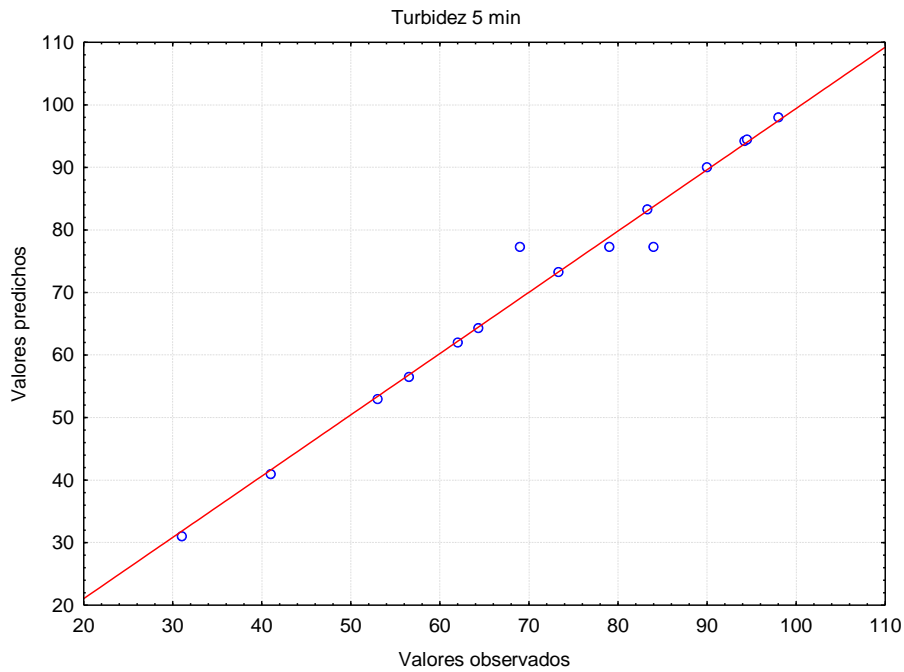
Donde  $\Delta z_i$  es la distancia entre el valor real en el punto central y el valor real en su límite superior e inferior,  $\beta_d$  es el valor límite mayor en la matriz para cada variable, y  $z_i^0$  es el valor real del punto central. Las variables codificadas fueron asignadas a valores de -1, 0 y +1, correspondiendo al límite inferior, al valor central, y al límite superior respectivamente. Por tanto, la solución para las variables codificadas no está influenciada por la magnitud de cada variable, al permitir combinaciones en la escala de las dimensiones de los factores. En la tabla 5 se presentan los resultados de la turbidez de las quince muestras estudiadas en este método.

**Tabla 5 Resultado turbidez frente a las variables dependientes e independientes.**

<b>Experimento</b>	<b>Ac.Lactico (g/l)</b>	<b>Sedimento (g)</b>	<b>Salinidad (g sal)</b>	<b>Turbidez 5 min</b>	<b>Turbidez 15 min</b>	<b>Turbidez 30 min</b>
<b>1</b>	1,5	2,5	0	31	29,2	23,2
<b>2</b>	1,5	7,5	0	62	51,3	37,3
<b>3</b>	1,5	2,5	8,4	41	29,9	24,8
<b>4</b>	1,5	7,5	8,4	90	63,9	46,7
<b>5</b>	0,5	2,5	4,2	56,5	28,6	22
<b>6</b>	0,5	7,5	4,2	94,2	88,1	60,1
<b>7</b>	2,5	2,5	4,2	64,3	36,6	20,2
<b>8</b>	2,5	7,5	4,2	98	58,5	39,9
<b>9</b>	0,5	5	0	73,3	43	34
<b>10</b>	0,5	5	8,4	83,3	53	39,3
<b>11</b>	2,5	5	0	53	45	37
<b>12</b>	2,5	5	8,4	94,5	59,5	44
<b>13</b>	2,5	5	4,2	84	61,1	40
<b>14</b>	2,5	5	4,2	79	56,8	43,2
<b>15</b>	2,5	5	4,2	69	58,2	41,4

### 4.2.1 Ajuste del modelo

En los siguientes gráficos (Figura 4-1) se incluye el ajuste del modelo, que compara los resultados obtenidos experimentales con los predichos por el modelo, donde puede observarse un buen ajuste de los datos obtenidos, dando validez a dichos datos.



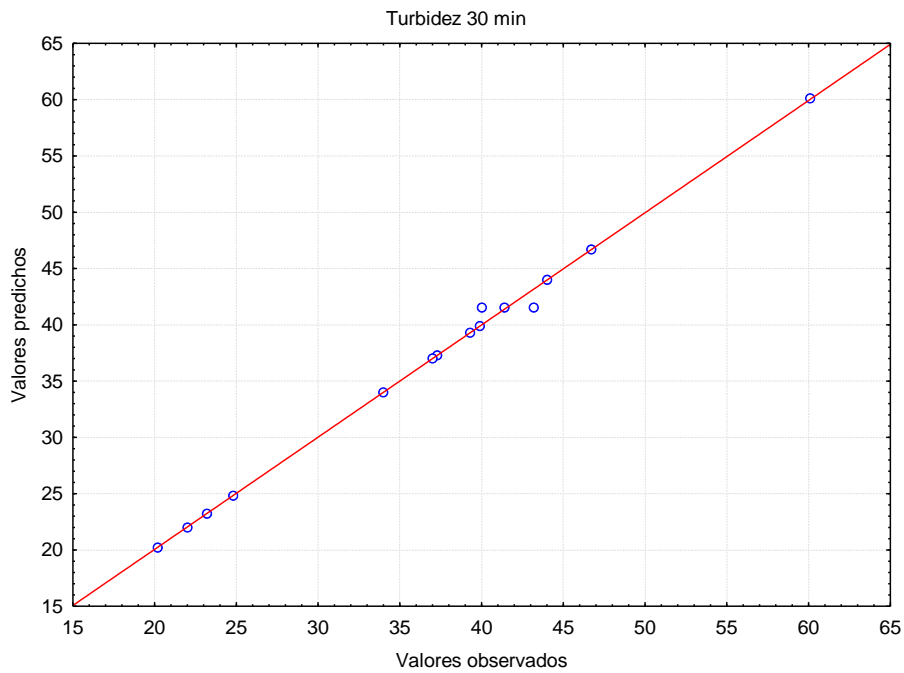


Figura 4-1 Valores predichos vs. Observados para turbidez a los 5 minutos (gráfica superior), 15 minutos (gráfica intermedia) y 30 minutos (gráfica inferior).

#### 4.2.2 Gráficos de Pareto

En los siguientes gráficos de Pareto, se pueden observar la influencia de las diferentes variables y sus combinaciones en el efecto de la turbidez del agua al cabo del tiempo. Las más determinantes son aquellas que sobrepasan el límite marcado por la línea azul, que indica un nivel de significación ( $p$ ) inferior a 0,05 (nivel de confianza del 95%).

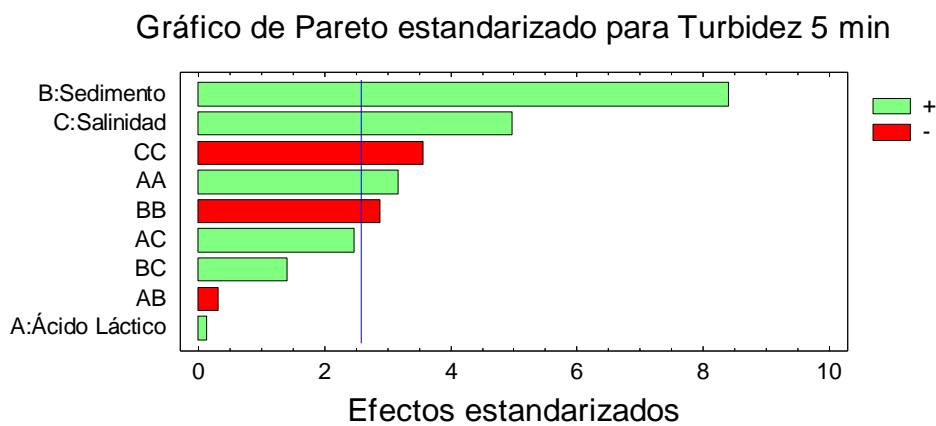
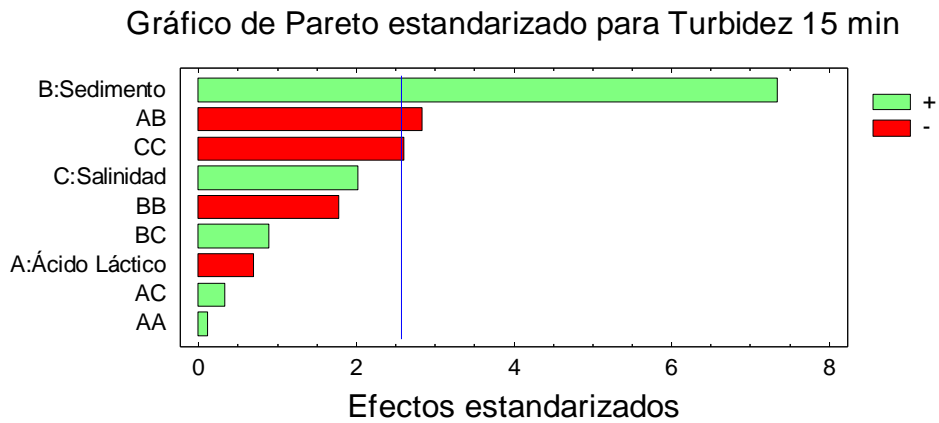


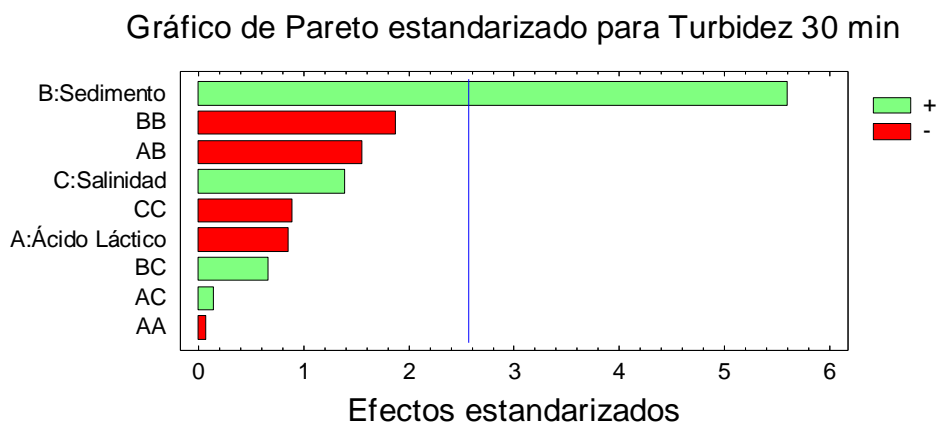
Figura 4-2 Gráfico de Pareto estandarizado para turbidez a 5 minutos

En la figura 4-2, se puede observar que la cantidad de sedimentos es la variable fundamental que determina la turbidez a los cinco minutos de reposo, seguido de la salinidad como segunda variable más influyente.



**Figura 4-3 Gráfico de Pareto estandarizado para turbidez a 15 minutos**

En la figura 4-3, se puede observar que a los quince minutos de reposo la cantidad de sedimentos es todavía más influyente que a los cinco. Sin embargo, la relación entre la salinidad y la cantidad de sedimento toma una cierta relevancia al sobrepasar el umbral. Por otro lado, la salinidad por si sola deja de ser tan influyente como lo era con diez minutos menos de reposo.



**Figura 4-4 Gráfico de Pareto estandarizado para turbidez a 30 minutos**



Una vez cumplidos treinta minutos de reposo, la cantidad de sedimentos utilizados en las muestras, es la única variable que influye en la turbidez según la figura 4-4.

Con los datos obtenidos puede construirse unos valores (Tabla 6), donde se especifica el nivel de significación de cada variable ( $p < 0,05$ ), de manera que puedan construirse unas ecuaciones predictivas para niveles de turbidez en situaciones intermedias no estudiadas:

**Tabla 6 Niveles de significación para las variables estudiadas**

	<b>y<sub>1</sub></b>	<b>p<sub>y1</sub></b>	<b>y<sub>2</sub></b>	<b>p<sub>y2</sub></b>	<b>y<sub>3</sub></b>	<b>p<sub>y3</sub></b>
<b>b<sub>0</sub></b>	70,09	0,0009*	48,88	0,00017*	35,71	0,00017*
<b>b<sub>1</sub></b>	2,35	0,72	-5,78	0,071	-6,05	0,037*
<b>b<sub>11</sub></b>	-10,47	0,12	-0,40	0,76	0,204	0,83
<b>b<sub>2</sub></b>	37,13	0,022*	36,48	0,002*	25,27	0,002*
<b>b<sub>22</sub></b>	9,55	0,14	6,15	0,033*	5,78	0,02*
<b>b<sub>3</sub></b>	23,50	0,054	10,38	0,024*	5,93	0,04*
<b>b<sub>33</sub></b>	11,78	0,097	8,98	0,016*	2,75	0,081
<b>b<sub>12</sub></b>	-2,00	0,818	-18,80	0,013*	-9,20	0,029*
<b>b<sub>13</sub></b>	15,75	0,17	2,25	0,41	0,85	0,65
<b>b<sub>23</sub></b>	9,00	0,36	5,95	0,11	3,90	0,14

\*Coeficientes significativos ( $p < 0,05$ )

Las ecuaciones predictivas que pueden obtenerse para cada una de las variables dependientes estudiadas son las siguientes:

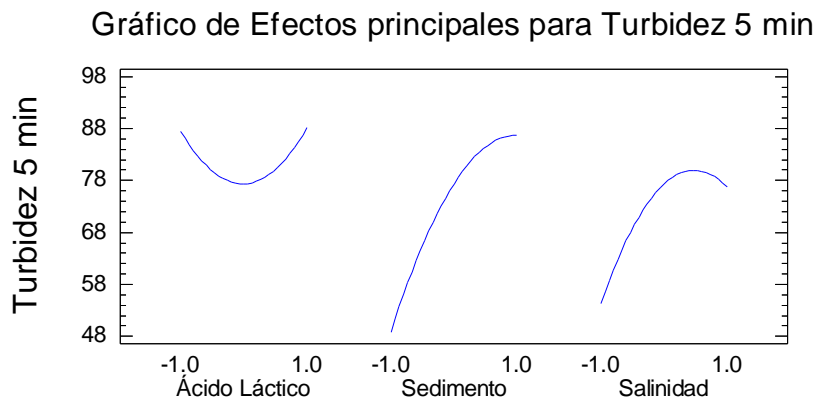
$$[Turbidez, 5 \text{ min}] = 70,09 + 37,13[Sed]$$

$$[Turbidez, 15 \text{ min}] = 48,88 + 36,48[Sed] + 6,15[Sed]^2 + 10,38[Sal] + 8,98[Sal]^2 - 18,80[Lac][Sed]$$

$$[Turbidez, 30 \text{ min}] = 35,71 - 6,05[Lac] + 25,27[Sed] + 5,78[Sed]^2 + 5,93[Sal] - 9,20[Lac][Sed]$$

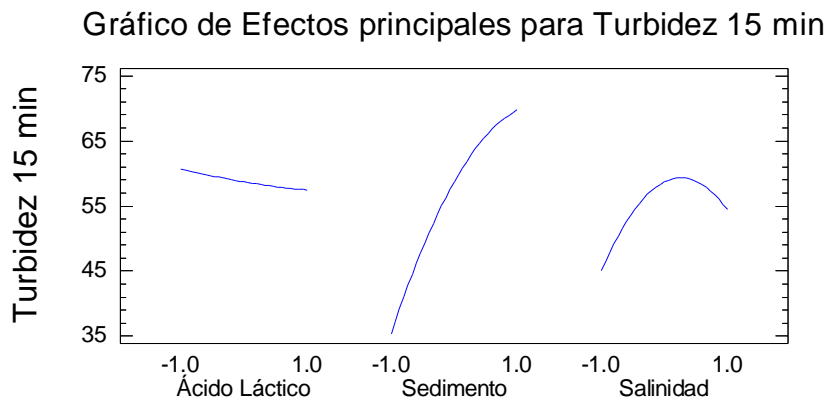
#### 4.2.3 Gráficos de efectos principales para la turbidez

En los siguientes gráficos, se representan los efectos principales de cada una de las variables sobre la turbidez en los diferentes intervalos de tiempo de reposo. Se reflejan los valores para las cantidades límites y del punto central de cada variable.



**Figura 4-5 Gráfico efectos principales de las variables para la turbidez a 5 min**

A los cinco minutos de reposo, como se aprecia en la figura 4-5, las cantidades del punto central del ácido láctico recogen las mejores muestras de turbidez. La cantidad de sedimentos es directamente proporcional a la turbidez, alcanza valores máximos con su límite superior y mínimos con su límite inferior. La salinidad también obtiene un rendimiento en la turbidez parecido al de la cantidad de sedimentos.



**Figura 4-6 Gráfico efectos principales de las variables para la turbidez a 15 min**

Una vez pasados quince minutos, según nos muestra la figura 4-6, la turbidez comienza a verse afectada proporcionalmente por la cantidad de ácido láctico, obteniendo los menores valores con la máxima cantidad del ácido y menores con la mínima. La cantidad de sedimentos realiza los mismos cambios en la turbidez que a los cinco minutos y la salinidad acentúa más el efecto obtenido a los cinco minutos.

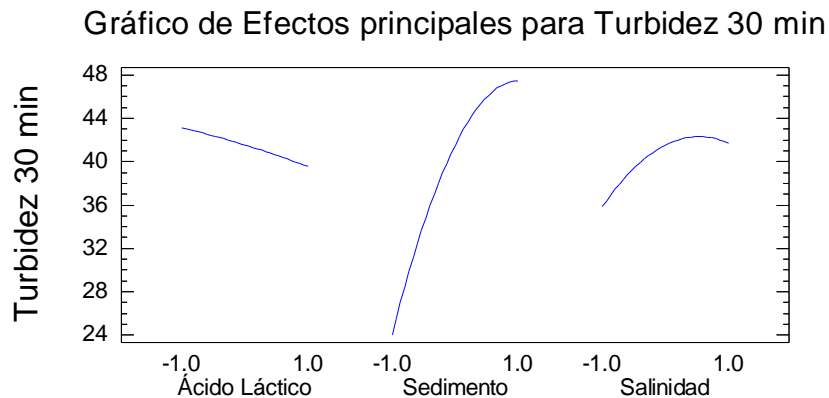


Figura 4-7 Gráfico efectos principales de las variables para la turbidez a 30 min

A los 30 minutos, el efecto del ácido láctico en la turbidez, como se observa en la figura 4-7, no incrementa, no obstante la cantidad de sedimentos y la salinidad realizan el mismo efecto que a los quince minutos.

#### 4.2.4 Gráficas de interacción de factores para turbidez

En las siguientes gráficas se puede observar cómo influye la interacción entre dos variables en el resultado de la turbidez. Esta interacción es tenida en cuenta en la formulación del método Box-Benkhen. Una vez más A representa la cantidad del ácido láctico, B la cantidad de sedimentos, y C la salinidad.

En las curvas que se representan en las gráficas se pueden analizar cómo las diferentes interacciones entre las tres variables (AB, AC y BC), influyen en el resultado de la turbidez fijando la tercera variable en su valor central (0). Se toman valores entre -1 y 1 de cada variable, y se dan resultados máximos de la turbidez en la curva representada por el signo positivo (+) y valores mínimos en la negativa (-).

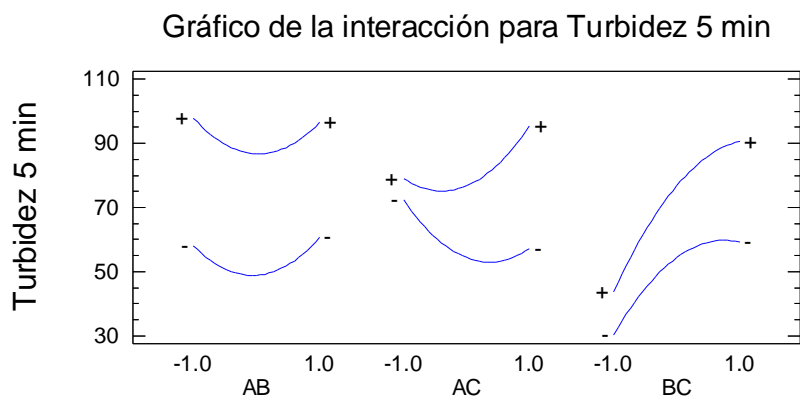
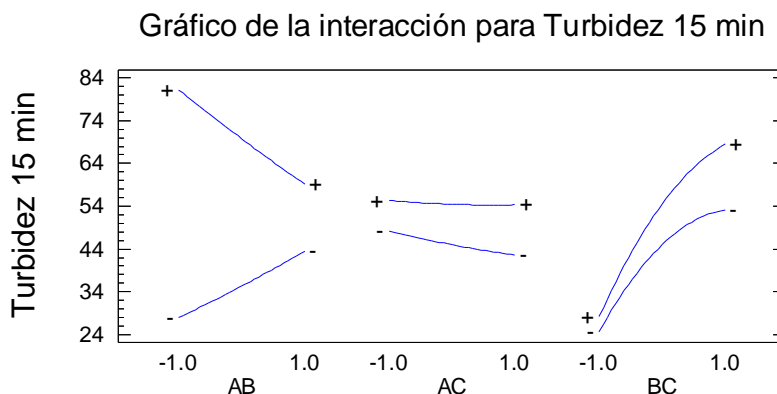


Figura 4-8 Interacción entre variables después de 5 min.

En la figura 4-8 a los cinco minutos de reposo, al fijarse la salinidad en su valor central, se puede observar como la interacción entre la cantidad de ácido láctico y sedimentos, tanto como para los varoles máximos y mínimos de la turbidez recoge los mejores valores de la turbidez en los valores centrales, como lo hacía el ácido láctico en la figura 4-5.

Al fijar la cantidad de gramos de sedimentos en su valor central, se puede observar que para los valores mínimos de la turbidez influye más el ácido láctico que la salinidad al obtenerse mejores resultados de la turbidez para valores máximos de ambas. No obstante, para los valores de turbidez altos, fue más influyente la máxima salinidad que la máxima cantidad de ácido láctico.

Al fijar la cantidad de ácido láctico en su valor central, tanto para valores máximos de la turbidez como para los mínimos, a medida que aumenta la salinidad y cantidad de sedimentos lo hace también la turbidez.



**Figura 4-9 Interacción entre variables después de 15 min.**

Pasados quince minutos de reposo en la figura 4-9, fijando la salinidad, al aumentar el ácido y la cantidad de sedimentos se obtienen dos resultados diferentes según la tendencia de los valores de la turbidez. Con los valores mínimos aumenta a medida que lo hacen las variables, por lo que se puede decir que influye más la cantidad de sedimentos. Sin embargo, con los valores máximos influye más el ácido, al obtenerse mejores resultados de la turbidez a medida que aumentan ambas.

Al fijarse la cantidad de sedimentos se produce un equilibrio entre la salinidad y el ácido láctico para los valores altos de la turbidez pues esta permanece constante. Para los valores mínimos se produce una pequeña reducción de la turbidez a medida que aumentan las variables, por lo que se puede concluir que el ácido tiene un poco más de influencia que la salinidad.

Cuando se fija el ácido láctico en su valor central, al igual que sucedía a los cinco minutos, a medida que aumentan las variables lo hace la turbidez para sus valores mínimos y máximos. Se puede observar que existe poca diferencia entre el valor máximo y mínimo de la turbidez para las cantidades menores de salinidad y sedimentos, y como esta diferencia aumenta a medida que se incrementan las cantidades de las variables.

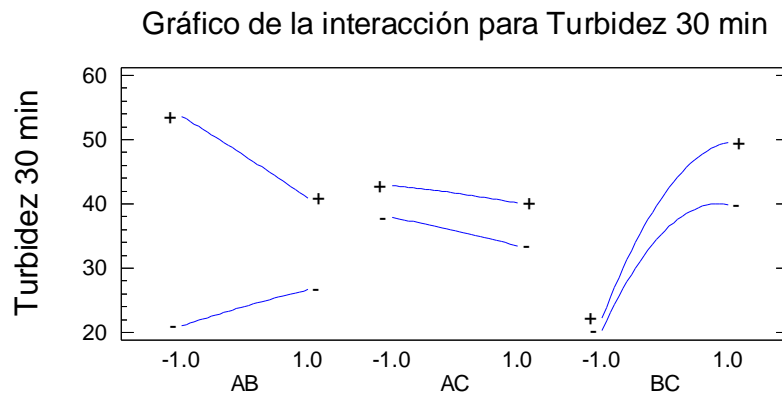


Figura 4-10 Interacción entre variables después de 30 min.

Pasados treinta minutos de reposo en la figura 4-10 se observan los mismos resultados que a los quince minutos, acentuándose aún más el efecto del ácido láctico sobre la salinidad al fijar la cantidad de sedimentos.

#### 4.2.5 Gráficas de superficie de respuesta

En las siguientes gráficas se muestran los valores de la turbidez, marcados con los colores mostrados abajo a la derecha de cada figura. En cada gráfica se estudia los resultados de la turbidez respecto a dos de las variables modificando la tercera. Gráficamente se puede observar los resultados de la turbidez en tres dimensiones para cada uno de los casos.

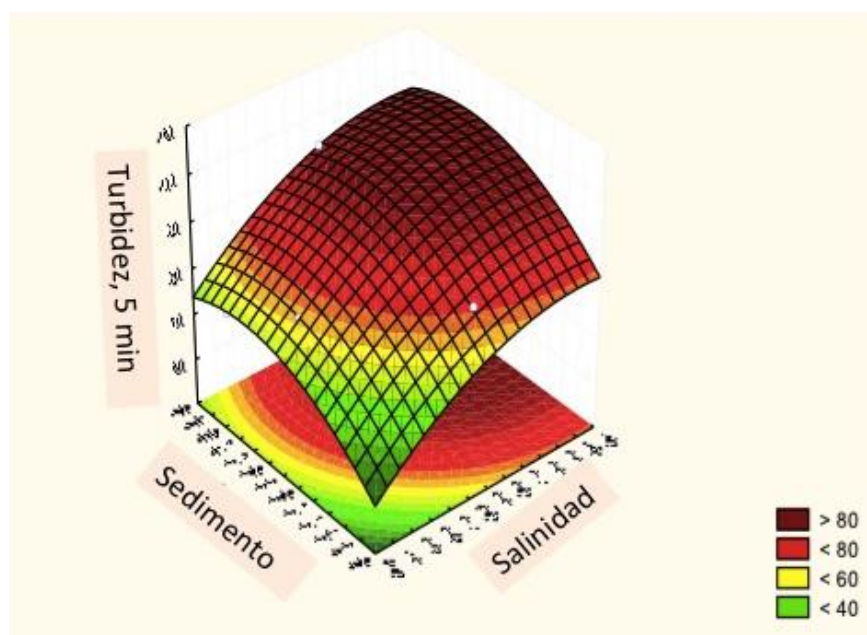


Figura 4-11 Gráfica de la salinidad Vs cantidad de sedimento para valor inferior (-1) del ácido láctico a 5 min.

En la figura 4-11 se puede observar como al fijar la mínima cantidad de ácido láctico analizada, al aumentar la salinidad y la cantidad de sedimentos aumenta también proporcionalmente la turbidez. Los valores máximos de ésta ocurren con la máxima cantidad de sedimentos y salinidad.

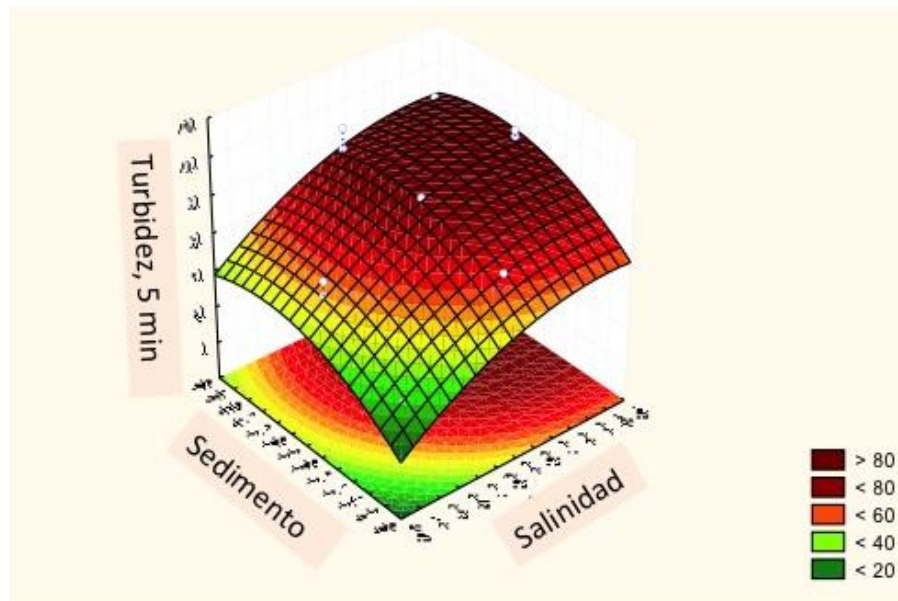


Figura 4-12 Gráfica de la salinidad Vs cantidad de sedimento para valor central (0) del ácido láctico a 5 min.

En la gráfica 4-12 se observa que al establecer la cantidad de ácido láctico en el valor central, los resultados de la turbidez se comportan de la misma forma proporcional que lo hacían con la mínima cantidad del ácido. No obstante, se puede apreciar que los valores máximos de la turbidez se ven reducidos considerablemente respecto a las muestras con menor cantidad de ácido.

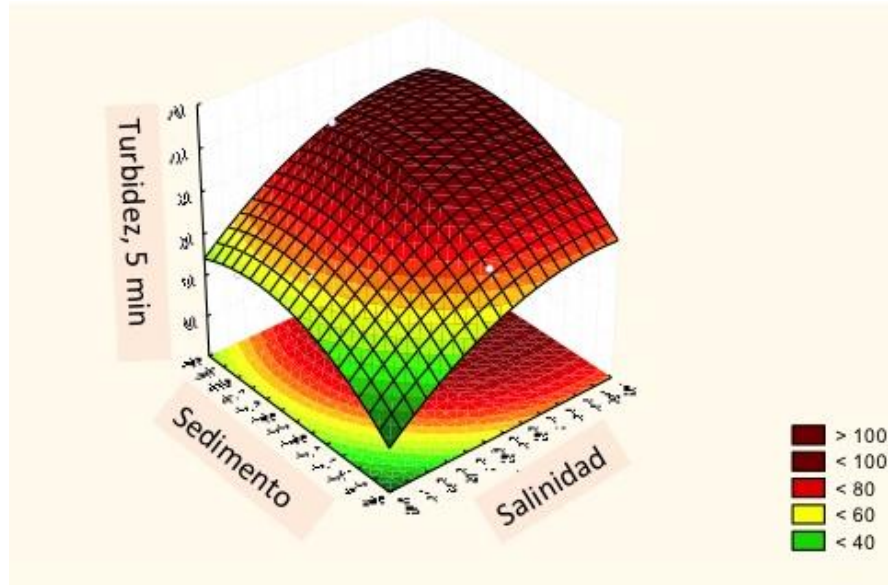


Figura 4-13 Gráfica de la salinidad Vs cantidad de sedimento para valor superior (1) del ácido láctico a 5 min.

En la figura 4-13 se observa que dosificando la mayor cantidad de ácido láctico, no se consiguen los mejores resultados en la reducción de la turbidez a cinco minutos, siendo mejores los recogidos en la figura anterior 4-12 donde se usaba la cantidad central del ácido. Esta consecuencia en la turbidez a la hora de usar la máxima concentración del ácido corresponde con la reflejada en la figura anterior 4-5 donde se evaluaban de forma independiente cada variable.

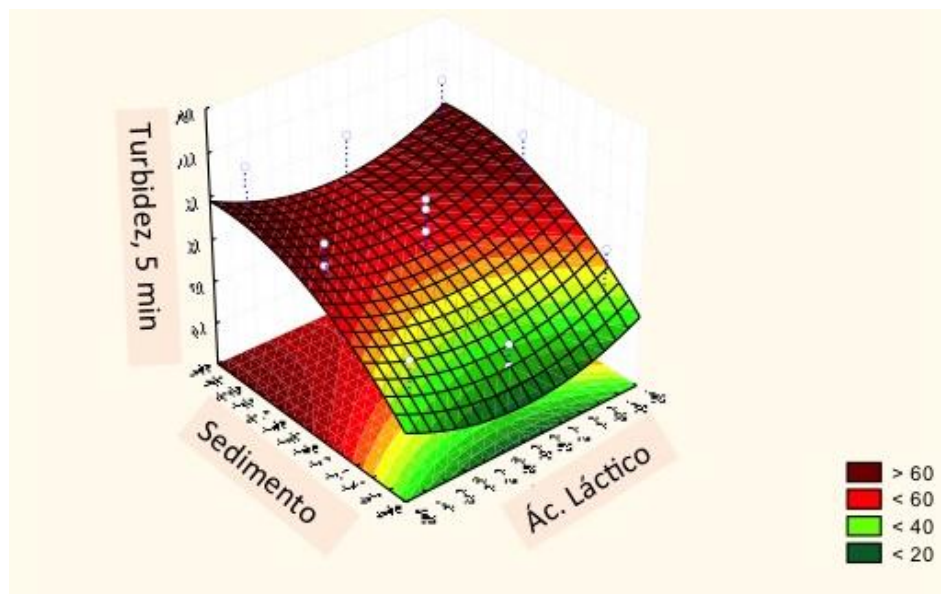
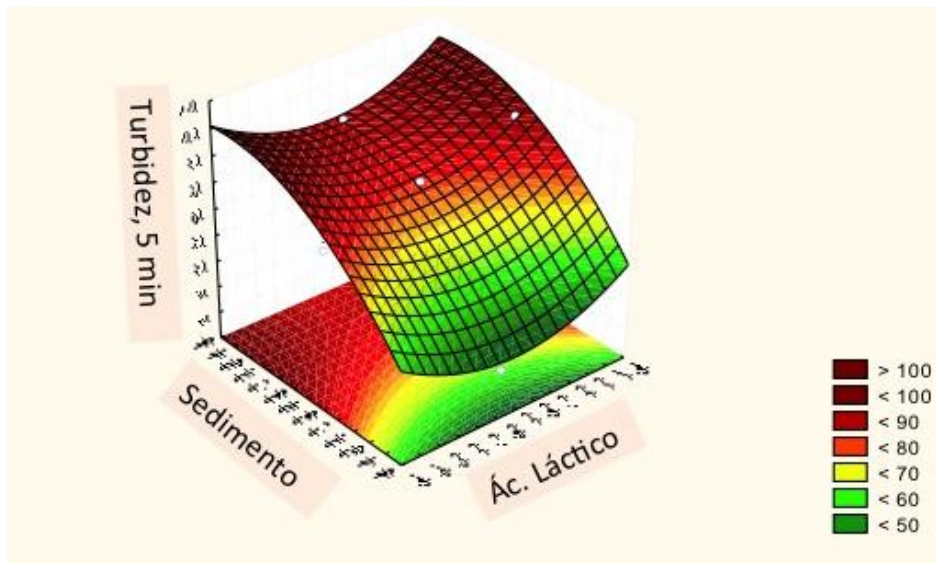


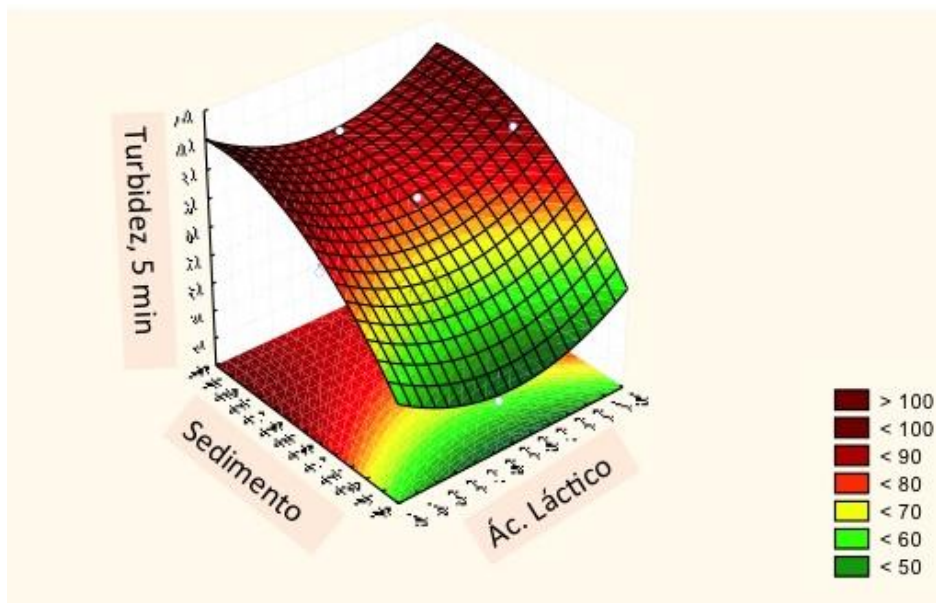
Figura 4-14 Gráfica de cantidad de ácido láctico Vs cantidad de sedimento para valor inferior (-1) de la salinidad a 5 min.

En la figura 4-14, se puede observar que al eliminar la salinidad (su valor inferior), a los cinco minutos de reposo, la cantidad de sedimentos es proporcional a la turbidez. No obstante, el ácido láctico vuelve a reflejar que recoge los mejores resultados utilizándose en su valor central.



**Figura 4-15** Gráfica de cantidad de ácido láctico Vs cantidad de sedimento para valor central (0) de la salinidad a 5 min.

En la figura 4-15, se analiza el efecto del ácido láctico y la cantidad de sedimentos con 4,2gr de sal en cada muestra (valor central). La cantidad de sedimentos sigue siendo proporcional a la turbidez de la muestra, y el ácido láctico sigue siendo más efectivo en su valor central.



**Figura 4-16** Gráfica de cantidad de ácido láctico Vs cantidad de sedimento para valor superior (1) de la salinidad a 5 min.

Según la gráfica 4-16, con la máxima cantidad de sal por muestra, los mismos efectos se producen en la turbidez que en las figuras anteriores al ir incrementando la cantidad de sedimentos y de ácido láctico.



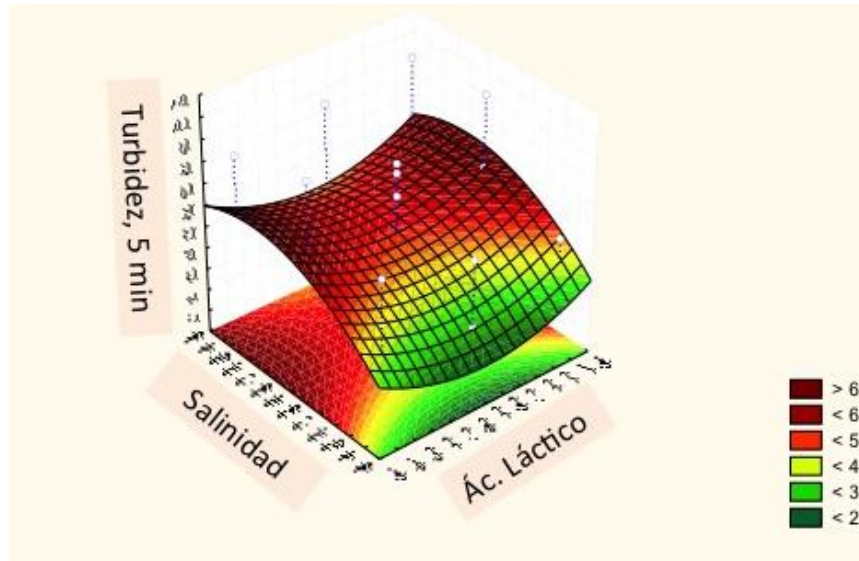


Figura 4-17 Gráfica de cantidad de ácido láctico Vs cantidad de salinidad para valor inferior (-1) de la cantidad de sedimento a 5 min.

En la figura 4-17 se estudia el efecto en la turbidez de la salinidad y la cantidad de ácido láctico. Para esta figura se fija la cantidad de sedimentos en su valor inferior (2,5gr). Al igual que ocurría al fijar la salinidad, el ácido láctico recoge sus mejores resultados en la turbidez en su valor central. También se puede observar como al aumentar la salinidad lo hace también la turbidez, pero no tan exponencialmente como lo hacía la cantidad de sedimentos. Este resultado se corresponde con la figura 4-1 del gráfico de Pareto estandarizado para la turbidez a los cinco minutos, donde se observaba que la cantidad de sedimentos era la variable más determinante en la turbidez seguida de la salinidad.

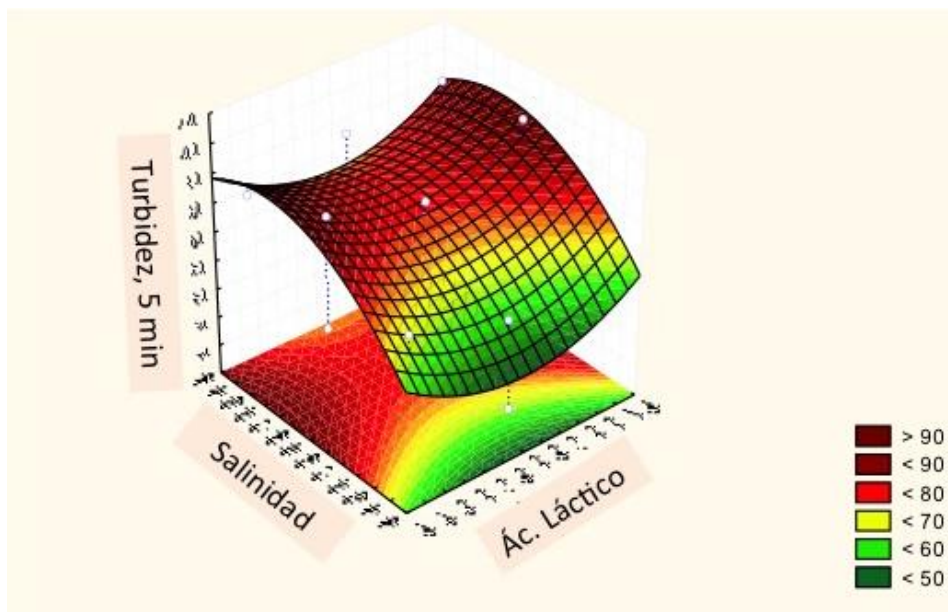
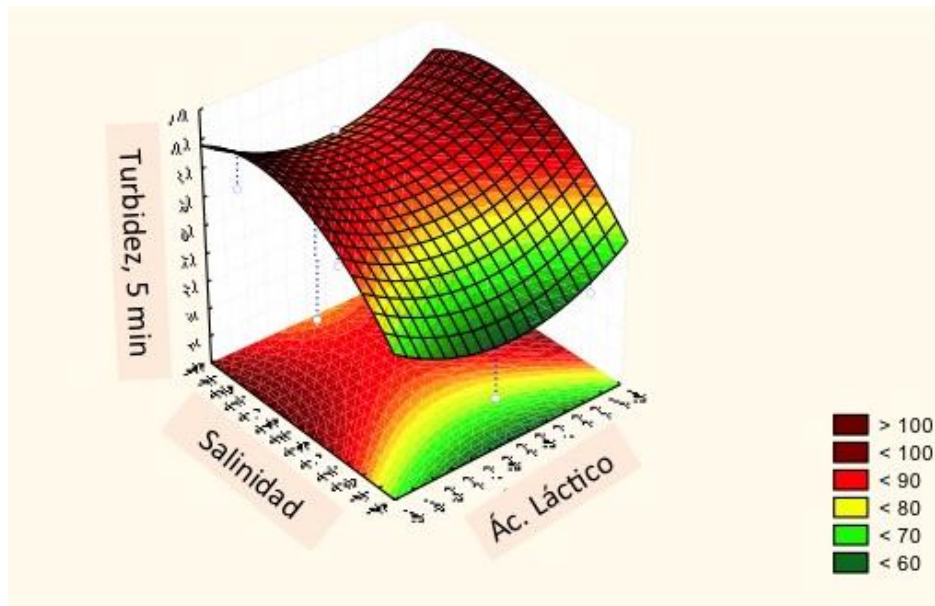


Figura 4-18 Gráfica de cantidad de ácido láctico Vs cantidad de salinidad para valor central (0) de la cantidad de sedimento a 5 min.

En la figura 4-18 se fija la cantidad de sedimentos en su valor central. Se observa como la turbidez aumenta su respecto a la gráfica anterior 4-17. El ácido láctico continúa siendo más eficiente en su valor central.



**Figura 4-19** Gráfica de cantidad de ácido lácteo Vs cantidad de salinidad para valor superior (1) de la cantidad de sedimento a 5 min.

En la figura 4-19, siguiendo la tendencia de las figuras anteriores, aumentan considerablemente los valores de la turbidez al verse la cantidad de ácido láctico incrementada hasta su valor superior.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

En el primer proceso experimental, se compararon tres compuestos diferentes no tradicionales y sin toxicidad alguna consiguiéndose resultados eficientes en la reducción de la turbidez. Cumpliendo con los objetivos, se eligió el coagulante-floculante que mostró mejores resultados en la turbidez y se procedió a analizar su optimización.

Con los resultados obtenidos en el segundo proceso experimental y su posterior análisis se concluye que el ácido láctico realiza de forma eficiente las funciones de coagulante y floculante al haber sido capaz de sedimentar flóculos de suelo grueso. A pesar de la elevada concentración de sedimentos y salinidad respecto a los 240 ml de agua de cada muestra, se consigue reducir considerablemente la turbidez del agua en los quince casos estudiados. En ningún caso se llega a conseguir agua potable al no bajar el valor de la turbidez de 20 NTU en el mejor de los casos. Sin embargo, la reducción de la turbidez de hasta el sesenta por ciento al cabo de treinta minutos respecto a su valor inicial demuestra la efectividad del ácido láctico. Se cumplió el objetivo planteado de reducir las partículas en suspensión del producto estudiado (suelo grueso).

Tras el análisis de los resultados obtenidos por el método Box-Behnken, se concluye que la cantidad de sedimentos utilizados para cada muestra es la variable más determinante en la reducción de la turbidez. La salinidad también influye directamente pero en menor medida.

Se demuestra que para reducir la turbidez en los primeros minutos de reposo, la cantidad de ácido láctico tiene que ser del valor central estudiado (1,5 gr/l), al utilizarse el valor superior (2,5 gr/l) se produce una sobredosificación de coagulante-floculante que refleja peores resultados en la reducción de la turbidez.

Pasados quince minutos de reposo, tanto la salinidad como la cantidad de ácido láctico dejan de ser significantes en los resultados de la turbidez. Se experimenta que las cantidades usadas de sedimentos son elevadas respecto a las otras variables. Unas cantidades más reducidas de sedimentos ó la utilización de sedimentos más finos, hubieran permitido obtener resultados más relevantes transcurridos treinta minutos de reposo.

## **5.2 Líneas futuras**

Tras la conclusión de que el ácido láctico se presenta como una alternativa a otros coagulantes y floculantes tradicionales, se incita la realización de trabajos y proyectos en los que este ácido pueda ejercer un papel en la reducción de otras variables no analizadas en este trabajo como el pH, olor ó color del agua.

Al igual que se hizo en el presente proyecto, se plantea la realización de otras comparaciones. Se podría comparar el ácido láctico con coagulantes y floculantes tradicionales como el sulfato de hierro y de aluminio y analizar sus resultados.

Siguiendo la misma línea de optimización, se podría realizar el mismo estudio extrapolado a embalses, piscinas, o depuradoras donde se utilicen otro tipo de coagulantes y floculantes.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- . A.Pérez, A.Tejiro, A.Moral, Revista de Másteres de Biotecnología Sanitaria y Biotecnología Ambiental, Industrial y Alimentaria. <http://www.upo.es/revistas/index> [Último acceso: 13 febrero 2015].
- . Anayco Metrología. <http://www.anayco.net> [Último acceso: 1 marzo 2015].
- . C.A.I. De Lima, A.M.S. Guapyassú, S. Pedrosa, Distribution of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon in a watershed (Río Imbe–Lagoa de Cima, RJ, Brazil), *HydroEco 2009 Proc.* (2009) 67–70.
- . Diana Marcela Murillo, Universidad Tecnológica de Pereira, Análisis de la influencia de dos materias primas coagulantes en el aluminio residual del agua tratada, publicado en 2011.
- . Ecolísima/la contaminación del agua «Web de Ecolísima» <http://ecolisima.com/la-contaminacion-del-agua/> [Último acceso: 21 enero 2015].
- . ELAI-UPM, Servicio de electrónica, automática e informática de la Universidad Politécnica de Madrid. <http://www.elai.upm.es> [Último acceso: 18 enero 2015].
- . F.J.Pérez Cruz, Universidad Politécnica de Cartagena, tema 6 capítulo3, potabilización de aguas.
- . F. Leonardo Franco, Universidad Nacional de Colombia . <http://www.virtual.unal.edu.co> [Último acceso: 11 febrero 2015].
- . G. Rytwo, A. Rettig, Y. Gonen, Organo-sepiolite particles for efficient pretreatment of organic wastewater: application to winery effluents, *Appl Clay Sci.* 51 (3) (2011) 390–394.
- . IBASA, Ingeniería Biotecnológica Ambiental Sostenible y Agrícola.
- . Instituto de Enseñanza Secundaria Recesvinto. <http://www.centros5.pntic.mec.es> [Último acceso: 3 febrero 2015].
- . Mario Andrés Urrea, Universidad Politécnica de Cartagena, tema 6 coagulación y floculación. <http://www.ocw.bib.upct.es> [Último acceso: 17 enero 2015].
- . P.M. Nacheva, L.T. Bustillos, E.R. Camperos, S.L. Armenta, L.C. Vigueros, Characterization and coagulation–flocculation treatability of Mexico City wastewater applying ferric chloride and polymers, *Water Sci Technol.* 34 (1996) 235–247.
- . Real Decreto 140/2003 del 7 febrero.

. Servyco grupo, procesos químicos en el tratamiento agua residuales <http://www.servyco.com> [Último acceso: 25 febrero 2015].

. [http://www.malvern.com/labeng/technology/images/zeta\\_potential\\_schematic.png](http://www.malvern.com/labeng/technology/images/zeta_potential_schematic.png) Malvern Technology

. T.D. Reynolds, P.A. Richards, Unit operations and processes in environmental engineering, 2nd, PWS Publ, Boston, 1995.

. Y.Andía Cárdenas, SEDAPAL, Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. <http://www.frm.utn.edu.ar> [Último acceso: 23 febrero 2015].

. [http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6019/mod\\_resource/content/1/Tema\\_06\\_COAGULACION\\_Y\\_FLOCULACION.pdf](http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6019/mod_resource/content/1/Tema_06_COAGULACION_Y_FLOCULACION.pdf) [Último acceso: 1 marzo 2015].

. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planta\\_de\\_Tratamiento.jpg?uselang=es](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planta_de_Tratamiento.jpg?uselang=es)

[Último acceso: 23 febrero 2015].

. Figura 1-4 [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planta\\_de\\_Tratamiento.jpg?uselang=es](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planta_de_Tratamiento.jpg?uselang=es)

[Último acceso: 3 marzo 2015]