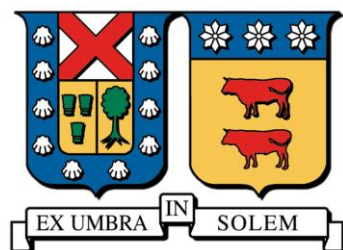


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
SANTIAGO – CHILE



**“EVALUACIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE SEDIMENTACIÓN EN DRENAJE
ÁCIDO”**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO**

DIEGO FRANCISCO AMBIADO ZORRILLA

Profesora guía

DR. PAULA GUERRA PINTO

Profesor co-referente

DR. IVÁN CORNEJO GARCÍA

Santiago, Marzo 2024

AGRADECIMIENTOS

A mi querida familia, los amo y agradezco enormemente el apoyo que me han dado durante todo mi proceso universitario, las risas durante los fines de semana, el espacio de desahogo que me brindaban y la alegría compartida cuando algo me resultaba bien.

A mis padres por la presencia y apoyo en todos mis momentos, por ser mis primeros mentores, siempre con un consejo o una palabra de ánimo, creyendo en lo que era capaz.

A mis hermanos por el apoyo en mis decisiones, las risas y cariño que me entregan día a día.

A mis abuelos que adoro, que han estado presentes toda mi vida y me regalonean en cada detalle.

A mi perro Dragoberto que me acompañó en mis noches de estudio hasta su último día.

A las amistades que formé en el camino y han sido un apoyo en lo personal como en lo académico.

A Francisco y Antonio, mis primeros amigos.

Al departamento de Ingeniería Civil Química, en especial a la profesora Paula Guerra por ser una gran guía y docente, una profesora íntegra que me aconsejó y ayudó en el camino que estoy formando.

A Jeamilette que ha sido una gran mentora y apoyo durante los últimos años, por la paciencia y cariño recibido.

A las personas con las que compartí, reí, estudié, bailé y crecí.

RESUMEN

Las operaciones asociadas a las distintas etapas que posee el proceso de obtención de cobre (extracción de materia prima, transporte, producción y tratamiento de residuos) puede generar impactos ambientales considerables en suelos, agua, flora y fauna, afectando en mayor medida a la zona norte del país debido a la ubicación geográfica que presenta este tipo de industria. Uno de los focos de contaminación más importantes en cuerpos de agua consiste en la formación de drenaje ácido, la cual se potencia aún más cuando existen residuos de rocas tratadas (tanques de relave) con compuestos sulfurados. La solución de drenaje ácido de mina (DAM) contiene bajo pH y metales pesados que pueden incrustarse en los ecosistemas, además, tiende a seguir acidificándose conforme pasa el tiempo. Existen diversas tecnologías de tratamientos de aguas para lograr eliminar el DAM en cuerpos acuosos, tanto activas como pasivas. Una de las tecnologías pasivas es la sedimentación, la cual es un proceso de separación natural que ocurre por diferencia de densidades entre las distintas fases. Este trabajo busca evaluar la sedimentación de partículas de hierro y aluminio en drenaje ácido a partir de la elaboración de 10 experimentos donde se varía el pH, la concentración y la presencia de hierro y aluminio, con el fin de analizar el tipo de sedimentación presente, describir el proceso mediante un ajuste de modelo no lineal y obtener las velocidades a las que ocurre la separación. El proceso de sedimentación es capturado en cámara para ser posteriormente analizado mediante técnicas de procesamiento de imágenes en MATLAB, realizándose un proceso de binarización que permite observar el mecanismo predominante. De los resultados obtenidos pudo analizarse la velocidad de sedimentación en 8 experimentos, debido a que en ciertas condiciones los compuestos tienden a estar mayoritariamente disueltos que como partículas sedimentables. Es posible observar que las magnitudes mayores de velocidad existen a valores más altos de pH, lo cual se justifica teóricamente ya que, en este punto los compuestos tienden a reaccionar volviéndose precipitados insolubles. Al momento en el que aumenta la concentración es posible que el mecanismo de sedimentación cambie de floculante a interferido, el cual presenta una velocidad de sedimentación menor, pero, un comportamiento uniforme en todo el medio. Se evidencia que el proceso de sedimentación con mayor velocidad corresponde al que presenta una concentración sólo de hierro a mayor pH, pero se vuelve necesario revisar más en detalle el comportamiento de las variables involucradas

ABSTRACT

The operations associated with the different stages of the copper extraction process (extraction of raw materials, transport, production, and waste treatment) can generate significant environmental impacts in the soil, water, flora, and fauna, affecting the northern region of the country to a greater extent due to the geographical location of this type of industry. One of the most significant sources of pollution in bodies of water is the formation of acid drainage, which is further intensified when there are residues of treated rocks (tailings tanks) with sulfide compounds. The acid mine drainage (AMD) solution contains low pH and heavy metals that can become embedded in ecosystems, and it tends to become more acidic over time. There are various water treatment technologies to eliminate AMD in aquatic bodies, both active and passive. One of the passive technologies is sedimentation, which is a natural separation phenomenon that occurs due to the difference in densities between the compounds in a phase. The work seeks to evaluate the sedimentation of iron and aluminum particles in acid drainage through the development of 10 experiments where the pH, concentration, and the presence of iron and aluminum are varied, in order to analyze the type of sedimentation present, describe the process through a nonlinear model fitting, and obtain the velocities at which separation occurs. The sedimentation process is captured on camera to be later analyzed using image processing techniques in MATLAB, performing a binarization process that allows for the observation of the predominant mechanism. From the results obtained, the sedimentation rate could be analyzed in 8 experiments, due to the fact that under certain conditions, the compounds tend to be more dissolved than as sedimentable particles. It is possible to observe that the greater magnitudes of speed exist at higher pH values, which is theoretically justified because, at this point, the compounds tend to react becoming insoluble complexes in water that precipitate to a greater extent. At the moment, when the concentration increases, it is possible that the sedimentation mechanism changes from flocculant to hindered, which presents a lower sedimentation rate, but a uniform behavior throughout the medium. It is evident that the sedimentation process with the highest speed corresponds to the one with an iron concentration only at higher pH, but it becomes necessary to examine the behavior of the involved variables in more detail.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
NOMENCLATURA.....	11
INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS Y ALCANCES	15
Principal:	15
Específicos:	15
Alcances:.....	15
MARCO TEÓRICO.....	16
3.1 Drenaje Ácido.....	16
3.1.1 Definición y caracterización.	16
3.1.2 Fuentes y proceso de generación de DAM.	17
3.1.3 Fuentes principales de formación.	19
3.1.4 Factores que influyen en el proceso de formación de drenaje ácido.....	19
3.1.5 Afecciones del drenaje ácido a los ecosistemas y comunidades.	20
3.1.6 Prevención, manejo y control del drenaje ácido.....	20
3.1.7 Tecnologías existentes de tratamiento y recolección de DAM.....	21
3.1.8 Estabilidad del hierro y aluminio en drenaje ácido.....	22
3.2 Sedimentación.....	26
3.2.1 Definición.....	26
3.2.2 Tipos de sedimentación y velocidad de sedimentación.....	26
3.3 Procesamiento de imágenes.....	37
3.3.1 Análisis de color.....	39
METODOLOGÍA	41
4.1 Condiciones experimentales (Aguilar, 2023).....	41
4.2 Material audiovisual	42
4.3 Equipos.....	42
4.4 Procedimiento	42

4.4.1	Selección de las columnas.....	42
4.4.2	Ajuste de las características de la imagen	44
4.4.3	Análisis del proceso de sedimentación.	45
4.4.4	Obtención de curvas de sedimentación y ajuste de modelo	46
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		52
5.1	Reconocimiento de mecanismos de sedimentación	52
5.1.1	Experimento 1 – Concentración: 25 [mg/L] Fe.	52
5.1.2	Experimento 2 – Concentración: 25 [mg/L] Fe y 25 [mg/L] Al.....	53
5.1.3	Experimento 3 – Concentración: 100 [mg/L] Fe.	54
5.1.4	Experimento 4 – Concentración: 100 [mg/L] Fe y 100 [mg/L] Al.....	55
5.1.5	Experimento 5 – Concentración: 140 [mg/L] Fe y 100 [mg/L] Al.....	56
5.2	Velocidad de sedimentación	57
5.2.1	Experimento 1 – Concentración: 25 [mg/L] Fe.	58
5.2.2	Experimento 2 – Concentración: 25 [mg/L] Fe y 25 [mg/L] Al.....	61
5.2.3	Experimento 3 – Concentración: 100 [mg/L] Fe.	64
5.2.4	Experimento 4 – Concentración: 100 [mg/L] Fe y 100 [mg/L] Al.....	67
5.2.5	Experimento 5 – Concentración: 140 [mg/L] Fe y 100 [mg/L] Al.....	69
Análisis de variables.....		72
pH.....		72
Concentración		74
CONCLUSIONES.....		76
RECOMENDACIONES		78
REFERENCIAS.....		79
ANEXOS		83
Anexo A: Código de tratamiento de imágenes para binarización en MATLAB... 83		
Anexo B: Código de velocidad de sedimentación discreta en MATLAB. 84		
Anexo C: Código de velocidad de sedimentación floculante en MATLAB. 86		
Anexo D: Valores de parámetros de modelos de velocidad de sedimentación.... 89		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Minerales secundarios comunes de hierro y aluminio que precipitan en drenaje ácido de mina (Sánchez, 2007).	24
Tabla 2: Tipos de imágenes y tipo de almacenamiento (Ramírez Alcantar, 2021). ..	38
Tabla 3: Diseño experimental (Adaptado de Memoria Carla Aguilar (Aguilar, 2023)).	41
Tabla 4: Resultados de mecanismos de sedimentación.....	57
Tabla 5: Velocidad de sedimentación Experimento 1 – pH 5.	60
Tabla 6: Velocidad de sedimentación Experimento 2 – pH 5.	63
Tabla 7: Velocidad de sedimentación Experimento 3 – pH 4.	65
Tabla 8: Velocidad de sedimentación Experimento 3 – pH 5.	67
Tabla 9: Velocidad de sedimentación Experimento 4 – pH 5.	69
Tabla 10: Velocidad de sedimentación Experimento 5 – pH 4.	71
Tabla 11: Velocidad de sedimentación Experimento 5 – pH 5.	72
Tabla 12: Parámetros de modelos de velocidad de sedimentación interferida.....	89
Tabla 13: Parámetros de modelos de velocidad de sedimentación floculante a pH 4.	89
Tabla 14: Parámetros de modelos de velocidad de sedimentación floculante a pH 5.	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Presencia de drenaje ácido en ríos del cerro San Sebastián, El Salvador (Quintanilla, 2021).	14
Figura 2: Proceso de formación de DAR (Montano et al., 2022).	16
Figura 3: Etapas de la generación del drenaje ácido (Montano et al., 2022).	19
Figura 4: Ejemplo de proceso de neutralización/hidrólisis como tratamiento activo para precipitación de metales pesados (Valdebenito & Morales, 2015).	22
Figura 5: Ejemplo de humedal anaeróbico como tratamiento pasivo de aguas con drenaje ácido (Valdebenito & Morales, 2015).	22
Figura 6: Diagrama de Pourbaix para el sistema Hierro – Agua (Perry et al., 2019).	23
Figura 7: Gráfico de especiación del hierro férrico (Sánchez, 2007).	25
Figura 8: Gráfico de especiación del aluminio (Sánchez, 2007).	25
Figura 9: Fuerzas sobre una esfera (Bosboom & Stive, 2021).	27
Figura 10: Columna de sedimentación e isoporcentaje de sedimentación para partículas floculantes (Tchobanoglous et al., 2003).	31
Figura 11: Sedimentación floculante por caída interferida (Maldonado, 2000).	33
Figura 12: Método de análisis de imágenes automatizado (Nguyen et al., 2021). ...	36
Figura 13: Espacio de color de una imagen RGB (MathWorks, 2023).	39
Figura 14: Espacio de intensidades de las componentes RGB del espacio de color (MathWorks, 2023).	40
Figura 15: Escala de intensidad en arreglo uint8 (MathWorks, 2023).	40
Figura 16: Extracto de video del Experimento 3 a pH 4.	43
Figura 17: Recorte de la columna 1 (la que se ubica a la izquierda de la Figura 3) del Experimento 3 a pH 4.	43
Figura 18: La columna A corresponde a la columna original. La columna B está tratada para realzar su brillo.	44
Figura 19: Se observa de izquierda a derecha la componente roja (R), verde (G) y azul (B) de la columna recortada.	44
Figura 20: Ajuste contraste a la columna. A) Columna sin ajuste. B) Columna con ajuste de contraste.	45
Figura 21: Imagen binaria (la imagen original no posee el marco, se agregó para denotar la dimensión de la columna).	46
Figura 22: Proceso de obtención de vector de intensidades promedio de imagen de la columna.	47

Figura 23: A) Columna original. B) Imagen segmentada en cinco regiones de iguales dimensiones.	49
Figura 24: Sedimentación con caída de flóculos en una fracción de columna.....	49
Figura 25: Representación de píxeles conectados al píxel gris en un plano 2D. La imagen de la izquierda muestra cuatro conexiones, vertical y horizontal, mientras que, la derecha muestra 8 conexiones, vertical, horizontal y diagonal (MathWorks, 2023).	50
Figura 26: A) Representa la imagen antes de realizar la apertura de área. B) Imagen tratada con la apertura de área.	50
Figura 27: Descripción del proceso de dilatación y erosión en imagen binaria (MathWorks, 2023).	51
Figura 28: A) Imagen binaria global de una columna. B) Imagen tratada de la columna.	51
Figura 29: Sedimentación del Experimento a pH 4 al instante: A) 5,3 [min]. B) 10,7 [min]. C) 16 [min]. D) 21,3 [min]. E) 26,7 [min].	52
Figura 30: Sedimentación del Experimento a pH 5 al instante: A) 5,3 [min]. B) 10,7 [min]. C) 16 [min]. D) 21,3 [min]. E) 26,7 [min].	52
Figura 31: Sedimentación del Experimento a pH 4 al instante: A) 5 [min]. B) 10 [min]. C) 15 [min]. D) 20 [min]. E) 25 [min].	53
Figura 32: Sedimentación del Experimento a pH 5 al instante: A) 2 [min]. B) 4 [min]. C) 6 [min]. D) 8 [min]. E) 10 [min].	53
Figura 33: Sedimentación del Experimento a pH 4 al instante: A) 3,7 [min]. B) 6,9 [min]. C) 10,4 [min]. D) 13,8 [min]. E) 17,3 [min].	54
Figura 34: Sedimentación del Experimento a pH 5 al instante: A) 3,7 [min]. B) 6,9 [min]. C) 10,4 [min]. D) 13,8 [min]. E) 17,3 [min].	54
Figura 35: Sedimentación del Experimento a pH 4 al instante: A) 5,3 [min]. B) 10,7 [min]. C) 16 [min]. D) 21,3 [min]. E) 26,7 [min].	55
Figura 36: Sedimentación del Experimento a pH 5 al instante: A) 4 [min]. B) 8 [min]. C) 12 [min]. D) 16 [min]. E) 20 [min].	55
Figura 37: Sedimentación del Experimento a pH 4 al instante: A) 4 [min]. B) 8 [min]. C) 12 [min]. D) 16 [min]. E) 20 [min].	56
Figura 38: Sedimentación del Experimento a pH 5 al instante: A) 4,7 [min]. B) 9,3 [min]. C) 14 [min]. D) 18,7 [min]. E) 23,3 [min].	57
Figura 39: Sedimentación del Experimento 1 – pH 4 al instante: A) 9,3 [min]. B) 18,7 [min]. C) 28 [min]. D) 37,3 [min]. E) 46,7 [min].	58
Figura 40: A) Datos ajustados Exp 1 – pH 5 columna 1. B) Datos ajustados Exp 1 – pH 5 columna 2.	59

Figura 41: A) Datos ajustados Exp 2 – pH 4 columna 1. B) Datos ajustados Exp 2 – pH 4 columna 2.	61
Figura 42: A) Datos ajustados Exp 2 – pH 5 columna 1. B) Datos ajustados Exp 2 – pH 5 columna 2.	62
Figura 43: A) Datos ajustados Exp 3 – pH 4 columna 1. B) Datos ajustados Exp 3 – pH 4 columna 2.	64
Figura 44: A) Datos ajustados Exp 3 – pH 5 columna 1. B) Datos ajustados Exp 3 – pH 5 columna 2.	66
Figura 45: Sedimentación del Experimento 4 – pH 5 al instante: A) 9,3 [min]. B) 18,7 [min]. C) 28 [min]. D) 37,3 [min]. E) 46,7 [min].	68
Figura 46: Datos ajustados del Exp 4 – pH 5 para ambas columnas.	68
Figura 47: A) Datos ajustados Exp 5 – pH 4 columna 1. B) Datos ajustados Exp 5 – pH 4 columna 2.	70
Figura 48: Datos ajustados del Exp 5 – pH 5 para ambas columnas.	71
Figura 49: Gráfica de velocidad de sedimentación vs concentración de hierro a condiciones de pH 4 y 5. En el eje X los valores marcados (*) tienen presencia de aluminio.	73

NOMENCLATURA

Variable	Definición	Unidad
A	Área de la partícula	m^2
a	Parámetro de modelo de sedimentación	m/h
b	Parámetro de modelo de sedimentación	$1/h$
C_0	Concentración inicial	kg/m^3
C	Concentración	kg/m^3
C_D	Coefficiente arrastre	
d	Diámetro	m
F_b	Fuerza de flotabilidad	N
F_d	Fuerza de gravedad	N
F_g	Fuerza de arrastre	N
F_i	Fuerza i-ésima	N
g	Aceleración de gravedad	m/s^2
H	Altura de la columna	m
h	Altura relativa	m
k	Velocidad máxima de sedimentación	m/s
μ	Viscosidad del medio	$Pa \cdot s$
n	Parámetro ajustado del modelo de Cho	m^3/kg
ρ_1	Píxel constante en la fase clarificada	<i>pixel</i>
ρ_2	Píxel constante en la fase lodosa	<i>pixel</i>
φ	Concentración	kg/m^3
Q	Suma cuadrada de valores residuales	—
q	Constante representativa de suspensión	m^3/kg
r	Radio de la partícula	m
R	Remoción	—
ρ	Densidad	kg/m^3
ρ_b	Densidad del medio	kg/m^3
ρ_g	Densidad de la partícula	kg/m^3
θ	Tiempo	s
t	Tiempo	s
V	Volumen	m^3

Variable	Definición	Unidad
v	Velocidad de sedimentación	m/s
v_0	Velocidad de sedimentación en instante 0	m/s
v_{SA}	Velocidad de asentamiento de una partícula según Stokes	m/s
w	Ancho interfacial	m
X	Concentración	kg/m^3
Z	Profundidad de columna	m

INTRODUCCIÓN

La actividad minera es la más importante en Chile ya que aporta alrededor del 15% del PIB nacional (Cardemil, 2023). De la misma manera, la producción de cobre es la mayor a nivel mundial abarcando el 28% del mercado (SERNAGEOMIN, 2018). La mayor parte de la industria minera se encuentra en la zona norte siendo, también, una de las más afectadas por las distintas consecuencias que conlleva desarrollar la actividad en el lugar (COCHILCO, 2022), principalmente la contaminación ambiental que afecta al agua, aire, suelos, flora, fauna y paisajes aledaños, lo cual, a su vez, afecta la calidad de vida de las comunidades cercanas (GRN, 2015).

La contaminación ambiental por la minería existe en las distintas etapas del proceso productivo, desde la extracción hasta el transporte del mineral procesado comerciable, como también, en los residuos que genera y su interacción con el medio ambiente. Los desechos de la minería corresponden principalmente a sólidos y líquidos, tales como los relaves, pilas de lixiviación, basura industrial, metales, entre otros (HIDRONOR, 2018), los cuales no pueden ser reutilizados en su totalidad y por ende afectan en cierta medida al lugar donde están depositados.

Una de las afecciones medioambientales provocada a causa de este sector productivo es la generación de drenaje ácido de mina (DAM), el cual corresponde a una solución ácida sulfatada con alta concentración de sólidos totales disueltos que contamina los medios receptores, esto debido a su transporte en caudales naturales de agua e infiltración hacia medios subterráneos. El drenaje ácido de roca (DAR) es generado a causa de reacciones de oxidación de rocas sulfuradas en contacto con aire y agua, este proceso ocurre de manera natural en el medioambiente, pero, al momento en el que inciden factores externos tales como la ruptura de rocas a gran escala y exposición forzada de minerales sulfurados al medio comienza a ser llamado DAM. El drenaje posee características de bajo pH y una acidez que aumenta según el paso del tiempo (ya que corresponde a ácido sulfúrico), pueden contener altas concentraciones de sólidos disueltos tales y, además, presencia de metales pesados (Montano et al., 2022).

La presencia de DAM en los ecosistemas modifica las condiciones naturales de estos alterando su estabilidad lo cual puede ser un daño perpetuo para ríos, lagos, napas y la vida que existe en ellos (se puede observar el impacto del DAM en un cuerpo acuoso en la Figura 1). Además, la presencia de metales pesados en los drenajes y ambientes acuáticos afecta a la adaptación de los organismos vivos pudiendo fijarse

en ellos y ser traspasados a otros animales, afectando la cadena alimenticia (Arismendy, 2020).

Actualmente, existen además distintas tecnologías, tanto activas como pasivas, para poder tratar el DAM tales como los humedales aeróbicos, las barreras reactivas permeables, la osmosis inversa, ultrafiltración, entre otros. Cada una de ellas posee diversas desventajas en torno a efectividad, viabilidad o costos que dificultan la remoción de este contaminante, por lo que sigue siendo un motivo de preocupación para el sector (Valdebenito & Morales, 2015).

La sedimentación corresponde a un fenómeno natural que existe en un medio líquido que presenta partículas sólidas dispersas, estas caen y se depositan en el fondo del medio por diferencia de densidad (Huisman, 2004) y, al mismo tiempo, un método pasivo de tratamiento de drenaje ácido. Existen distintos modelos que buscan caracterizar la velocidad de sedimentación para modelar el fenómeno de manera correcta, pero, esto no consideran las distintas variaciones presentes en los sistemas, como también, la convivencia que existe entre los distintos mecanismos de sedimentación. Por otro lado, el proceso ha sido monitoreado y tratado de manera automática con técnicas de procesamiento de imágenes que permiten observar de manera detallada cómo se realiza este proceso.

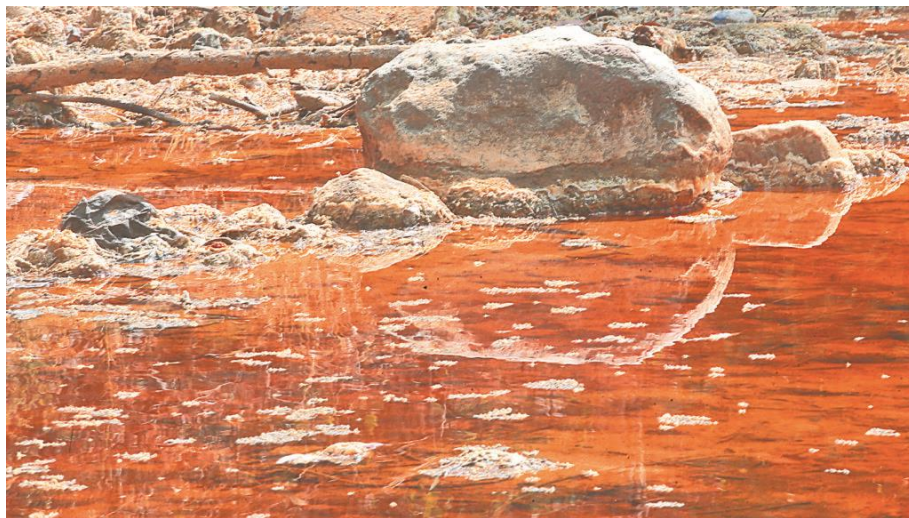


Figura 1: Presencia de drenaje ácido en ríos del cerro San Sebastián, El Salvador (Quintanilla, 2021).

OBJETIVOS Y ALCANCES

Principal:

- Evaluar la sedimentación de partículas de hierro y aluminio formadas en drenaje ácido como proceso de descontaminación, analizando los tipos de sedimentación discreta, floculante y de caída libre.

Específicos:

- Determinar los tipos de sedimentación existentes en drenaje ácido sintético e identificar el predominante.
- Analizar curvas experimentales de altura de sedimentación versus tiempo para ajustar los parámetros de modelos existentes para el tipo de sedimentación del proceso.
- Calcular y comparar las velocidades de sedimentación, determinando condiciones óptimas para la descontaminación.

Alcances:

- Este trabajo realiza su análisis en base a experimentos realizados con drenaje ácido sintético generados en laboratorio.
- La identificación de los tipos de sedimentación observados en los distintos experimentos es mediante análisis de imágenes.

MARCO TEÓRICO

3.1 Drenaje Ácido.

3.1.1 Definición y caracterización.

El drenaje ácido corresponde a una solución ácida sulfatada que es transportada en generalmente en un medio acuoso, posee una alta concentración de sólidos totales disueltos y, además, puede tener presencia de metales pesados. Esto ocurre producto de la oxidación química y biológica de los minerales sulfurados al estar expuestos al aire y agua (Valdebenito et al., 2015). La interacción de los compuestos sulfurados con el oxígeno ocurre de manera natural por lo que, en este sentido, es requerido diferenciar el drenaje ácido de roca (DAR) y el drenaje ácido de mina (DAM) (Montano et al., 2022).

La generación de DAR es un proceso natural por la interacción existente entre los minerales sulfurados expuestos en un medio favorable, esto ocurre debido a la presencia de estos compuestos en rocas presentes en ecosistemas dinámicos, dando a lugar las reacciones de oxidación químicas y biológicas por microorganismos presentes (Montano et al., 2022), el proceso de generación se observa en la Figura 2.

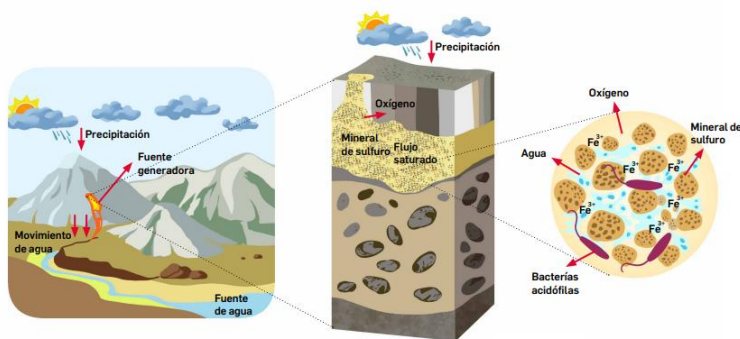


Figura 2: Proceso de formación de DAR (Montano et al., 2022).

Por otro lado, el DAM es un fenómeno antropogénico ya que nace a partir de la interacción de los minerales sulfurados con un medio, pero, ocasionada por la explotación tanto de yacimientos mineros (superficial o profunda) como por la deposición de residuos en ecosistemas, por lo que este término es utilizado para referirse a uno de los impactos ambientales asociados al proceso productivo en minería (Valdebenito et al., 2015).

Comentado [DA1]: Posibles tópicos:

Drenaje ácido en Chile

Cómo caracterizar el drenaje ácido

Factores relacionados con la dinámica del drenaje ácido

Factores que controlan la migración del DAM

Dentro de las características químicas que posee el DAM está su bajo pH (entre 1,5 – 5) el cual es creciente en el tiempo por la formación de ácido sulfúrico, una alta cantidad de sólidos totales disueltos y la presencia de alta concentración de metales pesados que a pH bajo son solubles, además, su proceso de formación es cíclico e irreversible, pudiendo afectar sistemas de manera permanente (Chaparro, 2015). Los compuestos que puede poseer el corresponden a altas concentraciones *Fe*, *Al*, *Mn*, *SO₄* y otros iones que generan la hidrólisis del agua y disminuyen su pH (Aduvire, 2006).

Por otro lado, el DAM posee características en torno a su color ya que, la presencia del ión férrico Fe^{+3} le otorga un color café rojizo, mientras que, si existe la presencia del ión ferroso Fe^{+2} se evidencia un color azul verdoso. Al momento en el que las corrientes ácidas se encuentran con corrientes no ácidas, pueden precipitar y depositarse en capas superficiales de los medios en los que circulan, afectando la calidad del agua, suelo y la vida que se desarrolla en ese medio (Montano et al., 2022).

3.1.2 Fuentes y proceso de generación de DAM.

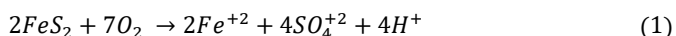
La formación de drenaje ácido ocurre principalmente por la oxidación química y biológica de minerales sulfurados (principalmente pirita, pero, pueden existir diversos compuestos sulfurados dependiendo la composición rocosa, como por ejemplo la pirrotita) en exposición de oxígeno atmosférico y agua, además, de la interacción de microorganismos cuando el pH desciende (Chaparro, 2015).

La actividad minera acelera el proceso de formación debido a que el proceso conlleva a una ruptura de las rocas, disminución del tamaño de partícula y aumento de la superficie expuesta de los compuestos sulfurados al medio ambiente (Valdebenito et al., 2015).

El proceso de oxidación de los sulfuros conlleva un aumento en la acidez y generación de compuestos ácidos, por lo que este puede ser caracterizado mediante la evolución de este incremento en el medio de deposición y se divide en tres etapas principales.

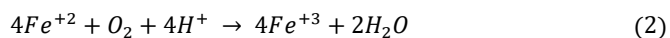
La primera etapa consta de una oxidación química de la pirita por acción del oxígeno del aire como oxidante principal, esta puede ocurrir tanto biótica como abióticamente. El oxígeno disuelto en el agua también puede oxidar el mineral, pero, debido a su baja solubilidad el principal agente oxidante corresponde al O_2 atmosférico. De esta reacción se obtiene como producto la liberación de protones y

sulfatos al medio receptor, generándose el ión ferroso, como puede evidenciarse en la ecuación 1 (Valdebenito et al., 2015):

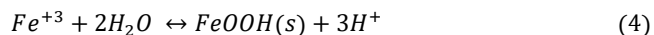
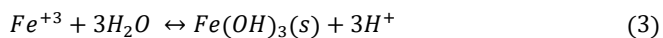


Esta reacción ocurre de manera lenta en un principio y es neutralizada debido a la presencia de compuestos alcalinos como los carbonatos, a medida que estos se agotan por la acumulación de ácidos alrededor de los compuestos aumenta la velocidad de la reacción acidez pudiendo llegar a un pH cercano a 4,5 (Valdebenito et al., 2015).

En la segunda etapa puede existir oxidación tanto química como biológica, existe una elevada concentración de hierro ferroso el cual pasa a ser el agente oxidante mayoritario, ayudando a la liberación de protones al medio, aumentando el nivel de acidez y generando hierro férrico a través de la siguiente ecuación:

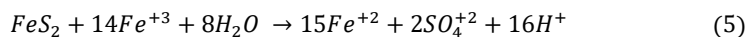


Además, existe la precipitación de cierta fracción del hierro férrico como hidróxido y oxihidróxido los cuales corresponden a compuestos insolubles que otorgan un color anaranjado-rojizo, su formación ocurre por las siguientes reacciones:



En esta etapa el pH puede descender hasta un valor de 3,5 y hasta este momento no existe una gran concentración de metales pesados disueltos en el drenaje.

Finalmente, la tercera etapa consta de una oxidación mayoritariamente biológica, esto es principalmente por la acción de la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* la cual cataliza principalmente la reacción presente en la Ecuación (2), acelerándola y aumentando la acidez. En esta etapa el agente oxidante principal comienza a ser el hierro férrico, pero, el oxígeno sigue estando presente en el medio ayudando a la liberación de protones y al aumento de la población bacteriana, según dicta la reacción 5:



Esta reacción ocurre de manera más rápida que la presente en la etapa uno y genera una mayor disminución en el pH, además, es altamente exotérmica y presenta un medio favorable para la proliferación de bacterias que continúan contribuyendo al ciclo de formación de drenaje. Por otro lado, comienza a existir en mayor medida la

oxidación de sulfuros metálicos, liberando metales que quedan disueltos tales como *Zn*, *Pb* y *Al* (Valdebenito et al., 2015).

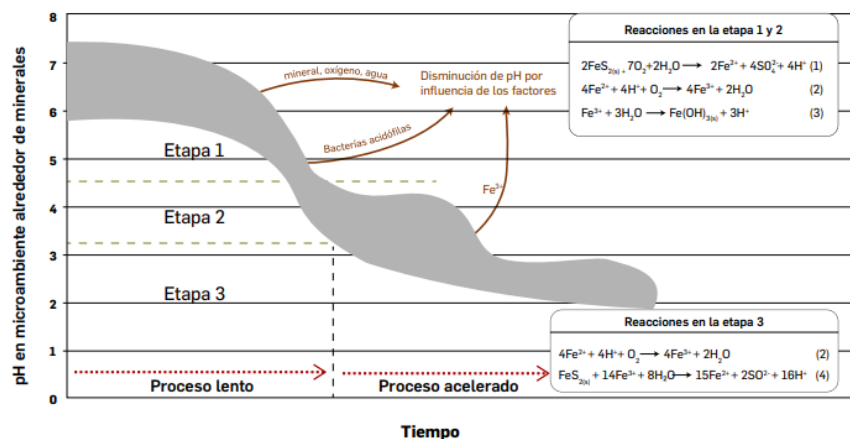


Figura 3: Etapas de la generación del drenaje ácido (Montano et al., 2022).

3.1.3 Fuentes principales de formación.

Dentro de las fuentes principales generadoras de drenaje ácido están (Valdebenito et al., 2015):

- Botaderos de material estéril.
- Botaderos de sulfuros de baja ley de cobre.
- Relaves y derrames de concentrados.
- Pilas de lixiviación.
- Minas de tajo abierto.
- Desechos de construcción de carreteras o edificación que conlleve la exposición de rocas sulfuradas.

3.1.4 Factores que influyen en el proceso de formación de drenaje ácido.

La cantidad de drenaje ácido generado y su estado puede variar en el tiempo debido a la acción neutralizadora del medio, en el caso de que exista neutralización el pH aumenta y con ello la solubilidad de los metales pesados disminuye, provocando la precipitación de estos (Aduvire, 2006).

Los parámetros principales que afectan las características del drenaje ácido en un medio corresponden a la velocidad de reacción de los sulfuros presentes, oxidación

e hidrólisis, capacidad de neutralización de los compuestos carbonatados, permeabilidad del medio, reología del medio, temperatura, tamaño de partícula de los sólidos, concentración bacteriana, concentración de los compuestos, entre otros. De esto se infiere que la generación de drenaje ácido dependerá de la composición que posea el residuo en contacto con el medio y las concentraciones que posea de compuestos oxidables y neutralizantes (Aduvire, 2006).

3.1.5 Afecciones del drenaje ácido a los ecosistemas y comunidades.

En Chile, el DAM ha acidificado los suelos, ríos y lagos de manera histórica y es un fenómeno que no cesa en la actualidad, junto con ello, la contaminación por metales pesados corresponde a una problemática severa, ya que puede llegar a comprometer la salud pública. Los sedimentos generados que contienen los metales pesados adheridos en ellos y pueden fijarse en el medio receptor modificando sus características de manera permanente (Montano et al., 2022).

La presencia de drenaje ácido puede afectar en gran medida la vegetación, la vida acuática y la vida terrestre (Hudson-Edwards et al., 2011). Una de las mayores preocupaciones existe en los metales pesados disueltos que contiene el DAM, este puede fijarse en las plantas y luego ser traspasados a otros organismos fijándose en sus tejidos y escalando en la cadena, pudiendo llegar a estar presentes en alimentos vegetales y animales (Arismendy, 2020).

Dentro de los riesgos a las comunidades aledañas existe la alteración significativa de la calidad del agua superficial o subterránea, lo cual genera una afectación en la salud de las personas por el uso (residencial, agrícola, otros) de agua contaminada como también, de las especies que puedan consumir/vivir en un medio contaminado (Valdebenito et al., 2015).

3.1.6 Prevención, manejo y control del drenaje ácido.

La prevención corresponde al reconocimiento prematuro de que un tipo de roca o mineral pueda generar drenaje ácido luego de su deposición, por lo cual su objetivo principal consiste en la caracterización del lugar geográfico, la roca y su potencial generador, como también, la predicción de la calidad del agua de drenaje. Para la caracterización es necesario reconocer el lugar geográfico comparando con información bibliográfica previa del lugar, reconocer la presencia de flora y fauna terrestre y acuática, tener noción de si el lugar fue afectado con anterioridad por drenaje ácido y cuál fue el grado y la identificación de las características de las rocas

existentes. Para predecir el tipo de drenaje se realizan modelamientos para simular las interacciones que existirían en el lugar estudiado (Valdebenito et al., 2015).

Posterior a la prevención, existe el manejo y control de DAM, esta etapa es más compleja debido a que son sistemas con numerosas interacciones entre los agentes involucrados y en cada sistema son distintos los factores que regulan la formación y estabilidad del contaminante. De lo anterior se obtiene que no existe tecnología que pueda ser aplicada de manera universal a todos los lugares que presenten este fenómeno.

Dentro del manejo y control se pueden diferenciar tres etapas: el control primario considera la interacción de la roca y el aire, el control secundario la interacción de la roca y el agua y, por último, el control terciario corresponde al control in-situ de la química del lixiviado, las técnicas de control dependerán de la etapa de desarrollo en la que se encuentre el drenaje (Valdebenito et al., 2015).

3.1.7 Tecnologías existentes de tratamiento y recolección de DAM.

Las tecnologías existentes en torno al tratamiento de drenaje pueden ser activas o pasivas, con una acción humana continua o intermitente, mediante el uso de microorganismos o aditivos, entre otros. Las tecnologías activas requieren energía externa, insumos de manera continua y mano de obra para operar, mientras que, las tecnologías pasivas no las necesitan. Ambas poseen diferencias en torno a sus costos, efectividad e impacto en el medio donde son utilizadas. Las activas incorporan un costo mayor debido a la necesidad de implementar agentes externos para la neutralización del ácido, mientras que los pasivos mejoran la calidad del agua por medio de reacciones biogeoquímicas sin el uso de reactivos sintéticos ni energía externa (Sgier et al., 2015).

Los tratamientos activos son eficientes en torno a la remoción de drenaje ácido y pueden tratar altos volúmenes, pero, considerando que esta contaminación es un fenómeno cíclico que crece en el tiempo, no pueden contener su impacto en algunas ocasiones, sobre todo cuando los proyectos terminan y abandonan el lugar (López Pamo et al., 2002). Algunas tecnologías activas utilizadas en industria corresponden a neutralización e hidrólisis, ósmosis inversa, electrocoagulación, cristalización, entre otros. El ejemplo de un tratamiento activo se presenta en la Figura 4.

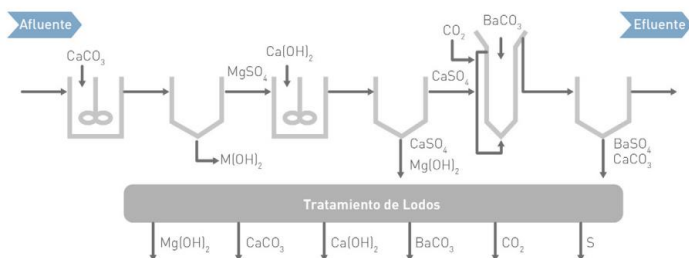


Figura 4: Ejemplo de proceso de neutralización/hidrólisis como tratamiento activo para precipitación de metales pesados (Valdebenito & Morales, 2015).

Los tratamientos pasivos, como se mencionó en un principio, no requieren una continua aplicación de reactivos y ocurren de manera natural en el lugar donde está contaminada el agua, por lo cual pueden lograr la descontaminación de los sistemas si estos presentan las condiciones adecuadas (Peters, 2008).

Algunos tipos de tratamientos pasivos corresponden a la construcción de humedales, drenaje anóxico en caliza, sistemas de flujo vertical, estanque de calizas, entre otros. Ejemplo de esto se observa a continuación en la Figura 5.

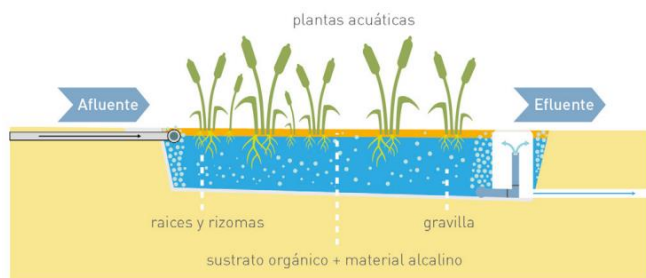


Figura 5: Ejemplo de humedal anaeróbico como tratamiento pasivo de aguas con drenaje ácido (Valdebenito & Morales, 2015).

3.1.8 Estabilidad del hierro y aluminio en drenaje ácido.

En el proceso de formación de drenaje ácido el hierro interactúa con el medio, generando un aumento de la acidez. Este proceso de formación no ocurre de una única manera y la presencia del hierro puede estar bajo distintas especies mineralógicas, es decir, existen reacciones secundarias que forman los denominados minerales secundarios (Valdebenito et al., 2015). Las características que poseen estas especies son variadas ya que, tienden a generarse en condiciones de pH distintas y

poseen valores de solubilidad diferentes según el medio en el que se encuentran (ver Figura 6). Algunos compuestos formados en estas reacciones influyen en la acidificación del medio, como las sales de sulfato de hierro y aluminio y oxihidróxidos, ya que, su síntesis tiende a consumir o generar hidrógenos disueltos (Lottermoser, 2010).

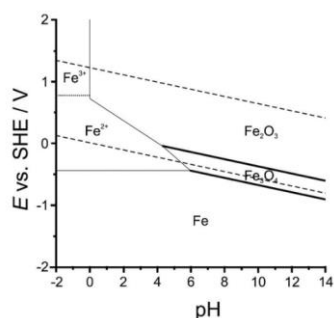


Figura 6: Diagrama de Pourbaix para el sistema Hierro – Agua (Perry et al., 2019).

Como se observa en el proceso de formación de drenaje ácido, el hierro puede estar en su estado ferroso como férrico, la presencia de ambos puede ser identificada por el color que presentan, ya que, el ión ferroso de hierro tiende a tener un color azul verdoso, mientras que, el férrico posee un color anaranjado rojizo. Las ecuaciones (3) y (4) muestran la generación de sales a partir del ión férrico presente en drenaje ácido, formando hidróxidos de hierro, los cuales generalmente precipitan dentro del medio, pero, también existen distintas fases de hierro que pueden hacerlo. La precipitación de estas sales dependerá de la tendencia que tendrá el hierro ferroso a hidrolizarse y del pH al cual se encuentre el medio (Bigham et al., 1996). Cuando existen condiciones muy ácidas ($\text{pH} < 2$) el ión férrico tiende a estar disuelto en el medio, mientras que, al aumentar el pH, este ión comienza a hidrolizarse y precipitar en distintas sales como la jarosita ($\text{pH} \sim 2$), schwermanita ($\text{pH} 2,5 - 4$) o ferrihidrita ($\text{pH} > 5$). El hierro también se encuentra en gran medida en su estado ferroso, este es más soluble que el férrico y tiende a precipitar a valores de pH mayores a 8 (Sánchez, 2007).

Respecto al aluminio, puede ser identificable en drenaje ácido debido a su color blanco lechoso dentro del medio, por otro lado, existe una menor caracterización de los compuestos que genera a un pH 4,5 – 5. En este punto, consisten en oxihidróxisulfatos e hidróxidos de aluminio, los cuales tienen una composición

intermedia entre basaluminita e hidrobasaluminita. Esta última se genera por la hidratación de la basaluminita, esta corresponde a un hidroxisulfato en los ambientes de drenaje ácido (Sánchez, 2007). El estudio del comportamiento de las especies de aluminio en presencia de óxidos férricos ha demostrado que retardan la transformación de estos últimos a sus fases más cristalinas (sales insolubles), por lo que tienden a generar que el hierro esté más estable disuelto en el medio en presencia de aluminio. Las especies minerales de hierro y aluminio que tienden a precipitar, junto al rango de pH en el cual lo realizan se encuentran tabuladas a continuación:

Tabla 1: Minerales secundarios comunes de hierro y aluminio que precipitan en drenaje ácido de mina (Sánchez, 2007).

Mineral	Fórmula	Rango de pH
Sales solubles de sulfatos de hierro		
Melanterita	$Fe^{II}SO_4 \cdot 7H_2O$	<1
Rozenita	$Fe^{II}SO_4 \cdot 4H_2O$	<1
Szomolnokita	$Fe^{II}SO_4 \cdot H_2O$	<1
Copiapita	$Fe^{II}Fe_4^{III}(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$	2 – 3
Sales solubles de sulfatos de hierro		
Comquimbita	$Fe^{III}(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	2 – 3
Romboclasa	$(H_3O)Fe^{III}(SO_4)_2 \cdot 3H_2O$	2 – 3
Halotricita	$Fe^{II}Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	2 – 3
Sales solubles de sulfatos de hierro		
Comquimbita	$Fe^{III}(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	2 – 3
Romboclasa	$(H_3O)Fe^{III}(SO_4)_2 \cdot 3H_2O$	2 – 3
Halotricita	$Fe^{II}Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	2 – 3
Hidróxidos e hidroxisulfatos de hierro		
Jarosita	$KFe_3^{III}(SO_4)_2(OH)_6$	<2
Natrojarosita	$NaFe_3^{III}(SO_4)_2(OH)_6$	<2
Hidronio jarosita	$(H_3O)Fe_3^{III}(SO_4)_2(OH)_6$	<2
Schwermanita	$Fe_8^{III}O_8SO_4(OH)_6$	2 – 4
Goetita	$\alpha - Fe^{III}O(OH)$	2,5 – 7
Ferrihidrita	$Fe_5^{III}HO_8 \cdot (OH)_6$	5 – 8

Hidróxidos e hidrosulfatos de aluminio		
Gibbsita	$\gamma - Al(OH)^3$	>4,5 – 5
Alunita	$KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$	3,5 – 5,5
Jurbanita	$Al(SO_4)(OH) \cdot 5H_2O$	<4
Basaluminita	$Al_4(SO_4)(OH)_{10} \cdot 5H_2O$	>4,5 – 5
Hidrobasaluminita	$Al_4(SO_4)(OH)_{10} \cdot 12 - 36H_2O$	>4,5 – 5

Y la existencia de los compuestos hidróxidos e hidrosulfatos se muestran en mayor detalle en la Figura 7 y Figura 8:

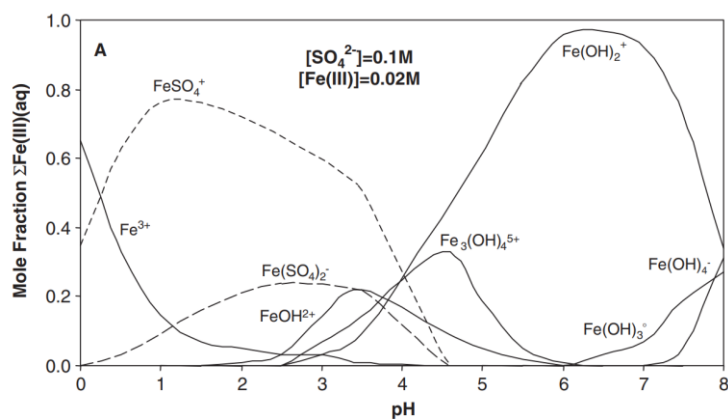


Figura 7: Gráfico de especiación del hierro férrico (Sánchez, 2007).

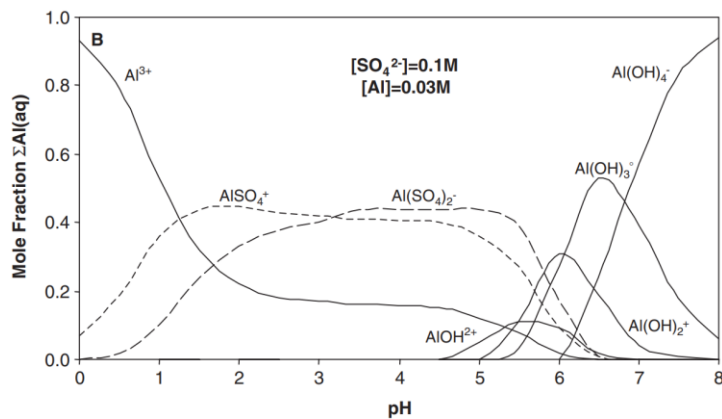


Figura 8: Gráfico de especiación del aluminio (Sánchez, 2007).

3.2 Sedimentación.

3.2.1 Definición.

La sedimentación es un proceso de separación físico que ocurre cuando partículas sólidas dispersas en una fase acuosa descienden en el medio producto de la acción de la fuerza gravitacional. La acción de separación ocurre por una baja velocidad del fluido y la diferencia de densidad que existe entre el material particulado y el fluido (Huisman, 2004). Considerando lo anterior, existen diversos tipos de partículas que pueden sedimentar en un medio, pudiendo ser de distinto tamaño y composición por lo que, la forma en la cual se realiza el proceso varía según las condiciones del sistema, concentración de partículas, interacciones entre partículas y la velocidad de sedimentación, esto quiere decir, que el proceso de la sedimentación está estrictamente ligado con las características físicas y biológicas que puede poseer el medio acuoso donde se presenta.

Dentro de los distintos tipos de tratamientos de agua, la sedimentación corresponde a un tratamiento pasivo, en donde la descontaminación ocurre de manera física en relación con las propiedades de las distintas partículas que se encuentran en un medio. El resultado de este proceso es un fluido clarificado, con una disminución mayoritaria (si es que no es total) de la concentración de material particulado y una fase concentrada en contaminantes que se denomina generalmente “lodo” (Maldonado, 2000). Este proceso puede ser afectado por factores referentes a la naturaleza de los compuestos que sedimentan a través del medio, como también, de las condiciones en las cuales se encuentra, pudiendo acelerar o interferir el proceso, algunos de estos son: el tamaño y forma de partícula, naturaleza química de las moléculas, temperatura del medio, pH del medio, turbulencia del medio, características de la geometría en la que se encuentra el medio, entre otros.

3.2.2 Tipos de sedimentación y velocidad de sedimentación.

La velocidad de sedimentación es una medida de la distancia que recorre una partícula o conjunto de ellas a través del tiempo. Este parámetro es de interés ya que, permite dimensionar cuánto es el tiempo necesario para llevar a cabo un proceso de sedimentación (Ortiz Hernandez, 2020). La sedimentación es un fenómeno que depende de la concentración el material particulado, las características físico – químicas de este y de las interacciones que posee con el medio en el que se encuentra, esto conlleva a que la velocidad de sedimentación se ve afectada dependiendo las condiciones del proceso, y que existan diferentes métodos para determinar este

parámetro según el tipo de mecanismo que ocurra en el medio (Salinas-Salas & Espinosa-Fuentes, 2012; Soulsby et al., 2013).

Existen principalmente tres tipos de sedimentación: caída libre, por floculación e interferida. Éstas se presentan de manera separada según las características que posean las partículas y la que considera floculación puede presentarse en conjunto con las demás. La caída libre ocurre en mezclas que poseen una baja concentración (menor a 500 mg/L) ya que, las partículas tienen el espacio suficiente para descender sin tener una interacción significativa con otra que coexista en el medio. Por otro lado, la sedimentación interferida ocurre cuando existe mayores concentraciones de (mayor a 500 mg/L), en este punto, las moléculas se encuentran muy cercanas entre sí y tienen mayor tendencia a formar aglomeraciones, de esta manera, sedimentan de una manera masiva y en conjunto (Oliva Uc et al., 2008).

Sedimentación de partículas discretas

Este tipo de sedimentación ocurre en medios donde existe una baja concentración de partículas, por lo que estas sedimentan de manera independiente, como si estuvieran solas en un medio infinito y las interacciones con partículas aledañas es despreciable (Letterman, 1999). En este régimen no existe cambio en las características físicas de las partículas involucradas, tales como su forma, densidad o tamaño al momento de descender durante el medio. La partícula desciende a través del medio hasta que la resistencia del fluido iguala el peso efectivo de la partícula, por ende, como las propiedades de esta no varían en el tiempo, la velocidad de sedimentación se mantiene constante (Maldonado, 2000).

Sedimentación discreta por caída libre:

Para caracterizar la velocidad de sedimentación de este tipo de sedimentación se puede tomar una partícula discreta, la cual se asume esférica, y las fuerzas que interactúan se observan en la Figura 9:

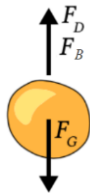


Figura 9: Fuerzas sobre una esfera (Bosboom & Stive, 2021).

Las fuerzas presentes se relacionan mediante expresión de la Ecuación (6) (Letterman, 1999):

$$F_d = F_g - F_b \quad (6)$$

En donde se observa que la fuerza de arrastre (f_d) corresponde a la resta existente entre la fuerza de gravedad (F_g) y la de flotabilidad (F_b). La fuerza de arrastre puede ser caracterizada por la Ecuación (7):

$$F_d = \frac{C_D v^2 \rho A}{2} \quad (7)$$

Donde C_D corresponde al coeficiente de arrastre, v es la velocidad de sedimentación, ρ es la densidad del líquido y A es el área proyectada de la partícula en la dirección del movimiento de ella.

Por otro lado, cuando existe velocidad constante, ambas fuerzas (flotabilidad y fuerza de gravedad) pueden describirse como se presenta en la Ecuación (8):

$$F_i = \rho_i g V \quad (8)$$

Definida por la densidad del medio para flotabilidad ρ_b y densidad del cuerpo para la fuerza de gravedad ρ_g , la aceleración de la gravedad (g) y el volumen de la partícula (V). Por ende, la diferencia de fuerzas de gravedad y flotación pueden quedar expresadas como (Ecuación (9)):

$$F_g - F_b = gV(\rho_g - \rho_b) \quad (9)$$

Ahora, uniendo las Ecuaciones (7) y (9) se obtiene:

$$\frac{C_D v^2 \rho A}{2} = gV(\rho_g - \rho_b) \quad (10)$$

Despejando la velocidad de sedimentación, queda:

$$v = \left[\frac{2gV(\rho_g - \rho_b)}{C_D \rho A} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Como se menciona anteriormente, se asume que la partícula es esfera, eso quiere decir que su área y volumen está definido como:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (12)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{1}{6} \pi d^3 \quad (13)$$

Donde d es el diámetro y r el radio de la esfera.

Por ende, reemplazando lo anterior en la Ecuación (11) se obtiene la Ecuación (14):

$$v = \left[\frac{4gd(\rho_g - \rho_b)}{3C_D\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Se debe tener presente que lo anterior considera el movimiento de una partícula en una sola dirección, horizontal y vertical, dado que en los escenarios reales existen gradientes de velocidades dados por fuerzas secundarias que actúan.

El coeficiente de arrastre incorpora la naturaleza del medio en el cual sedimenta la partícula y puede ser caracterizado a través del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (15)$$

Donde μ es la viscosidad dinámica y v es la velocidad de la partícula que sedimenta.

Existe una relación de indirecta proporcionalidad entre el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds, pero, la determinación del coeficiente depende del rango de en el que se encuentre el número de Reynolds:

- Región A: $10^{-4} < Re < 0.2$. En ésta, el régimen es laminar y el coeficiente se puede definir como:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (16)$$

Además, reemplazándolo en la Ecuación (14), se obtiene la ecuación de Stokes para condiciones de flujo laminar:

$$v = \frac{gd^2(\rho_g - \rho_b)}{4\mu} \quad (17)$$

- Región B: $0.2 < Re < 1000$. Esta considera la zona de transición, puede ser caracterizada como:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{Re^{1/2}} + 0.34 \quad (18)$$

- Región C: $1000 < Re < 2 \cdot 10^5$. En esta zona el régimen se considera turbulento y el coeficiente de arrastre se aproxima a 0.44, por lo que sustituyendo en la Ecuación (14) se tiene:

$$v = 1.74 \left[\frac{gd(\rho_g - \rho_b)}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

- Región D: $Re > 2 \cdot 10^5$. Cuando el flujo es bastante turbulento en la superficie de la partícula, disminuye de manera considerable la fuerza de arrastre y el coeficiente de arrastre llega a ser 0.1. Esta región no es favorable para el proceso por lo cual no se estudia a fondo.

Sedimentación de partículas con coalescencia o floculación

En este tipo de sedimentación las partículas tienden a aglomerarse entre ellas pudiendo flocular y/o coagular durante el proceso de sedimentación, esto debido principalmente a la interacción que existe en la colisión de partículas o acción de un agente coagulante que las desestabiliza. Lo anterior provoca que los coloides disueltos en el medio tengan cambios en sus propiedades físicas, aumentando su tamaño, forma y gravedad específica, de esta manera, como la sedimentación es un proceso de separación por diferencia de densidades, el aumento de estas propiedades genera que exista a su vez un incremento en la rapidez de sedimentación (Maldonado, 2000).

Las partículas presentes en distintos medios como, por ejemplo, los desechos líquidos, varían en naturaleza y concentración, por ende, las interacciones que se generan entre ellas también difieren y, dentro del medio donde ocurre el fenómeno. Los medios son uniformes, pero, generalmente las partículas no poseen el mismo comportamiento, pueden agregarse partículas, como también, desagregarse debido a colisiones. Este comportamiento aleatorio tiene como consecuencia que no exista tendencia lineal en el proceso de sedimentación y que sea complicado medir la velocidad de asentamiento involucrada (Shi et al., 2019).

Dadas las particularidades de cada proceso de sedimentación por las interacciones de las partículas entre ellas y el medio, se han realizado modelos teóricos utilizando supuestos para describir el comportamiento de las partículas, como también, pruebas experimentales que analizan casos específicos. Para poder estudiar la interacción que existe entre partículas, como ejemplo, se ha utilizado la ecuación de Smoluchowski que describe el movimiento de una partícula Browniana (la cual posee un movimiento aleatorio) inmersa en un potencial de interacción, lo cual considera sólo partículas agregadas de una forma circular (Yaghouti et al., 2009). Dentro de otros modelos que se han usado para describir el proceso de floculación se encuentra el “Diffusion-limited aggregation” (DLA), este considera una partícula

estacionaria en el centro del medio donde sedimenta (Witten & Sander, 1983) y la "Population Balance Equation", el cual consiste en los mecanismos de agregación y ruptura de partículas según la frecuencia de colisión (Shi et al., 2019).

Sedimentación floculante por caída libre.

Ciertas partículas tienen mayor tendencia a generar interacciones químicas entre ellas debido a su naturaleza, lo cual genera que a una baja concentración exista aglomeración de los compuestos conforme avanza el proceso de sedimentación. Para poder evaluar el proceso es preferible realizar la caracterización por medio de pruebas de laboratorio, específicamente en columnas de sedimentación (Letterman, 1999). De esta forma, es posible evaluar a distintas alturas de la columna cómo varía a través del tiempo el porcentaje de sólidos disueltos, esto permite construir las curvas de isoporcentaje de sedimentación, como la que se muestra la Figura 10:

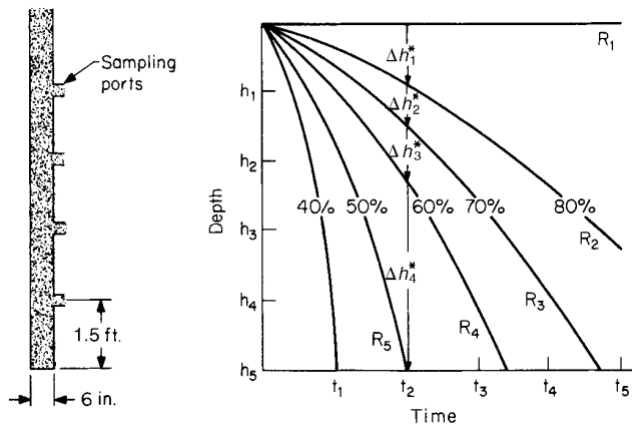


Figura 10: Columna de sedimentación e isoporcentaje de sedimentación para partículas floculantes (Tchobanoglous et al., 2003).

Ese gráfico muestra la altura de columna en dónde se encontrará cierto porcentaje de sólidos dependiendo el tiempo que lleve de sedimentación. Para poder obtener el valor de la remoción total se utiliza la siguiente expresión (Letterman, 1999):

$$\Delta R = \frac{1}{h_n} \int_0^{h_n} (R) dh \quad (20)$$

Donde h_n es la altura enésima y R corresponde a la remoción.

Otra forma de escribir esta expresión es a partir de la concentración que existe dentro del medio, en donde se considera que la velocidad de sedimentación (v_s) viene dada por:

$$v_s = \frac{h}{t} \quad (21)$$

Donde t corresponde al tiempo.

De esta manera la remoción proporcional adicional que existe es:

$$R = \frac{1}{V_s} \int_0^{C_0} (V) dC \quad (22)$$

Donde C_0 es la concentración inicial.

Finalmente, la remoción total que se presenta en la Ecuación (20) también puede ser descrita como:

$$\Delta R = (1 - C) + \frac{1}{V_s} \int_0^{C_0} (V) dC \quad (23)$$

Donde C corresponde a la concentración de material disuelto en suspensión.

Sedimentación floculante interferida.

Al momento en el que existen altas concentraciones de partículas y se reduce la distancia que tienen éstas para sedimentar libremente, según la naturaleza de las sustancias, aumenta la probabilidad de colisiones e interacciones presentes en el medio. Al igual que ocurre en partículas discretas, existe una modificación de la trayectoria de asentamiento, pero, existe una mayor probabilidad de cambios en las propiedades que poseen los flóculos debido a la agregación o ruptura de estos (Letterman, 1999). El aumento de la concentración del medio también puede provocar que exista una sedimentación masiva con gradientes de concentración por las interacciones entre flóculos a lo largo de una columna, esto genera que existan zonas claramente separadas a lo largo de ella y que sea notoria la clarificación en algunos sectores más que en otros, esto también puede ser denominado sedimentación zonal.

La teoría de sedimentación de Kynch plantea que la sedimentación está basada en una ecuación diferencial hiperbólica, en donde, a partir del dato de concentración inicial se puede obtener el perfil de sedimentación en una columna. Con esto, se

plantean las bases iniciales de la sedimentación floculante interferida, donde la velocidad de decantación es función únicamente de la concentración de las partículas (Mejías, 2015). La Figura 11 muestra cómo se observa idealmente la sedimentación cuando existe aglomeración de partículas a lo largo de una columna experimental:

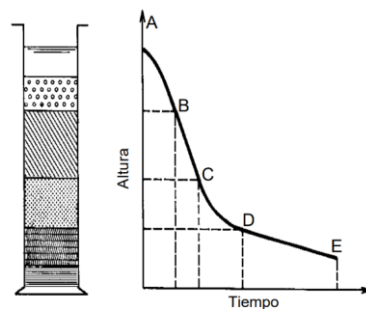


Figura 11: Sedimentación floculante por caída interferida (Maldonado, 2000).

Al principio se tiene una columna que posee una concentración uniforme, pero a medida que avanza el tiempo se pueden realizar pruebas experimentales que muestren cómo varían las zonas descritas y construir la curva que se muestra en la figura. Las distintas zonas poseen distintas características que se describen a continuación (Maldonado, 2000):

- Zona A – B: Existe una separación notoria entre las partículas y el medio clarificado, aquí existe una fase de coalescencia de flóculos junto a una zona con comportamiento discreto, generalmente no ocurre esta fase debido a la alta concentración del medio.
- Zona B – C: Al existir una pendiente rectilínea constante se puede asumir una velocidad de asentamiento constante, la cual viene dada por el tipo de floculación y concentración de partículas. Al momento en que la concentración aumenta en la fracción de columna existe una disminución de la velocidad de sedimentación.
- Zona C – D: Comienza una disminución progresiva de la velocidad de sedimentación o desaceleración del proceso.
- Zona D – E: En esta zona se genera la sedimentación por compresión, este ocurre cuando la densidad de partículas es tan alta que se tocan permanentemente entre sí, dando como resultado la formación de un manto de lodo donde las capas inferiores de partículas soportan el peso de las capas superiores. Los sólidos se comprimen por gravedad y exprimen el agua de los poros entre ellos.

Sedimentación interferida.

Al momento en que existe una mayor concentración, hay un gran número de colisiones entre las partículas dentro del medio, ocurriendo un depósito masivo de los sólidos en vez de individual. Cuando el medio se encuentra saturado, la distancia que existe entre las partículas y el área disponible de desplazamiento disminuye, provocando que estas interactúen más entre sí, es decir, el comportamiento individual de cada partícula se ve influenciado por la presencia de las otras que la acompañan o encuentran en su trayectoria. En este mecanismo la trayectoria que posee cada partícula puede ser distinto y verse modificado conforme avanza el tiempo, como también, es posible que aumenten las velocidades de flujo entre las partículas. Lo anterior se traduce en una disminución de la velocidad de sedimentación y del espacio disponible que tienen las partículas para poder descender producto un aumento de la concentración (Letterman, 1999).

Para describir la velocidad de sedimentación, se considera que puede ser descrito de manera general por una función exponencial como la que se presenta en la Ecuación (24) (Letterman, 1999):

$$v = v_0 \exp(-q\varphi) \quad (24)$$

Donde v_0 corresponde a la velocidad de sedimentación del contaminante con una concentración extrapolada a 0, q es la constante representativa de la suspensión y φ es la concentración de la sustancia presente. Esta expresión es similar a la del modelo de Cho que se presenta en un siguiente punto.

Modelos experimentales de sedimentación

Por otro lado, también se ha estudiado este tipo de sedimentación en columnas y se han determinado diversos modelos para la velocidad de sedimentación. Algunos de ellos son:

- Modelo de Cho:

Este modelo parte de la premisa que la velocidad de sedimentación en una columna era equivalente a la velocidad media en un medio poroso, por lo cual, a partir de ciertas hipótesis para la viscosidad del sedimentable en función de la concentración de sólidos, se propuso la expresión a continuación (Ecuación (25)) (Asensi-Dasí, 2015):

$$v = k \cdot \exp(-nX) \quad (25)$$

Donde k corresponde a la velocidad máxima de sedimentación, X es la concentración de sólidos dentro del medio y n es un parámetro ajustado del modelo (Sithebe, 2013).

- Modelo de Richardson and Zaki:

A partir de un análisis dimensional, los autores del modelo desarrollaron una expresión para la velocidad de sedimentación zonal y de fluidización de partículas no floculadas, como se presenta en la Ecuación (26) (Asensi-Dasí, 2015).

$$v = v_{SA} \cdot \exp(n) \quad (26)$$

Donde v_{SA} corresponde a la velocidad de asentamiento de una partícula agregada según Stokes.

Este modelo considera que las partículas en el medio poseen una geometría esférica (Alan, 1962). Además, cuando existen condiciones de $Re < 0,2$ y una relación diámetro de partícula y diámetro de columna de sedimentación pequeña, el valor de n puede ser estimado como 4,65 (Asensi-Dasí, 2015).

- Modelo de Je – Chang:

Este modelo es derivado a partir del modelo de floculación de Ozer y una ecuación de continuidad unidimensional, quedando de la siguiente manera (Ecuación (27)):

$$v = -\frac{aZ}{(b+1)\theta} \quad (27)$$

Donde Z es la profundidad de la columna de sedimentación, θ es el tiempo y a y b son parámetros del modelo (Sithebe, 2013).

Métodos experimentales de sedimentación

Los métodos automatizados permiten describir el comportamiento de la sedimentación mediante experimentos en columnas que son filmadas a través del uso de una cámara digital. El video creado es analizado a través de técnicas de procesamiento de imágenes en MATLAB, las cuales identifican la posición relativa de la interfase existente entre el lodo y la fase clarificada para observar cómo varía en función del tiempo (Nguyen et al., 2021). Tal como se describe con anterioridad en el punto 2.2.2 de este capítulo y cómo se detallará en la *Metodología y diseño experimental*, la posición puede ser descrita a través de un comportamiento exponencial mediante un análisis de regresión no lineal.

El procesamiento de la imagen consiste en procesar el video a partir de las imágenes que posee a cada segundo considerando un valor estándar de FPS o fotogramas por segundo, luego, se transforma la imagen a una escala de grises y a partir de los valores que poseen los píxeles dentro de la foto, es posible identificar la línea de interfase por el cambio drástico entre los valores existentes en la zona clarificada y la lodosa, este procedimiento se observa en la siguiente imagen:

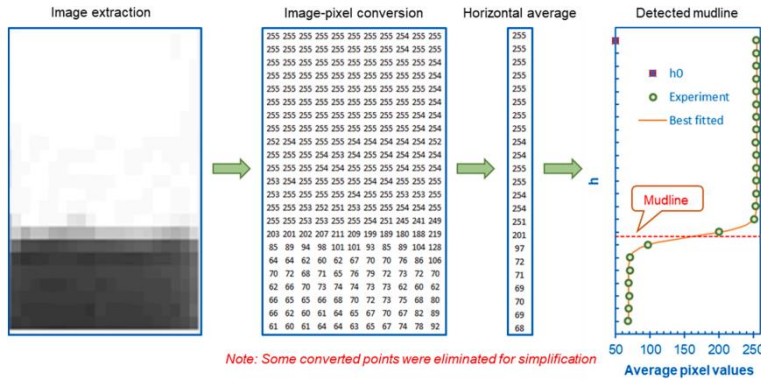


Figura 12: Método de análisis de imágenes automatizado (Nguyen et al., 2021).

Como se observa, los valores de los píxeles de la fase clarificada son mayores en magnitud que la fase con contaminante, por lo que existe un cambio drástico en la imagen en la separación de ambas fases. La línea divisora de estas fases se define como un plano matemático en donde se dividen los píxeles por igual en el límite de estas fases.

En primera instancia, los valores de los píxeles presentes en cada fila son promediados para obtener el perfil de píxel experimental denominado ρ , el cual es función de la posición de altura relativa h . La descripción del perfil experimental de píxeles viene dada por la función tangente hiperbólica que es usada usualmente para describir perfiles de densidad interfacial y la superficie divisoria de Gibbs (Ecuación (28)):

$$\rho(h) = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} + \frac{\rho_1 - \rho_2}{2} \tanh\left(\frac{h - H}{w}\right) \quad (28)$$

Donde ρ_1 corresponde a un parámetro de píxel constante en la fase clarificada, ρ_2 es un parámetro de píxel constante en la fase lodosa, w es el ancho interfacial y H es la altura relativa en la que se encuentra la línea del lodo.

Debido a la naturaleza que posee la función tangente hiperbólica se observa que, en valores extremos, es decir, cuando h tiende al infinito la función tiende a uno (positivo o negativo según corresponda) y la Ecuación (28) entrega los valores de los parámetros constantes, ya sea, en la zona clarificada o densa. Por otro lado, cuando h posee un valor igual a la altura relativa (H) la tangente hiperbólica tiene valor igual a 0 y la ecuación entrega el píxel promedio de las dos fases en equilibrio (Nguyen et al., 2021).

3.3 Procesamiento de imágenes

Se denomina procesamiento de imágenes a la capacidad de analizar imágenes y técnicas asociadas a resaltar y descubrir información contenida en ellas. Para realizar este trabajo se utilizan herramientas computacionales y lenguajes de programación que permitan examinar las características que posee cada imagen (Bustamante, 2014). Debido a la versatilidad que tiene el procesamiento y la particularidad de características que posee cada imagen o material visual, esta técnica se utiliza en diversos campos y áreas de investigación como la medicina, agricultura, automotriz, robótica, seguridad, ingeniería y más. Por otro lado, en ocasiones este proceso de análisis posee problemas de sensibilidad por interferencia factores externos, tales como, la interferencia de luz, afectando al contraste y nitidez de una imagen. Ante esto, se han implementado técnicas de inteligencia artificial para procesar imágenes, donde se destacan las redes neuronales, sistemas difusos y algoritmos evolutivos (Reyes-Ortiz et al., 2019).

Como se puede inferir, existen diversas técnicas para procesar imágenes según el objetivo que se tenga y se pueden agrupar en cuatro grandes grupos (Gómez & Guerrero, 2016):

- **Adquisición:** Corresponde a lo referente a la obtención de la imagen, formato de captura, representación que tenga (escala de grises o color) y formato de almacenamiento.
- **Realce y mejora:** También considerado pretratamiento, busca transformar la imagen para facilitar el posterior análisis. Se encuentran herramientas asociadas al cambio en contraste de la imagen, cambio en la intensidad, filtrado, etc.
- **Segmentación:** Busca fraccionar la imagen con el objetivo de clasificar las regiones por las cuales está compuesta. Estas poseen distintas características y a partir de ellas se pueden seleccionar las zonas de interés dentro de la imagen.

- Extracción de características: Consiste en el procedimiento final en donde se obtienen las propiedades e información de interés de la imagen tratada previamente.

Para los lenguajes de programación, una imagen está definida como una función bidimensional $I(x, y)$ que posee las coordenadas de los valores de intensidad, valor o nivel de gris en un determinado punto, como se muestra a continuación (Ramírez Alcantar, 2021):

$$I(x, y) = \begin{bmatrix} I(1,1) & \cdots & I(n,1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I(1,m) & \cdots & I(n,m) \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (29)$$

El formato que poseen las imágenes puede ser variado y dependerá de la forma en la que se adquiere la imagen, la cual puede ser Bits, JPG, TIFF, Gif o PNG. El formato de almacenamiento Bits corresponde a un mapa de profundidad de color, en donde cada píxel alberga hasta 24 bits (Ramírez Alcantar, 2021).

El almacenamiento de los datos que posee una imagen puede ser a partir de distintos arreglos numéricos y en distintas escalas de valores, estas son particulares para el lenguaje de programación con que se trabaje. Los arreglos pueden ser valores enteros, como también racionales, incluso pueden tener coordenadas complejas (Zaldívar et al., 2010). De manera específica, en MATLAB los cálculos numéricos son realizados considerando que son del tipo *double*, aunque, los datos que lee el lenguaje de manera automática corresponden a los de tipo *uint8*. Para imágenes binarias los datos son del tipo *logical* y permite mostrar imágenes de una manera compacta, donde los valores permitidos corresponden solamente a valores 0 (false) y 1 (true).

Tabla 2: Tipos de imágenes y tipo de almacenamiento (Ramírez Alcantar, 2021).

Tipo de Imagen	Clase de almacenamiento	Interpretación
Binaria	Lógica	Valor de 0s y 1s
Indexada	Double	Valores enteros [1 – p]
	uint8 o uint16	Valores enteros [1 – (p – 1)]
Intensidad	Double	Valores flotantes [0 – 1]
	uint8 o uint16	Valores enteros [0 – 255]
RGB	Double	Valores flotantes mxnx3 [0 – 1]
	uint8 o uint16	Valores enteros mxnx3 [0 – 255]

3.3.1 Análisis de color

Al momento de analizar el color influye la etapa de adquisición y el formato en el cual se tiene el registro de una imagen o video, dado por una cámara o un scanner, en dónde también influyen las técnicas de realce y mejora. Luego, los distintos colores observados son asignados a un rango de intensidades monocromáticas (Mejía, 2005). La primera etapa es explicada antes de entrar a este punto, pero, ayuda a entender la forma en la cual se trabajarán los datos obtenidos.

Los colores pueden ser descritos en distintos espacios de colores, tales como el Lab, HSV, YCBr y RGB, cada uno de ellos considera distintas clasificaciones para otorgar los valores correspondientes a cada color que existe dentro de una imagen. En específico, al trabajar en MATLAB las imágenes a color viven en el espacio de color RGB (ver Figura 13), este considera una matriz de $3 \times M \times N$ píxeles, donde cada coordenada presenta uno de los niveles de colores principales rojo, verde y azul (Ramírez Alcantar, 2021).



Figura 13: Espacio de color de una imagen RGB (MathWorks, 2023).

Las imágenes tratadas a color son guardadas en el formato de 24 bits con tres componentes de color (matrices) de 8 bits cada una, es decir, que se pueden representar 16 millones de colores en el espacio RGB. Para poder trabajar los datos existentes en la imagen, es necesario trabajar en una escala de grises, la cual, tiene valores escalados para representar un cierto número de intervalos, en este caso, las componentes RGB (MathWorks, 2023). El espacio que consideran estas componentes en la escala de grises se observa a continuación (Figura 14):

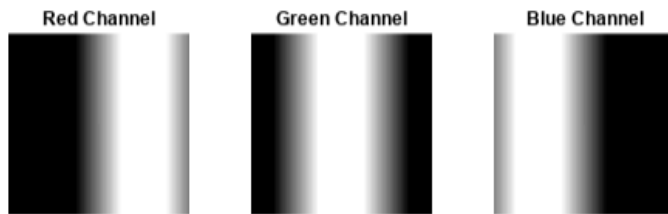


Figura 14: Espacio de intensidades de las componentes RGB del espacio de color (MathWorks, 2023).

La intensidad que presentan estos planos depende del arreglo de caracteres que se utilice, para poder realizar arreglos de contraste es necesario trabajar en el arreglo uint8, el cual entrega valores dentro del rango $[0 - 255]$, así, para cada componente, los píxeles que poseen un color más cercano al espectro que posee la matriz particular, tienen un valor cercano a 255 y los más lejanos, 0 (ver Figura 15). Por ejemplo, en la componente roja, los píxeles que pertenezcan a una zona donde predomina el color rojo tendrán un valor cercano a uno y, por ende, una intensidad mayor.



Figura 15: Escala de intensidad en arreglo uint8 (MathWorks, 2023).

METODOLOGÍA

Para el presente trabajo realizado centrado en el estudio de los procesos de sedimentación y la obtención de los valores de velocidad de sedimentación, se utilizó material audiovisual recopilado con anterioridad por Carla Aguilar (Aguilar, 2023), la cual realizó pruebas de sedimentación en columnas, filmó el proceso y realizó análisis en torno a este tópico. El material audiovisual fue trabajado utilizando técnicas de procesamiento de imágenes para describir la sedimentación de cada experimento y obtener la velocidad de sedimentación existentes en ellos, la manera en la que se realizó se presenta en esta sección en el punto 4.4 *Procedimiento*.

4.1 Condiciones experimentales (Aguilar, 2023)

Se realiza el estudio de cómo se lleva a cabo el proceso de sedimentación cuando el medio se encuentra a diferentes condiciones de pH, concentración y especies involucradas (Fe y Al). Cada experimento se realiza en duplicado, obteniéndose en total 20 experimentos, las condiciones de estos se enuncian en la siguiente tabla:

Tabla 3: Diseño experimental (Adaptado de Memoria Carla Aguilar (Aguilar, 2023)).

Experimento	Concentración [mg/L]		pH
	Fe	Al	
1	25	0	4
2	25	25	
3	100	0	
4	100	100	
5	140	100	
1	25	0	5
2	25	25	
3	100	0	
4	100	100	
5	140	100	

Para regular el pH se utilizó ácido sulfúrico, el cual contribuye a la disminución de pH y adición de sulfatos, compuesto presente en las reacciones de formación de drenaje ácido. Además, se adiciona cloruro de sodio para poder simular los sólidos disueltos totales.

Debido a que el procedimiento experimental realizado en laboratorio no se encuentra dentro de lo realizado en este trabajo, no se ahondará en ello. Se sugiere

revisar el Capítulo 5 de la memoria de Carla Aguilar el cual está referido a la Metodología experimental, este explica la manera en la cual se realizaron los experimentos, cuáles fueron los reactivos utilizados y los equipos necesarios.

4.2 Material audiovisual

Los materiales utilizados para el trabajo son las grabaciones en formato “MP4” de los experimentos especificados en el punto anterior, por ende, corresponden a 10 videos recopilados durante el estudio previo.

4.3 Equipos

Principalmente se utiliza un computador Lenovo ideapad 5 que posee las siguientes características:

- Procesador: AMD Ryzen 7 5700 U.
- Sistema operativo: Windows 10 Home Single, version 22H2.
- Ram: 8 GB.
- Almacenamiento: 1 unidad SSD 512 GB.
- Tarjeta gráfica: Tarjeta gráfica AMD integrada.

Además, se utilizó el programa MATLAB versión R2023a junto con la extensión “Image Process Toolbox” para realizar las pruebas correspondientes.

4.4 Procedimiento

Para poder obtener los resultados se desarrollaron dos procedimientos, el primero consta del análisis del proceso de sedimentación a distintas condiciones experimentales mediante técnicas de procesamiento de imágenes, mientras que, el segundo corresponde al análisis de curvas de sedimentación experimentales y obtención de velocidad de sedimentación. Previo a esto, se debe realizar un preprocesamiento de los videos e imágenes recopilados con el fin de seccionar las zonas de interés a analizar.

4.4.1 Selección de las columnas.

Los experimentos realizados junto a su respectiva réplica fueron grabados de manera simultánea, por lo que la información de ambos se encuentra dentro de un mismo material audiovisual y deben ser importados. Los experimentos se observan de la siguiente manera (Figura 16):

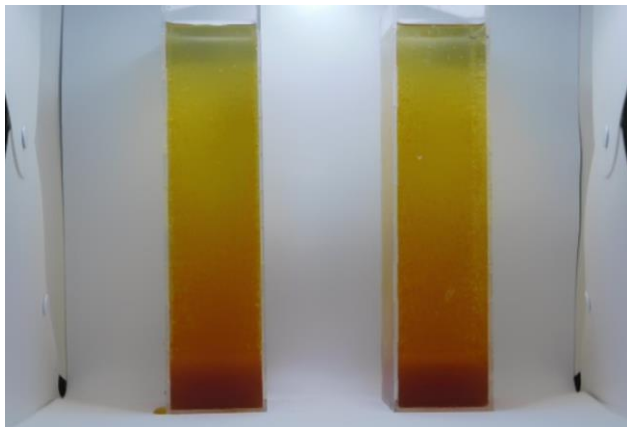


Figura 16: Extracto de video del Experimento 3 a pH 4.

Para poder captar de manera específica la sedimentación que ocurre dentro de cada columna es necesario recortar la imagen en cada instante de tiempo, las fracciones de columna deben ser iguales en dimensiones para todos los experimentos y los píxeles deben tener sólo información de color referido a la mezcla estudiada, así, pueden ser comparables en sus distintas condiciones. Luego de reiterativas pruebas y análisis de cada experimento se determina que las dimensiones de la imagen en 2D debe ser de 380 píxeles de alto y 80 de ancho, el recorte de una columna de experimento se observa en la Figura 17:



Figura 17: Recorte de la columna 1 (la que se ubica a la izquierda de la Figura 3) del Experimento 3 a pH 4.

4.4.2 Ajuste de las características de la imagen

Al momento en el cual se tienen las columnas individualmente seleccionadas se utiliza una herramienta de iluminación con el fin de realzar los colores que posee la imagen y las formas que pueden existir dentro de esta, logrando obtener un cambio significativo en el gradiente de color de cada columna (Figura 18).



Figura 18: La columna A corresponde a la columna original. La columna B está tratada para realzar su brillo.

Posterior a esta corrección, se debe obtener el comportamiento del color de la imagen en una escala de grises, con el fin de observar el rango donde existe una distribución más notoria de los colores presentes en la imagen, quedando de la siguiente manera (Figura 19):

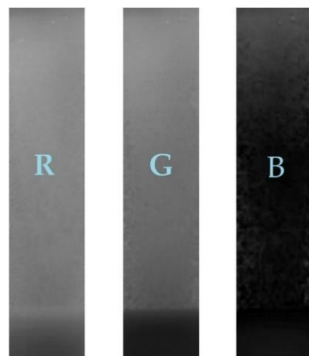


Figura 19: Se observa de izquierda a derecha la componente roja (R), verde (G) y azul (B) de la columna recortada.

Al analizar las componentes RGB de la imagen se observa que la R y G no entregan información relevante, ya que, se aprecia que no existe diferencia notoria entre los compuestos presentes en la mezcla, por ende, se selecciona la componente azul ya que vuelve más oscuros los flóculos, pudiendo diferenciarlos de mejor manera del medio en el que se encuentran. El color que contrasta al azul es el naranja, por ende, la componente azul muestra de manera más intensa (clara) los píxeles que hacen referencia a este color y de manera más opaca lo que se asemejan al naranja.

Posterior a esto, se necesita hacer un ajuste de contraste a la componente para realzar la diferencia de fases que existe en la columna. Cada ajuste de contraste es particular para los experimentos debido a los cambios que estos tienen en luminosidad y posición respecto al foco que los ilumina, se debe considerar que al momento de ajustar el contraste se puede perder información representativa de la imagen, pero, debido este es un riesgo que no afecta en gran medida ya que permite observar una mayor segmentación de las imágenes.

El ajuste de contraste se observa en la Figura 20:

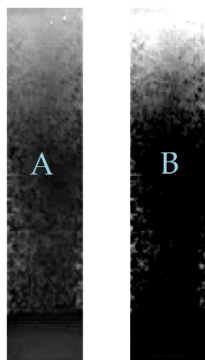


Figura 20: Ajuste contraste a la columna. A) Columna sin ajuste. B) Columna con ajuste de contraste.

4.4.3 Análisis del proceso de sedimentación.

Para poder observar de mejor manera la separación de material disuelto en el medio se realiza una binarización de la imagen (Figura 21), esto corresponde a otorgar valores de 0 o 1 a los píxeles que se encuentren en un cierto rango en la escala de grises.



Figura 21: Imagen binaria (la imagen original no posee el marco, se agregó para denotar la dimensión de la columna).

Esta imagen permite observar el comportamiento que posee un segmento concentrado de partículas y su variación en el tiempo. El proceso es llevado a cabo para cada instante del video considerando un valor de 25 FPS, lo cual significa que por segundo que transcurre en la lectura del video existen 25 fotogramas que entregan información. La binarización puede realizarse a través de dos métodos, global o adaptativo. El método global es el que se muestra en primera instancia y considera un valor escalar de luminancia para toda la imagen, mientras que, el adaptativo considera un umbral local especificado como una matriz que varía en la posición de la imagen. El método adaptativo también se realiza ya que permite observar la imagen de una manera distinta y ambas entregan información del caso de estudio.

El código utilizado en MATLAB para este procedimiento se encuentra en el punto A de la sección *Anexos*.

4.4.4 Obtención de curvas de sedimentación y ajuste de modelo

Sedimentación interferida

La obtención de las curvas de sedimentación también requiere que la imagen recortada previamente y caracterizada según componentes RGB sea binarizada de manera global, de esta manera poder identificar la línea que separa la zona clarificada de los flóculos que descenden a través de la columna. Utilizando el método automatizado que se detalla en el punto *Métodos experimentales* de la sección *Marco Teórico*, se modelan los valores de los píxeles a partir de la Ecuación (28), obteniéndose una función que entrega el valor de píxel a la cual se encuentra la interfase entre la fase lodosa y la clarificada.

Por otro lado, la manera gráfica en la cual se identifica la interfase es a partir de la determinación en el cambio de intensidades presentes en la columna, como se presenta en la Figura 22:

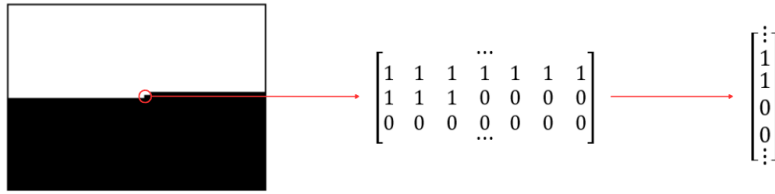


Figura 22: Proceso de obtención de vector de intensidades promedio de imagen de la columna.

Se observa un fragmento de columna donde se observa una interfase (zona oscura y zona clara), la matriz a su derecha muestra los valores de intensidad que posee un punto justo situado en la interfase. Posterior a ello, se promedian las filas existentes en la matriz obteniendo un vector de intensidades promedio, en el cual se puede identificar el píxel de altura relativa ($\rho(h_i)$) en la cual se encuentra el cambio de valores de intensidad.

Los parámetros presentes en la Ecuación (28) (ρ_1, ρ_2, H y w) son obtenidos a partir de un análisis de regresión no lineal o, también conocido como ajuste de mínimos cuadrados, esto, utilizando el método de Levenberg-Marquardt para regresión no lineal. De esta forma, ajusta los parámetros minimizando la diferencia residual entre los valores de píxeles experimentales (entregados por el vector de intensidades de la imagen) y los teóricos dado por el modelo de Gibbs (Ecuación (28)), a partir de la Ecuación (30):

$$Q = \sum_{i=1}^n [\rho(h_i) - \rho_{exp}(h_i)]^2 \quad (30)$$

Donde Q corresponde a la suma de los cuadrados residuales de los valores promedio de píxeles y h_i corresponde a la altura en la fila i -ésima.

Este procedimiento se repite para cada instante y se considera un valor representativo si es que el valor de altura (h) es positivo y menor a la altura según la dimensión de la columna.

Una vez que se tienen los valores de altura de la interfase y su cambio en el tiempo se ajustan estos a partir de un modelo no lineal para sedimentación floculante

interferida, similar al análisis que considera la Ecuación (25), pero realizando el siguiente arreglo (Ecuación (31)):

$$v_s = \frac{h}{t} \quad (31)$$

Por ende, el modelo que ajustará la curva será (Ecuación (32)):

$$h(t) = a \exp(-b t) \quad (32)$$

Donde a y b son parámetros del modelo que se ajustan según la naturaleza de los datos. En este punto se ajustan dos curvas, la primera corresponde a la aproximación de interfase estable para identificar datos anómalos y la segunda, corresponde al modelo que no considera estos datos anómalos. El valor de velocidad de sedimentación se obtiene a partir de la Ecuación (33) la cual expresa la disminución exponencial de la altura de lodo durante pruebas de sedimentación, esta corresponde a la primera derivada evaluada en el instante inicial t_0 :

$$v_s = - \left(\frac{dh}{dt} \right)_{t=t_0} = ab(\exp(-b t_0)) \quad (33)$$

El código utilizado para realizar este procedimiento se encuentra en el punto B de la sección *Anexos*.

Sedimentación floculante interferida

Se debe considerar que el tratamiento anterior es mayormente confiable en el momento que existe una sedimentación uniforme debido a que se puede evidenciar visualmente que existe una interfase clara a lo largo del experimento. Al momento en el cual este procedimiento se realiza en experimentos con una sedimentación particularmente floculante, puede existir ruido y error por parte del código en la diferenciación de la línea límite entre lodo y clarificado. Por esta razón, a partir del análisis desarrollado en base al procedimiento del punto 5.4.2 y la clasificación correspondiente del tipo de sedimentación predominante, el análisis y tratamiento de la imagen debe ser distinto para modelar el comportamiento.

Ante esto, luego de realizar el procedimiento detallado en el punto 5.4.2 e identificar el tipo de mecanismo de sedimentación predominante, si se observa que la mezcla posee un comportamiento floculante, se corta cada imagen en cinco regiones de iguales dimensiones y se ajusta el modelo para cada zona, de esta manera, se busca disminuir la variación que existirá en la línea de interfase y así poder obtener

mejores datos de altura relativa. El fraccionado de la imagen se observa a continuación (Figura 23):

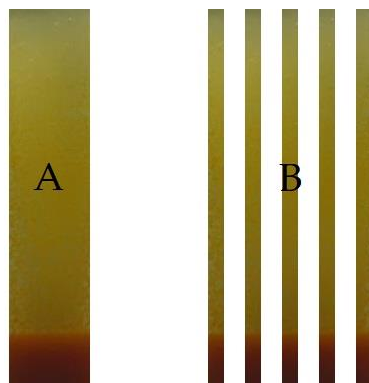


Figura 23: A) Columna original. B) Imagen segmentada en cinco regiones de iguales dimensiones.

Luego del fraccionamiento, se procede a realizar el tratamiento de la imagen para caracterizarla en escala de grises y la obtención de la imagen binaria tal como se menciona en puntos anteriores, pero, esta última debe ser tratada para eliminar el ruido existente por los flóculos disueltos que existen en la columna (ver Figura 24), estos generan que el código no logre identificar con mayor precisión la línea que divide las interfases y catalogue información errónea como altura relativa.



Figura 24: Sedimentación con caída de flóculos en una fracción de columna.

El método de tratamiento consiste en un ajuste la imagen a través de herramientas que entrega MATLAB. En primer lugar, en las zonas donde existe una mayor densidad de partículas y se identifican píxeles claros es necesario rellenar la imagen, esto se realiza a través de una operación morfológica que permite remover la información irrelevante en las imágenes. La función identifica para cada píxel presente en la imagen los píxeles que se encuentran conectados a ella y observa los valores que estos poseen, tal como se muestra en la Figura 25.

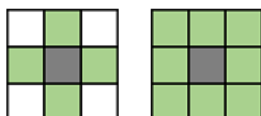


Figura 25: Representación de píxeles conectados al píxel gris en un plano 2D. La imagen de la izquierda muestra cuatro conexiones, vertical y horizontal, mientras que, la derecha muestra 8 conexiones, vertical, horizontal y diagonal (MathWorks, 2023).

Para las imágenes binarias, la función cambia los píxeles identificados como 0 a 1 deteniéndose en el momento que llega al borde de la imagen demarcada con píxeles claros, por esta razón, es necesario trabajar la imagen en su valor negativo y luego volverla a su estado original (MathWorks, 2023).

De forma posterior, en la Figura 26 se observa que existen flóculos presentes lejanos de donde existe la mayor concentración de material que sedimenta, esto se regula a través de otra herramienta morfológica denominada apertura de área, esta función elimina los componentes conectados que poseen una cantidad menor a p píxeles dentro de una imagen binaria y el análisis lo realiza identificando los píxeles conectados tal como se explica con anterioridad.

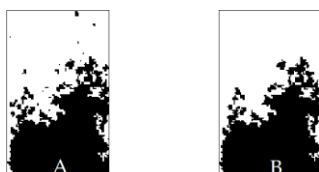


Figura 26: A) Representa la imagen antes de realizar la apertura de área. B) Imagen tratada con la apertura de área.

Finalmente, se debe realizar una nueva operación morfológica llamada cierre con el fin de suavizar las irregularidades que presenta la separación existente entre las fases, cabe destacar, que esto genera pérdida de comportamiento flocular, pero, ayuda a observar cómo se comporta la mayor concentración de partículas que descenden. La operación de cierre consiste en un proceso de dilatación primario seguido de una erosión de la imagen binaria. La dilatación consiste en otorgar el valor máximo de píxel presente en una vecindad de p píxeles, por otro lado, la erosión consiste en entregar el valor mínimo, como se muestra en la Figura 27 (MathWorks, 2023).

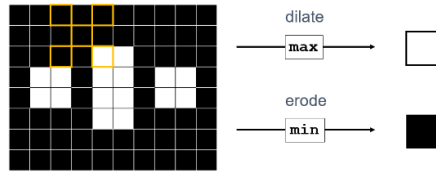


Figura 27: Descripción del proceso de dilatación y erosión en imagen binaria (MathWorks, 2023).

Luego se obtiene la imagen que será procesada para modelar el comportamiento de la sedimentación, si bien, este proceso es realizado para la imagen fraccionada, el cambio producido se observa en la Figura 28:

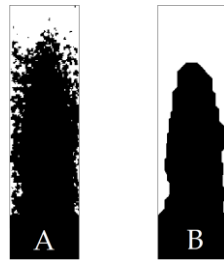


Figura 28: A) Imagen binaria global de una columna. B) Imagen tratada de la columna.

El código utilizado para realizar este procedimiento se encuentra en el punto C de la sección *Anexos*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Reconocimiento de mecanismos de sedimentación

Como se explica de manera previa, el video es fraccionado y binarizado a cada instante para describir el mecanismo de sedimentación presente durante el proceso, los tiempos elegidos para presentar los resultados varían para cada experimento debido a que el comportamiento de la sedimentación es diferente en cada caso. Los resultados para cada experimento se muestran a continuación.

5.1.1 Experimento 1 – Concentración: 25 [mg/L] Fe.

A continuación, se presentan las imágenes del experimento para pH 4 (Figura 29) y pH 5 (Figura 30) respectivamente.

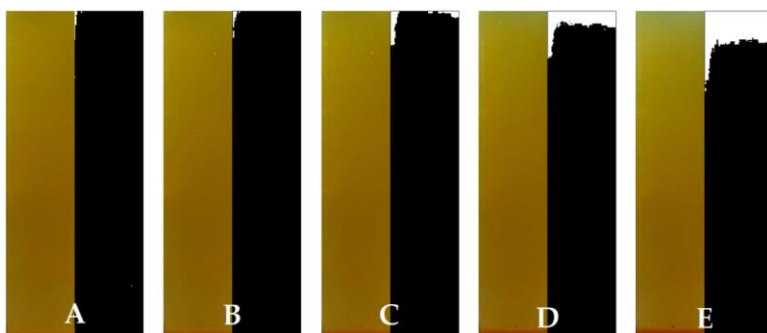


Figura 29: Sedimentación del Experimento a pH 4 al instante: A) 5,3 [min]. B) 10,7 [min]. C) 16 [min]. D) 21,3 [min]. E) 26,7 [min].

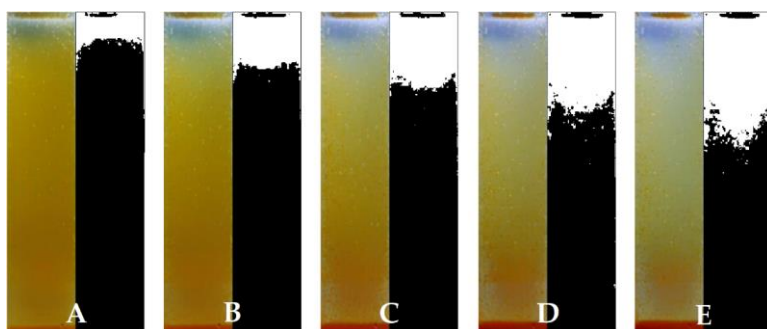


Figura 30: Sedimentación del Experimento a pH 5 al instante: A) 5,3 [min]. B) 10,7 [min]. C) 16 [min]. D) 21,3 [min]. E) 26,7 [min].

Se puede observar que en ambos no existe una línea divisora continua y distinguible entre la fase clarificada y la del lodo, por lo que las partículas no siguen un comportamiento discreto o flocular interferido, sino, poseen un comportamiento más bien floculante. Este mecanismo se vuelve más notorio cuando la concentración se encuentra a un pH 5 y se debe principalmente a que las moléculas de hierro a una baja concentración y menor pH se encuentran mayormente disueltas. Este primer análisis brinda un punto inicial para analizar posteriormente la velocidad de sedimentación que experimentan las mezclas.

5.1.2 Experimento 2 – Concentración: 25 [mg/L] Fe y 25 [mg/L] Al.

A continuación, se presentan las imágenes del experimento para pH 4 (Figura 31) y pH 5 (Figura 32) respectivamente.

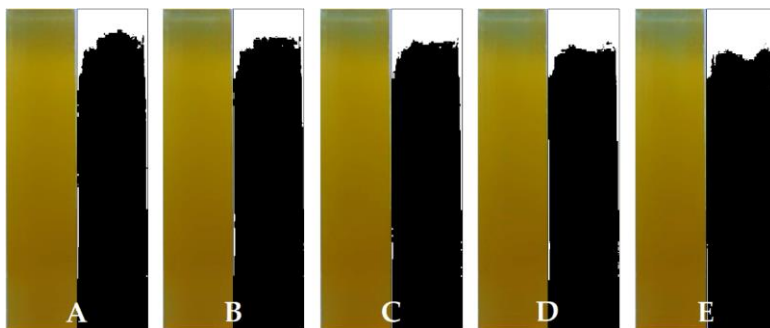


Figura 31: Sedimentación del Experimento a pH 4 al instante: A) 5 [min]. B) 10 [min]. C) 15 [min]. D) 20 [min]. E) 25 [min].

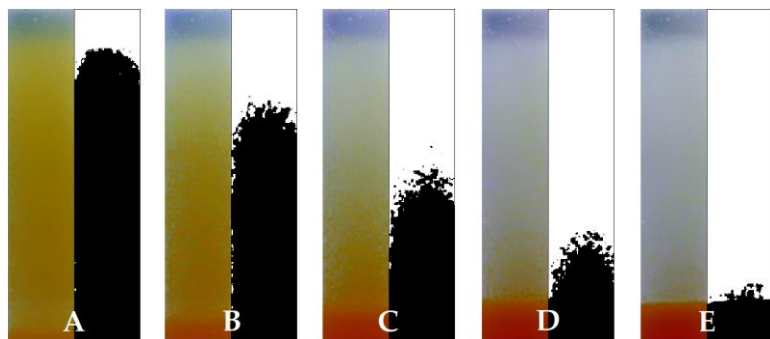


Figura 32: Sedimentación del Experimento a pH 5 al instante: A) 2 [min]. B) 4 [min]. C) 6 [min]. D) 8 [min]. E) 10 [min].

La Figura 31 muestra distintos instantes que la Figura 32, esta opción se elige debido a que los procesos de sedimentación tienen distinta duración y para efectos de observar el tipo de sedimentación, los instantes deben ser acordes a cada proceso, de esta manera, observar la existencia de flóculos. De manera similar al primer experimento, se puede observar que no existe una línea divisora continua y distinguible en altura para las dos fases existentes dentro de las mezclas, además, las partículas de aluminio también se encuentran mayormente disueltas al estar en un medio a baja concentración cuando este se encuentra a un menor pH, por ello, el comportamiento flocular se observa de manera más definida cuando la mezcla se encuentra en pH 5.

5.1.3 Experimento 3 – Concentración: 100 [mg/L] Fe.

A continuación, se presentan las imágenes del experimento para pH 4 (Figura 33) y pH 5 (Figura 34) respectivamente.

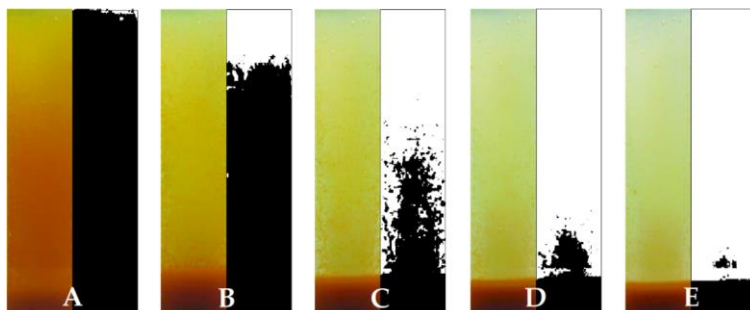


Figura 33: Sedimentación del Experimento a pH 4 al instante: A) 3,7 [min]. B) 6,9 [min]. C) 10,4 [min]. D) 13,8 [min]. E) 17,3 [min].

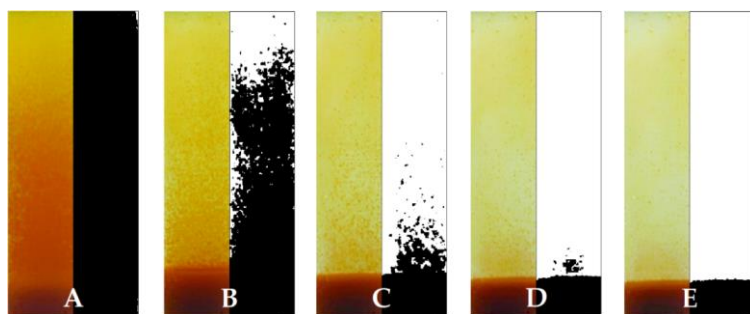


Figura 34: Sedimentación del Experimento a pH 5 al instante: A) 3,7 [min]. B) 6,9 [min]. C) 10,4 [min]. D) 13,8 [min]. E) 17,3 [min].

Se puede observar que a medida que aumenta la concentración, el comportamiento floculante se acentúa y es más notorio que el proceso no se realiza de manera discreta o interferida. La sobre – saturación del medio implica que las partículas estén más cercanas y con ello, que las interacciones entre ellas aumenten, pudiendo agregarse o romperse en medida que descienden por la columna. La trayectoria que tendrán las partículas no es lineal, por lo que pueden existir gradientes de velocidad según sean las interacciones en las distintas regiones de columna. Por otro lado, se puede observar que en la Figura 34 en las columnas B, la formación de flóculos es más notoria a pH 5, pero, esto puede analizarse de mejor manera junto a la velocidad de sedimentación.

5.1.4 Experimento 4 – Concentración: 100 [mg/L] Fe y 100 [mg/L] Al.

A continuación, se presentan las imágenes del experimento para pH 4 (Figura 35) y pH 5 (Figura 36) respectivamente.

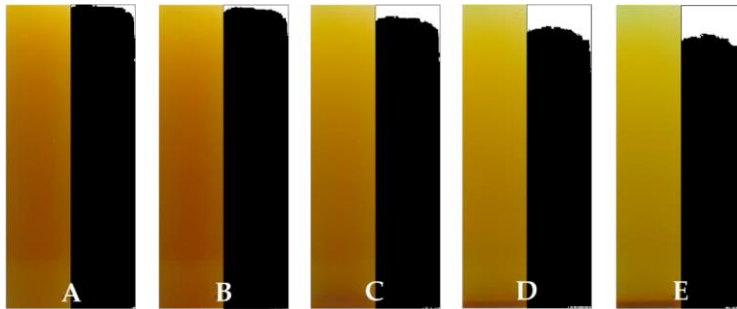


Figura 35: Sedimentación del Experimento a pH 4 al instante: A) 5,3 [min]. B) 10,7 [min]. C) 16 [min]. D) 21,3 [min]. E) 26,7 [min].

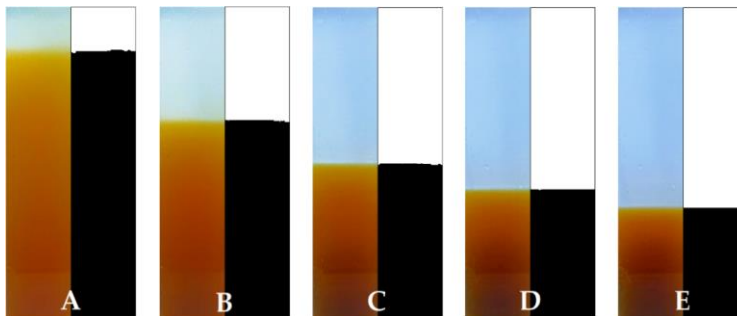


Figura 36: Sedimentación del Experimento a pH 5 al instante: A) 4 [min]. B) 8 [min]. C) 12 [min]. D) 16 [min]. E) 20 [min].

Como se observa, esta mezcla cuando se encuentra a pH 5 posee un notorio comportamiento interferido, ya que, en todo momento existe una línea divisoria constante en altura para ambas fases, en cambio, cuando la mezcla se encuentra a un menor pH el comportamiento es mayoritariamente floculante debido a la forma en la cual tienden a existir los compuestos hierro y aluminio, considerando además, que a menor pH la precipitación de compuestos insolubles de hierro y aluminio no es tan efectiva como cuando se aumenta esta variable, este fenómeno se explica de manera más detallada al analizar las velocidades de sedimentación. Además, es posible observar que a estas condiciones la formación de flóculos en el medio no es tan notoria como en otros experimentos a menor pH, por lo cual, se identifica que no existe una línea divisoria clara y continua, pero, no la formación de flóculos o aglomerados a lo largo de la columna mientras ocurre el proceso.

5.1.5 Experimento 5 – Concentración: 140 [mg/L] Fe y 100 [mg/L] Al.

A continuación, se presentan las imágenes del experimento para pH 4 (Figura 37) y pH 5 (Figura 38) respectivamente.

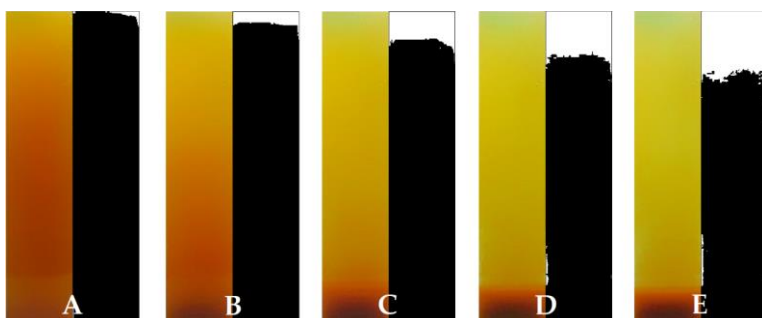


Figura 37: Sedimentación del Experimento a pH 4 al instante: A) 4 [min]. B) 8 [min]. C) 12 [min]. D) 16 [min]. E) 20 [min].

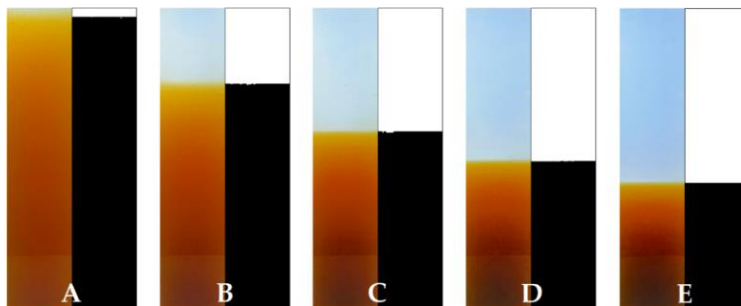


Figura 38: Sedimentación del Experimento a pH 5 al instante: A) 4,7 [min]. B) 9,3 [min]. C) 14 [min]. D) 18,7 [min]. E) 23,3 [min].

El último experimento posee un comportamiento similar que el anterior, a un mayor pH existe una clara división entre las fases, mientras que, al disminuir el pH de la mezcla se observa un mecanismo floculante.

La Tabla 4 corresponde a un resumen de los resultados obtenidos respecto al mecanismo que presentaron los 10 experimentos realizados en su sedimentación:

Tabla 4: Resultados de mecanismos de sedimentación.

Experimento	Concentración [mg/L]		Mecanismo de sedimentación	
	Fe	Al	pH 4	pH 5
1	25	0	Floculante	Floculante
2	25	25	Floculante	Floculante
3	100	0	Floculante Interferida	Floculante Interferida
4	100	100	Floculante Interferida	Interferida
5	140	100	Floculante Interferida	Interferida

5.2 Velocidad de sedimentación

El cálculo de las velocidades de sedimentación y obtención del modelo ajustado de su comportamiento se realiza dependiendo el comportamiento que presenta la sedimentación en particular, si existe un comportamiento mayoritariamente floculante se realiza la segmentación explicada en detalle en la sección *Sedimentación floculante* del punto 4.4.4 del capítulo *Metodología y Diseño Experimental*, mientras que, en el caso de los experimentos que poseen un comportamiento floculante interferido se realiza el procedimiento explicado en el segmento *Sedimentación*

Interferida y floculante interferida del mismo punto. En el segundo caso, los datos obtenidos para el experimento y su réplica se presentan en un mismo gráfico, mientras que, para los experimentos con comportamiento floculante, los resultados se presentan separados según columna. Se solicita revisar el punto D en la sección *Anexos* que posee los valores de los parámetros correspondiente a los modelos que reflejan la velocidad de sedimentación.

El análisis de velocidad de sedimentación no pudo ser realizado para todos los experimentos. Si bien, el procedimiento de binarización permitió observar el comportamiento que posee la sedimentación a distintas condiciones de concentración y pH, en algunos casos las partículas tienden a estar disueltas, por lo cual, no existe una clara diferenciación entre las fases involucradas, sino, más bien un cambio gradual y lento de concentración del medio completo. Al momento de realizar el análisis binario el programa observa en cada momento que no existe una fase que desciende por lo que la altura de sedimentación se mantiene constante en el tiempo.

Las observaciones respectivas de cada experimento se detallan a continuación, analizando el comportamiento observado incluso si no fue posible identificar el valor que posee la velocidad de sedimentación.

5.2.1 Experimento 1 – Concentración: 25 [mg/L] Fe.

Para el primer experimento analizado no fue posible obtener la velocidad de sedimentación, ya que, como se menciona anteriormente no se logra ver una separación de fases notoria sino, más bien, un cambio gradual en la concentración, como se observa en la Figura 39:

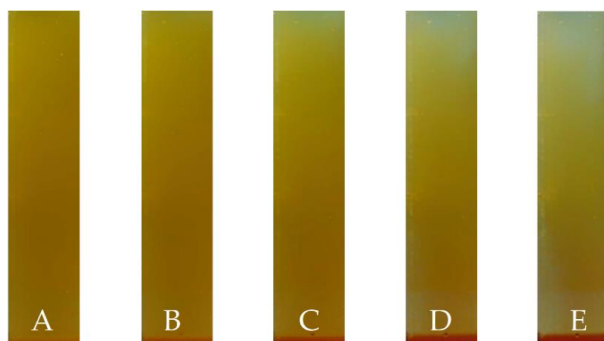


Figura 39: Sedimentación del Experimento 1 – pH 4 al instante: A) 9,3 [min]. B) 18,7 [min]. C) 28 [min]. D) 37,3 [min]. E) 46,7 [min].

Se logra identificar que el mecanismo que posee el experimento es de carácter floculante. El color de la mezcla anaranjado muestra la presencia de hierro en su estado férrico, al mismo tiempo, el hecho de que no pueda determinarse la velocidad indica que el compuesto se encuentra en formas que no precipitan con facilidad. Dadas las condiciones del sistema es esperable que el compuesto exista en sus formas sulfatadas las cuales pueden precipitar (ver Figura 39, existe deposición de material al final de la columna), pero, no de una manera tan efectiva como cuando el hierro se encuentra como oxihidróxidos ($\text{pH} > 4,5$) (Sánchez, 2007).

Al momento de procesar los datos del experimento a un mayor pH (5), identificando su comportamiento floculante y ajustarlos según la Ecuación (32) (ver punto 4.4.4 de la sección *Metodología*), se obtuvo el siguiente comportamiento de los segmentos:

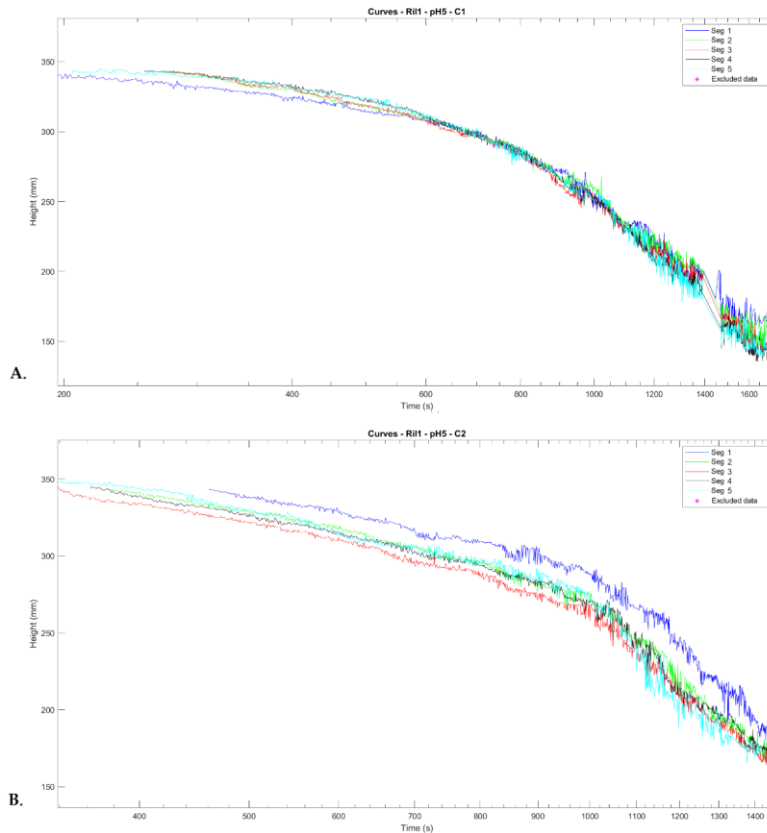


Figura 40: A) Datos ajustados Exp 1 – pH 5 columna 1. B) Datos ajustados Exp 1 – pH 5 columna 2.

En primer lugar, se observa que existen diferencias en torno a la manera en la cual sedimentan las partículas en los distintos segmentos. El comportamiento que tiene la sedimentación no es uniforme y la manera en la cual se ajustan los datos al modelo propuesto, posee ruido asociado a la interpretación binaria de la imagen a cada instante, esto puede ocurrir debido al movimiento aleatorio que poseen los flóculos dentro de un medio variando la altura de separación entre la fase más clarificada y la más concentrada, de todas formas, se observa que existe poca variación entre los valores de cada segmento. Al observar el comportamiento de la columna uno, se observa que el segmento uno tiende a sedimentar de una manera más lenta que los demás segmentos, mientras que los demás poseen un comportamiento similar. Respecto a la columna dos, se observa que hay más variabilidad entre los segmentos, siendo el segmento uno el más alejado de la tendencia.

Lo anterior es complementado a partir del cálculo de las magnitudes de velocidad de sedimentación para cada columna (ver punto 4.4.4 Obtención de curvas de sedimentación y ajuste de modelo, se explica en detalle la obtención de la velocidad de sedimentación), los cuales se encuentran tabulados a continuación:

Tabla 5: Velocidad de sedimentación Experimento 1 – pH 5.

Segmento	Velocidad de sedimentación [mm/s]	
	Columna 1	Columna 2
1	0,188	0,260
2	0,240	0,270
3	0,257	0,256
4	0,270	0,262
5	0,250	0,295

De los resultados obtenidos se observa que para los distintos segmentos delimitados el comportamiento no es el mismo, en la primera columna existe un proceso de sedimentación más rápido para el segmento cuatro, mientras que, en la réplica se observa una mayor velocidad en el segmento 5. Se obtiene un valor de velocidad de sedimentación promedio de $0,241\text{ mm/s}$ y $0,269\text{ mm/s}$ para la columna 1 y 2 respectivamente, mientras que, los porcentajes de desviación que poseen corresponden a 13% y 6% entre la columna. La desviación que existe entre las columnas corresponde a un 7%, por lo que no existe un ruido experimental significativo. El hecho de que no exista una gran variación en las velocidades en la columna y entre las columnas, indica que la floculación existente dentro de la

columna no tiende a concentrarse en una zona en particular de la columna, pero, sí existen diferencias en la sedimentación alrededor de la columna. A esta condición de pH la formación de compuestos hidrolizados de hierro se ven favorecidas debido a una menor acidez del medio (mayor presencia de OH), estos compuestos son los que tienen una mayor tendencia a precipitar, pero, como existe una baja concentración dentro de la mezcla, la formación de estas sales se ve interferida por la mayor capacidad de disolución.

5.2.2 Experimento 2 – Concentración: 25 [mg/L] Fe y 25 [mg/L] Al.

En este segundo experimento existen datos analizables para ambos valores de pH. Para el experimento a pH 4, el comportamiento de los segmentos se observa en la Figura 41:

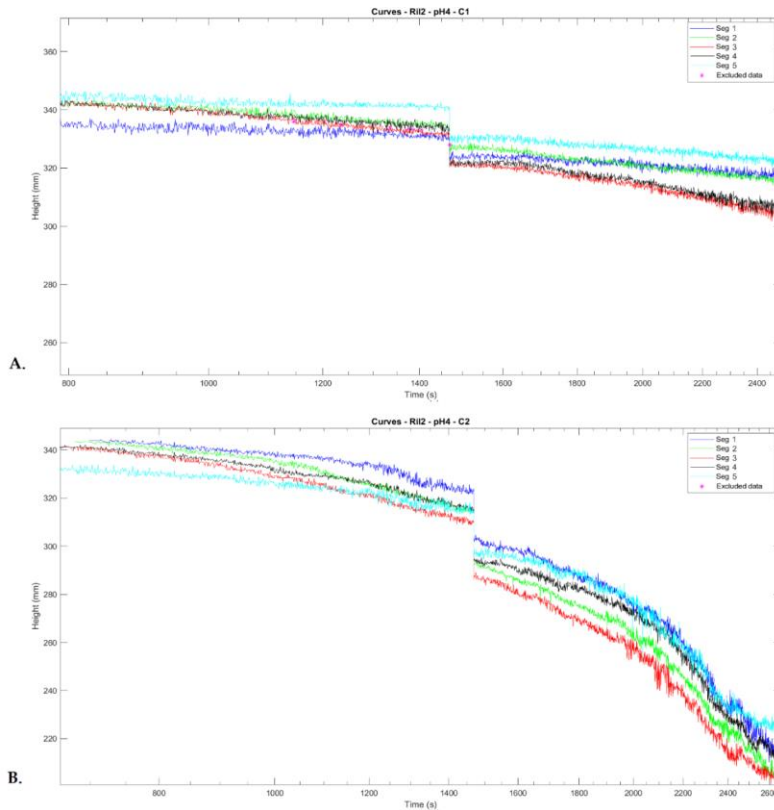


Figura 41: A) Datos ajustados Exp 2 – pH 4 columna 1. B) Datos ajustados Exp 2 – pH 4 columna 2.

Los gráficos obtenidos evidencian la variación que existe en la sedimentación en distintas zonas de la columna. Tal como ocurre en el experimento anterior, existe un ruido asociado a la interpretación binaria que posee la imagen producto del movimiento aleatorio y formación de flóculos en la zona que limita la zona clara de la más concentrada. Es posible observar también que en ambas columnas existe un salto alrededor del minuto 24, esto ocurre debido a que el material grabado del experimento se encontraba en dos videos, por lo que existe una discontinuidad en la captación del proceso impidiendo describir el comportamiento en su manera completa. Debido a que se desconoce el tiempo entre los videos ni factores externos que puedan afectar a los experimentos, se determina que los resultados no son representativos para describir el comportamiento que poseen las columnas.

Para el experimento a pH 5, el comportamiento de los segmentos se observa en la Figura 42:

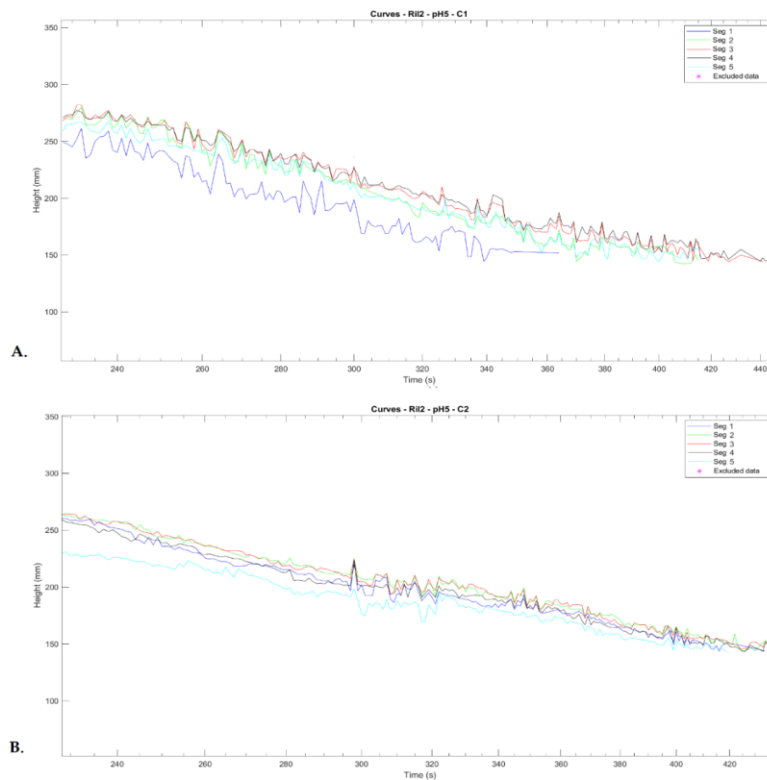


Figura 42: A) Datos ajustados Exp 2 – pH 5 columna 1. B) Datos ajustados Exp 2 – pH 5 columna 2.

El comportamiento floculante se observa a partir de la variación existente entre los segmentos. En primer lugar, existe mayor dispersión en el comportamiento que poseen los segmentos para ambas columnas respecto al experimento a menor pH. Cuando se disminuye la acidez del medio y el pH se encuentra sobre 4,5, el hierro y el aluminio comienzan a existir en la mezcla como compuestos hidrolizados, los cuales son menos solubles que los sulfatados (que predominan a pH 4), esto genera que la formación de aglomerados insolubles aparezca en mayor medida y desciendan más rápido. Para la primera columna, se observa que las partículas presentes en el segmento uno descienden de manera más rápida que en los demás segmentos, mientras que, en la columna dos el comportamiento entre segmentos es similar.

Las velocidades de sedimentación para cada columna se encuentran tabuladas a continuación:

Tabla 6: Velocidad de sedimentación Experimento 2 – pH 5.

Segmento	Velocidad de sedimentación [mm/s]	
	C1	C2
1	3,204	1,372
2	2,591	1,378
3	2,119	1,374
4	1,910	1,315
5	2,202	0,998

De igual manera que para el experimento a pH 4, existe diferencia en las velocidades de sedimentación entre segmentos. Se observa que las velocidades de sedimentación en este punto son mayores respecto al experimento anterior y, además, las velocidades existentes en la columna uno, son mayores respecto a la segunda columna, esto se evidencia en mayor medida en el segmento uno. Como se describe con anterioridad, en este punto de pH tanto el hierro como el aluminio se encuentran como compuestos hidrolizados, los cuales son menos solubles que los sulfatados mayormente presentes a pH 4. Se obtienen que las velocidades promedio corresponden a 2,405 mm/s y 1,287 mm/s para la columna uno y dos. En este caso, la desviación de las velocidades en la columna uno y dos tienen un valor de un 21% y 13%, además, entre ellas la diferencia existente corresponde a un 42%. Al igual que el experimento anterior, se puede explicar este fenómeno por error al momento de analizar los experimentos o por error asociado al modelo ajustado.

5.2.3 Experimento 3 – Concentración: 100 [mg/L] Fe.

Para el experimento a pH 4, el comportamiento de los segmentos se observa en la Figura 43:

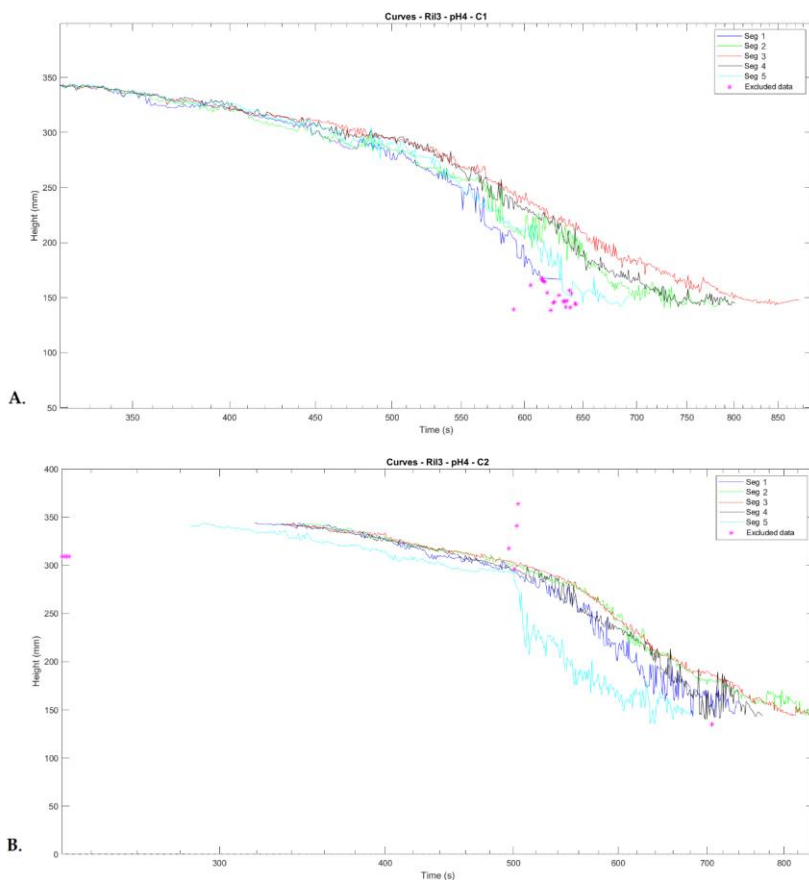


Figura 43: A) Datos ajustados Exp 3 – pH 4 columna 1. B) Datos ajustados Exp 3 – pH 4 columna 2.

Al aumentar la concentración la precipitación de los compuestos es mayor dentro del medio por la mayor interacción que existe entre los compuestos presentes, esto, también, considerando que las partículas presentan una trayectoria aleatoria, provoca que se generen mayores gradientes de velocidad dentro de la columna. En ambas columnas al principio los segmentos se comportan de manera similar, pero, conforme avanza el proceso de sedimentación se vuelve más notoria la diferencia de las regiones de la columna. Lo anterior es más observable en la columna 2 segmento

5, el cual sedimenta de manera más rápida que los anteriores. Esto puede analizarse, además, en las velocidades de sedimentación para ambas columnas se encuentran tabuladas a continuación:

Tabla 7: Velocidad de sedimentación Experimento 3 – pH 4.

Segmento	Velocidad de sedimentación [mm/s]	
	C1	C2
1	1,125	1,411
2	1,328	1,303
3	1,121	1,258
4	1,299	1,383
5	1,365	1,648

El efecto del aumento de la variable concentración también se hace notorio al analizar las magnitudes de las velocidades de sedimentación. Como se menciona con anterioridad, al existir una mayor cantidad de moléculas en el medio, hay mayor probabilidad de agregación y desagregación de partículas, esto genera turbulencia dentro de la columna contribuyendo a que más partículas y aglomerados de ellas interactúen y sedimenten con mayor rapidez. El proceso a estas condiciones no se realiza de manera lineal ya que se observa que existen diferencias en los segmentos para ambas columnas. Se obtiene un valor promedio de velocidad de $1,248\text{ mm/s}$ y $1,4\text{ mm/s}$ para la columna 1 y 2 respectivamente, además, una desviación relativa de 8% entre columnas. Entre las velocidades entre segmentos que poseen las columnas, se observa un porcentaje de desviación menor al 10%, esto indica que el comportamiento es similar entre los experimentos, por lo que no existe un error considerable asociado a la preparación experimental, y que existe una menor cantidad de ruido asociado al ajuste del modelo.

Respecto al experimento a condición de pH 5, el comportamiento de los segmentos se presenta en la Figura 44:

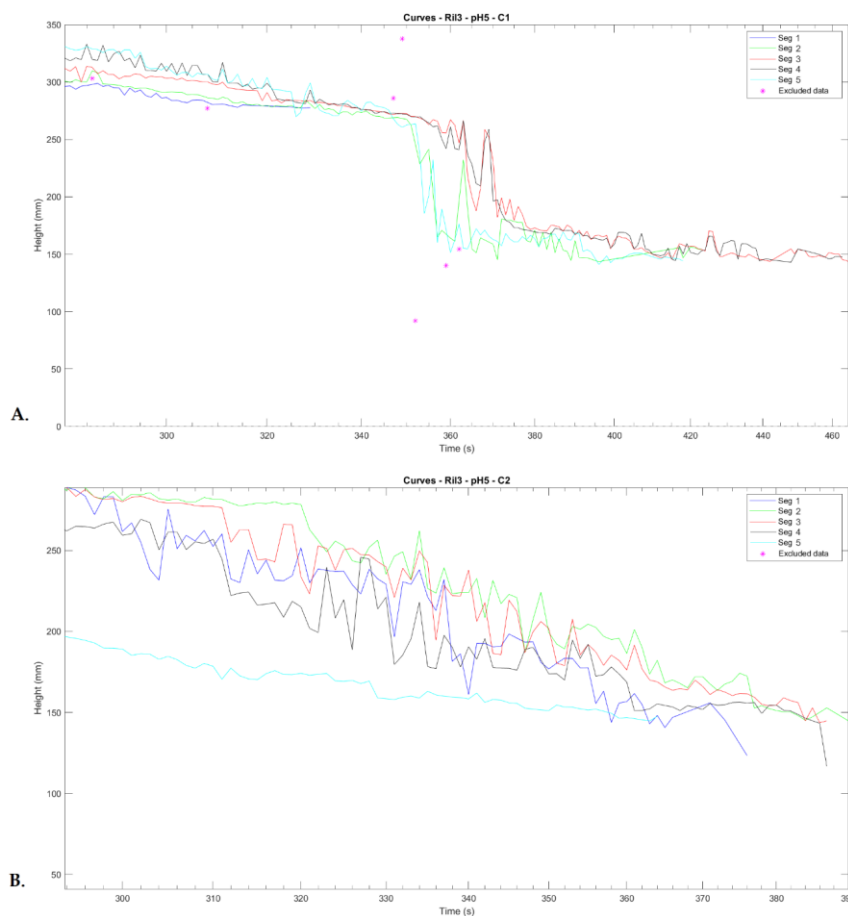


Figura 44: A) Datos ajustados Exp 3 – pH 5 columna 1. B) Datos ajustados Exp 3 – pH 5 columna 2.

En el experimento 2 se observó una diferencia entre el comportamiento de los datos en los dos puntos de pH analizados, en este caso, también existe una diferencia notoria al variar el pH a la misma condición de concentración, existiendo una mayor dispersión en el comportamiento, asociado también a la forma en la cual predomina el hierro cuando el medio es menos ácido (hidróxido). Se observa en la primera columna, las partículas presentes en el primer segmento descienden de manera más lenta ya que, la variación de la altura es menor respecto los otros segmentos, en cambio, para la columna dos, se presenta un comportamiento más lento en el segmento cinco.

Lo anterior se complementa a partir del análisis de las magnitudes de la velocidad de sedimentación, las cuales se presentan a continuación:

Tabla 8: Velocidad de sedimentación Experimento 3 – pH 5.

Segmento	Velocidad de sedimentación [mm/s]	
	C1	C2
1	0,848	21,977
2	10,791	14,153
3	7,950	14,882
4	9,712	14,820
5	19,629	3,113

Se obtiene que los valores de velocidades de sedimentación aumentan conforme se incrementa el pH, esto tiene sentido considerando que a la concentración existente en el medio se potencian aún más la precipitación del ión férrico como compuesto hidrolizado. En la columna 1 se presenta la mayor velocidad de sedimentación en el segmento 5, mientras que, en la columna 2 se presenta en el segmento 1, estos valores son los mayores obtenidos los experimentos analizados. Los valores de velocidad promedio del medio corresponden a 9,78 mm/s y 13,78 mm/s para la columna uno y dos. El porcentaje de desviación que poseen las columnas es de un 24%, por otro lado, en los segmentos de columna existe una desviación de 68% para la columna uno y 49% para la dos. La diferencia notoria que existe en las velocidades entre los segmentos de una misma columna se explica y evidencia por la formación de precipitados que descienden rápidamente por tener una mayor interacción entre partículas.

5.2.4 Experimento 4 – Concentración: 100 [mg/L] Fe y 100 [mg/L] Al.

Respecto al experimento que se encuentra a pH 4 no se pudo obtener valores de velocidad de sedimentación, esto es debido a que no se logra obtener una separación notoria entre las fases y, al igual que el primer experimento al mismo pH, se observa un cambio gradual en la coloración de la columna que se interpreta como cambio en la concentración.

El comportamiento del experimento se presenta en la Figura 45:

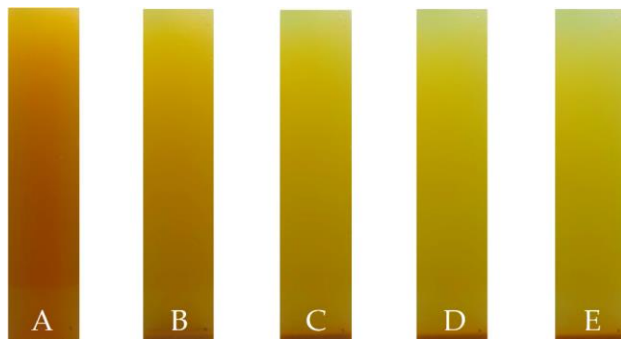


Figura 45: Sedimentación del Experimento 4 – pH 5 al instante: A) 9,3 [min]. B) 18,7 [min]. C) 28 [min]. D) 37,3 [min]. E) 46,7 [min].

Se observa que el proceso se lleva a cabo lentamente respecto a otras condiciones de sedimentación, en este caso, el aumento de concentración no potencia precipitación de los compuestos. Esto puede deberse al aluminio existente en el medio a una isoconcentración, el aluminio a este valor de pH tiende a estar ionizado o de manera sulfatada y la precipitación de este es generalmente a un $\text{pH} > 4,5$, por lo que la mezcla tiende a estar más ionizada dificultando el proceso (Sánchez, 2007). Por otra parte, tal como se explica en el primer experimento a pH 4, el hierro tiende a precipitar en su forma hidrolizada y de la misma forma lo realiza el aluminio.

Sin embargo, ocurre un fenómeno totalmente distinto al aumentar el pH de una mezcla de igual concentración, como se observa en la Figura 46:

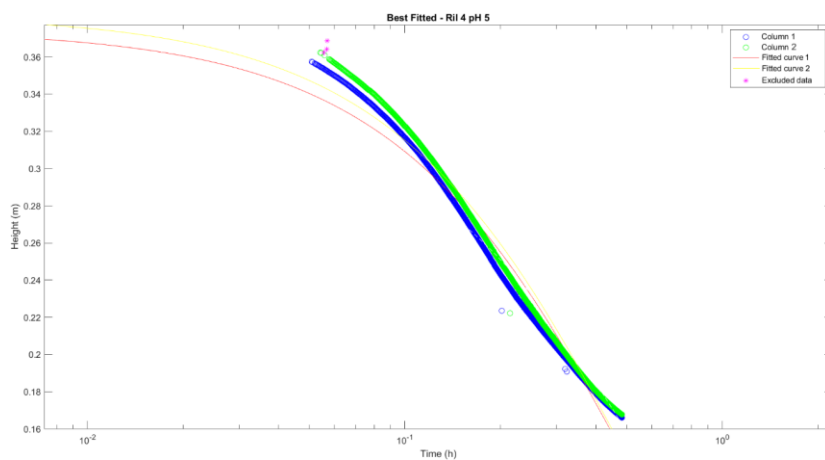


Figura 46: Datos ajustados del Exp 4 – pH 5 para ambas columnas.

Dado el análisis del primer punto de la sección, se determina que el comportamiento de la mezcla al sedimentar es interferido, por lo que no se realiza un análisis de segmentos. Al existir una sedimentación interferida, existe una clara distinción entre ambas fases, lo que genera que el método de binarización interprete correctamente la variación de altura existente durante el proceso, esto se evidencia en la gráfica ya que en ambas columnas el comportamiento es suave. En la siguiente tabla se presentan las velocidades de sedimentación para cada columna:

Tabla 9: Velocidad de sedimentación Experimento 4 – pH 5.

Segmento	Velocidad de sedimentación [mm/s]	
	C1	C2
1	0,200	0,207

Cuando se aumenta la concentración en una mezcla las interacciones entre partículas se vuelven mayores y la velocidad de asentamiento también se ve influenciada por este proceso, el aumento de pH aumenta la probabilidad de que existan partículas insolubles de hierro y aluminio, las cuales pueden aglomerarse en mayor medida reduciendo el espacio libre que tienen estas para descender a través del medio, lo cual se traduce en una menor velocidad de sedimentación. La velocidad promedio que existe es de 0,204 mm/s y la desviación que poseen los valores es del 2%, por lo que se observa una estabilidad frente a la forma en la cual sedimenta la mezcla a estas condiciones.

5.2.5 Experimento 5 – Concentración: 140 [mg/L] Fe y 100 [mg/L] Al.

Respecto al experimento a condición de pH 5, el comportamiento de los segmentos se presenta en la Figura 47:

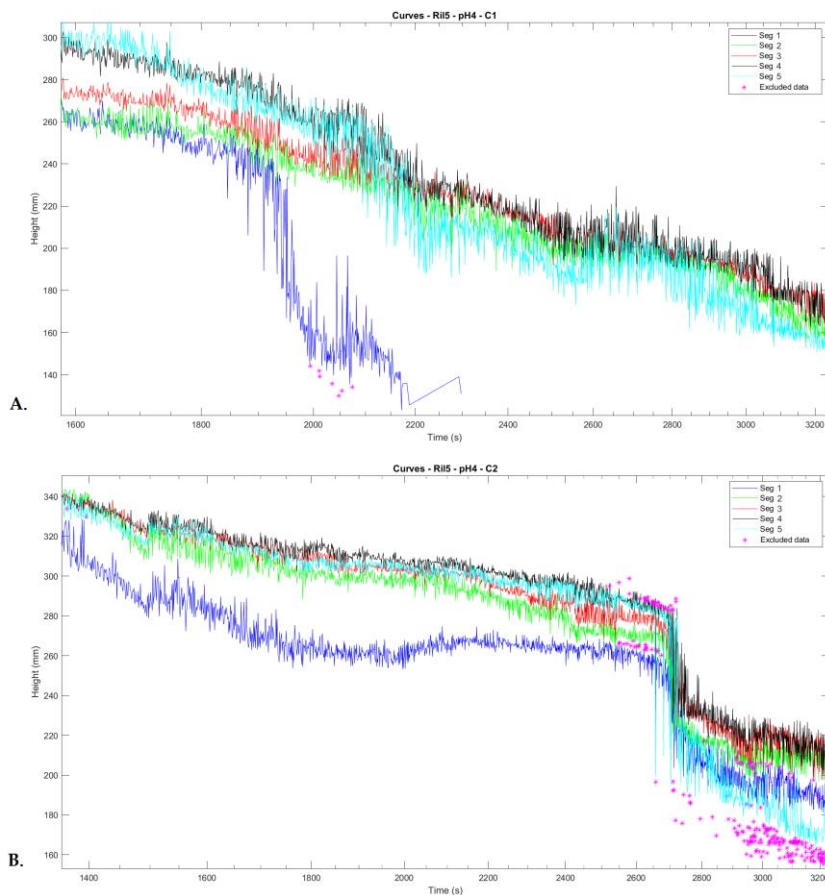


Figura 47: A) Datos ajustados Exp 5 – pH 4 columna 1. B) Datos ajustados Exp 5 – pH 4 columna 2.

Del primer análisis se obtiene que, a pesar de un aumento de concentración en el medio, debido al pH que se encuentra la solución el comportamiento es mayoritariamente floculante. Al analizar los segmentos se observa una gran variación en las alturas de sedimentación conforme se realizaba la sedimentación. En la primera columna, las partículas del primer segmento descienden en menor tiempo respecto a los demás segmentos, mientras que, en la columna dos a pesar de que al inicio el segmento uno se diferencia, la tendencia que sigue es similar a los demás.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las magnitudes de la velocidad de sedimentación:

Tabla 10: Velocidad de sedimentación Experimento 5 – pH 4.

Segmento	Velocidad de sedimentación [mm/s]	
	C1	C2
1	0,463	0,081
2	0,145	0,125
3	0,141	0,116
4	0,161	0,110
5	0,193	0,141

Se observa un incremento de las velocidades de sedimentación respecto a experimentos con menor concentración de mezcla, esto tiene sentido debido al aumento de las interacciones presentes entre partículas, de igual manera, la sedimentación ocurre de manera más lenta debido a la presencia de aluminio. Las magnitudes mayores para la velocidad de sedimentación se observan en el segmento 1 y 5 para las columnas 1 y 2 respectivamente. Las velocidades promedio de las columnas son $0,221 \text{ mm/s}$ y $0,114 \text{ mm/s}$ para la columna uno y dos. El porcentaje de desviación que existe entre las columnas tiene un valor de 45%, mientras que, entre segmentos existe un porcentaje de desviación de 62% para la columna uno y 19% para la columna dos. Comparando los resultados en magnitud, se observa que la columna uno presenta velocidades mayores, por lo que puede existir un error asociado al procedimiento experimental de laboratorio. Los datos obtenidos para el experimento a pH 5 se presenta en la Figura 48:

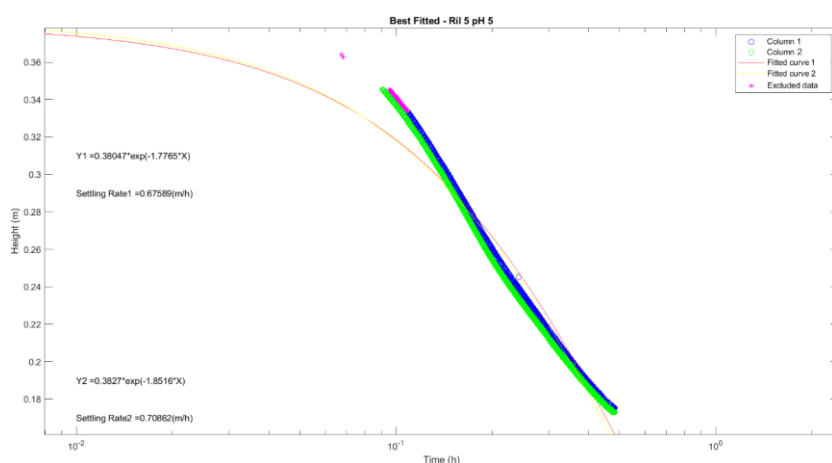


Figura 48: Datos ajustados del Exp 5 – pH 5 para ambas columnas.

Al igual que el experimento anterior, en este punto de pH y al existir aún mayor concentración de partículas en el medio, la sedimentación es interferida. Se presenta poco ruido en los datos y estos tienen un comportamiento suave. Además, se puede analizar la velocidad de sedimentación que se presenta a continuación:

Tabla 11: Velocidad de sedimentación Experimento 5 – pH 5.

Segmento	Velocidad de sedimentación [mm/s]	
	C1	C2
1	0,188	0,197

Pese a tener el mismo comportamiento se observa que la sedimentación ocurre a una tasa menor que el experimento 4 y puede ser explicado por el aumento de la concentración cuando se tiene este mecanismo de sedimentación, punto que se abordará en mayor detalle a continuación.

El valor de sedimentación promedio corresponde a $0,192 \text{ mm/s}$ y la dispersión de los datos es de un 3%, por lo cual, las condiciones que ambas columnas son similares y los datos se ajustan de buena manera al modelo.

Análisis de variables

pH

Los resultados que se obtienen concuerdan con la teoría debido a la solubilidad que presenta el hierro y el aluminio en los dos valores de pH. En los experimentos existe mayoritariamente el hierro en su estado férrico (Fe^{+3}), esto puede notarse debido al color naranja característico del metal. A valores menores de pH (los trabajados en la experiencia), este compuesto tiende a existir en especies sulfatados las cuales pueden precipitar, pero, son más solubles que las especies hidrolizadas de hierro que existen cuando aumenta el pH.

Respecto al aluminio, este se encontraría generalmente ionizado y en complejos sulfatados en pH 4, los cuales, no tienden a sedimentar en gran medida, sino, más bien permanecen disueltos. Al igual que el hierro, el aluminio sedimenta de manera efectiva al encontrarse hidrolizado. La Figura 49 compara la magnitud de las velocidades de sedimentación de los experimentos a los distintos valores de pH.

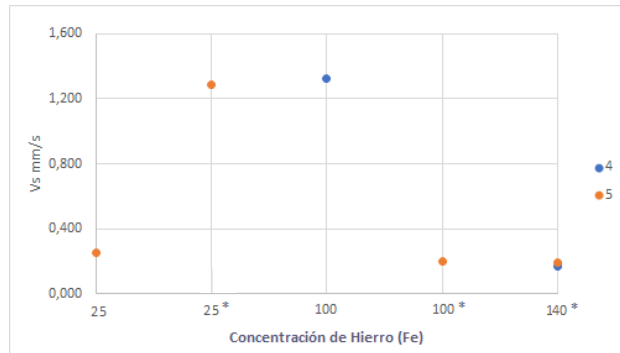


Figura 49: Gráfica de velocidad de sedimentación vs concentración de hierro a condiciones de pH 4 y 5. En el eje X los valores marcados (*) tienen presencia de aluminio.

En la gráfica se observa que las magnitudes de la velocidad de sedimentación promedio son mayores cuando se tiene un mayor pH, no se incorpora el dato del Experimento 3 a pH 5 debido a que presenta un valor mucho mayor a los demás experimentos impidiendo su lectura adecuada. Este fenómeno concuerda con la teoría, al disminuir la acidez del medio se favorecen las reacciones de oxidación metálica formando los compuestos oxihidróxisulfatos e hidróxidos de aluminio y hierro, los cuales son menos solubles en agua y sedimentan de manera más rápida.

Por otra parte, al momento de ajustar los datos al modelo mediante la obtención de estos mediante una binarización, se observa que a menor pH el ruido que tienen los datos es menor que a pH 5. Esto también puede ser concordante con la forma en la cual se encuentran los compuestos, ya que, si a mayor pH el hierro y aluminio tienden a conformar especies insolubles, estas generarían interferencia en la identificación de la interfase al aglomerarse y descender rápidamente.

Esta variación de comportamiento respecto al pH es mayormente identificable en soluciones con comportamiento floculante, ya que, las moléculas tienen mayor espacio libre para poder sedimentar y generar interacciones. Sin embargo, se observa que los experimentos con comportamiento interferido, es decir, en el 4 y 5, se tienen los menores valores de velocidad del pH 5, es más, en el último experimento la velocidad es mayor al menos en un 10%, este efecto se explicará en mayor detalle en el próximo punto.

Concentración

De las gráficas presentadas con anterioridad para cada experimento y los valores de velocidad de sedimentación, se observa que una mayor concentración favorece la velocidad de sedimentación en mayor medida cuando las mezclas poseen un comportamiento floculante a un pH mayor. A estas condiciones, el aumento de la cantidad de partículas dentro de un medio causa mayor probabilidad de interacciones pudiendo aglomerarse a lo largo de la columna, provocando que sedimenten en mayor cantidad y en conjunto por su baja solubilidad, esto, a su vez, implica movimiento a través del medio y con ello, también, mayor interacción entre las partículas.

A un valor de pH 4 la velocidad de sedimentación también aumenta conforme la concentración, pero, no de manera tan notoria como a pH 5, se genera un pequeño aumento debido a que la variable concentración favorece en mayor medida al hierro que está presente en vez del aluminio, el cual sigue siendo bastante soluble como ión.

Por otro lado, cuando existe un mecanismo de sedimentación floculante interferido se observa que el aumento de la concentración del medio involucra una disminución de la velocidad, lo cual, también es acorde al comportamiento esperado. Cuando el medio se ve mayormente saturado, las interacciones de las partículas son mucho mayores y la trayectoria se ve fuertemente influenciada por estas, teniendo un comportamiento aleatorio, a su vez, existe una disminución del espacio libre que poseen las partículas para descender por lo que realizan el proceso con mayor dificultad. La presencia de una gran cantidad de partículas dentro de un medio provoca que las partículas se comporten como un lodo confinado y que la sedimentación de los compuestos presentes sea en conjunto.

Por último, para analizar el comportamiento de la sedimentación cuando existe hierro en comparación a cuando existe una mezcla de hierro y aluminio se tienen los siguientes pares de experimentos:

- Experimentos 1 y 2 a pH 4 – 5.
- Experimentos 3 y 4 a pH 4 – 5.

Para el primer par de experimentos se observa que a pH 4 tanto para el experimento 1 (sólo con presencia de hierro a 25 mg/L) como para el experimento 2 (25 mg/L de hierro y aluminio) no fue posible estimar valores de velocidad de sedimentación a este nivel de pH. El hecho de que no haya podido recopilarse información en el

experimento 1 viene más bien influenciado por la concentración que posee el medio más allá de la presencia o no de aluminio en el medio. Por otro lado, el segundo experimento no puede ser analizado debido a que existe una pérdida de información del proceso de sedimentación al estar filmado en dos videos distintos.

Por otro lado, al observar las velocidades a pH 5, se observa que la velocidad promedio del medio llega a ser 5 veces mayor para cuando existe una mezcla de hierro y aluminio. Este fenómeno se ve influenciado por el pH de la mezcla, como se explica con anterioridad, a mayor pH es más probable que exista la precipitación de los compuestos por sus formas insolubles, generando una mayor turbulencia dentro del medio y aumentando la velocidad de sedimentación. También, se observa que una mayor concentración de partículas en el medio genera que las moléculas logren una mayor precipitación debido a la aglomeración que puede existir.

Al igual que para el primer par de experimentos, el modelo no logró ajustarse para el experimento 4 a pH 4, en este caso, este fenómeno puede atribuirse a la presencia de aluminio en el medio. En el experimento 3 a este valor de pH, existe una sedimentación floculante que ocurre de manera rápida, mientras que, al existir aluminio en el experimento 4 no se logró identificar la sedimentación. Como se expone en el apartado del experimento y el punto de análisis de pH, a un rango más ácido el aluminio tiende a estar en forma de ión o de manera sulfatada, los cuales no son los compuestos que mayormente precipitan, impidiendo en mayor medida ionizando el medio e impidiendo la formación de compuestos precipitables de hierro, afectando la velocidad de sedimentación de las partículas.

Cuando el pH aumenta, existe un cambio en el tipo de sedimentación y la mezcla de iones de hierro y aluminio presenta una velocidad notoriamente menor comparada al experimento 3, esto ocurre por dos motivos. En primer lugar, como se explica en este punto el aumento de la concentración genera que la sedimentación se vea interferida y que las partículas no tengan una gran cantidad de espacio libre para descender y otras líneas de trayectoria por las interacciones presentes en el medio. Segundo, ambos compuestos tienden a presentarse en sus formas más insolubles a un menor pH, formando más precipitados dentro del medio con mayor densidad, por lo que, contribuye a que exista una sedimentación tipo floculante interferida.

CONCLUSIONES

La descripción del proceso de sedimentación de partículas de hierro y aluminio formadas en drenaje ácido sintético se realiza mediante técnicas de procesamiento de imágenes, las cuales, no logran observar el comportamiento para todos los experimentos debido al comportamiento floculante que presentaba el drenaje a determinadas condiciones. Las variables analizadas en este contexto corresponden a pH y concentración, pero, existen más variables involucradas dentro de los procesos de sedimentación tales como la temperatura y el diámetro de partículas, el último cuando existe un comportamiento floculante.

Considerando lo anterior, se obtienen las siguientes conclusiones:

1. De los 10 experimentos analizados, 8 presentan un comportamiento mayoritariamente floculante en donde, la mayoría de ellos presenta un mecanismo zonal (floculante interferido) con fases de sedimentación distintas a lo largo de la columna.
2. El análisis de velocidad de sedimentación interferida no es aplicable para los experimentos que presentan un mecanismo floculante, ya que, se tiene como hipótesis que pueden existir gradientes de velocidad y su comportamiento no es uniforme en las distintas alturas de columna. Se obtienen los modelos ajustados y sus parámetros para los experimentos analizados, por lo cual el comportamiento de la sedimentación es observable y analizable.
3. Al aplicar la segmentación de columna se comprueba la existencia de diferencia en las velocidades que presentan los experimentos, existiendo diferencias de hasta un 68% como en el caso del experimento 3 a pH 5.
4. Se observa que a un pH mayor existe un proceso de sedimentación más rápido en todos los experimentos debido a la naturaleza que presentan las especies a esa condición, esta diferencia es más notoria en los que presentan un mecanismo floculante que los que sedimentan de manera interferida, lo cual tiene sentido debido al efecto que genera la concentración en el proceso.
5. La sedimentación interferida es posible observarse a condiciones de alta concentración y mayor pH debido a la mayor existencia de interacciones entre flóculos y existencia de compuesto insolubles de hierro y aluminio coexistiendo. Lo anterior provoca que haya menor espacio para descender y lo realicen a una menor velocidad (comparada con segmentos anteriores), aun así, las magnitudes de las velocidades siguen siendo mayor que la mezcla a un menor pH.

6. Al momento de tener mezclas de hierro y aluminio a un menor pH existe una menor velocidad de sedimentación que en mezclas que presentan sólo hierro, debido al estado en el que suele encontrarse el aluminio a valores menores de pH. Cuando aumenta el pH la mezcla de hierro y aluminio presenta valores mayores de velocidad debido a que se potencian las reacciones de oxidación metálica. De todas maneras, este análisis es realizado con poca información, por lo cual, se requiere realizar más experimentos para corroborar el fenómeno.

Dadas las condiciones trabajadas se observa que las mejores condiciones para la descontaminación se obtienen a un valor mayor de pH, mientras que, para la concentración se obtiene que el aumento de la variable genera un proceso más rápido cuando el mecanismo es floculante, como es observable en el experimento 3 que posee una velocidad promedio de $11,788 \text{ mm/s}$ entre sus columnas. Al momento que el mecanismo es interferido, una menor concentración de partículas favorece la sedimentación del medio, pero, posee una magnitud menor a la que se puede lograr en el mecanismo floculante, este caso corresponde al experimento 4 que obtuvo una velocidad promedio de $0,204 \text{ mm/s}$.

RECOMENDACIONES

Para seguir analizando el comportamiento del hierro y aluminio en drenaje ácido en las futuras investigaciones se recomienda:

- Generar un diseño experimental que contemple más experimentos en torno al pH para observar el comportamiento de la sedimentación de las mezclas de hierro y aluminio a una misma concentración.
- Generar un diseño experimental que contemple más experimentos referentes a las mezclas de hierro y aluminio, considerando la adición gradual de aluminio a un mismo pH, de esta manera, observar el comportamiento que genera el aluminio a distintas concentraciones en un medio y cuánto interfiere con la oxidación del hierro.
- Realizar un análisis de diámetro de partículas para observar el comportamiento que poseen los flóculos en distintas secciones de la columna en los experimentos que poseen un mecanismo floculante.
- Las reacciones de oxidación con ión férrico en ocasiones tienden a aumentar el pH de la solución y con ello aumentar la acidez del medio, por lo que se puede monitorear el pH en condiciones finales de sedimentación a lo largo de la columna.
- Incorporar un modelo experimental que considere una función por tramos como lo denota la sedimentación floculante interferida descrita por Kynch, en vez del análisis por segmentos realizado, comparando ambos resultados.
- Utilizar técnicas más avanzadas de procesamiento de imágenes para identificar zonas de sedimentación en columnas.
- Incorporar la variable temperatura en los experimentos realizados para observar la variación en los resultados.

REFERENCIAS

- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento*.
- Aguilar, C. (2023). *Evaluación de la velocidad de sedimentación de flóculos de hierro y aluminio en drenaje ácido por medio de análisis de imagen*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Arismendy, S. K. (2020). *Problemática ambiental generada por el drenaje ácido de mina en la explotación de yacimientos mineros en Colombia* [Ingeniería Ambiental]. Universidad Nacional y Abierta y a Distancia UNAD.
- Asensi-Dasí, E. J. (2015). *Estudio y modelización de la velocidad de sedimentación zonal y de la aceleración de los fangos activados*. Universitat Politècnica de Valencia.
- Bigham, J. M., Schwertmann, U., Traina, S. J., Winland, R. L., & Wolf, M. (1996). Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(12), 2111–2121. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00091-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00091-9)
- Bosboom, J., & Stive, M. J. F. (2021). Coastal dynamics. In *Hydro Delft*. Tu Delft Open. <https://doi.org/10.5074/t.2021.001>
- Bustamante, S.-H. (2014). *Algoritmos de procesamiento de imagen aplicados a la detección de figuras geométricas y sus propiedades espaciales*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Cardemil, M. (2023). *Impactos socioeconómicos de la minería en Chile*. <https://consejominero.cl/chile-pais-minero/aprende-de-mineria/mineria-en-chile/>
- Chaparro, L. T. (2015). Drenajes Ácidos de mina. Formación y manejo. *Revista ESAICA*, 1, 53–57.
- COCHILCO. (2022). *Emisiones GEI en la minería del cobre al 2021 y análisis del contexto actual*.
- Gómez, D. V., & Guerrero, A. (2016). *Estudio y análisis de técnicas para procesamiento digital de imágenes*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- GRN. (2015). *Impacto ambiental de la Minería en Chile*. Gestión En Recursos Naturales.
- HIDRONOR. (2018, February 9). *Gestión y manejo adecuado de residuos en el sector minero*.

- Hudson-Edwards, K. A., Jamieson, H. E., & Lottermoser, B. G. (2011). Mine Wastes: Past, Present, Future. *Elements*, 7(6), 375–380. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.375>
- Huisman, L. (2004). *Sedimentation and flotation* (Second Edition). Delft University of Technology.
- Letterman, R. D. (1999). *Water quality and treatment : A handbook of community water supplies* (R. D. Letterman, Ed.; Fifth Edition). McGraw-Hill.
- López Pamo, E., Adurive, O., & Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 3–21.
- Lottermoser, Bernd. G. (2010). *Mine Wastes* (Third Edition). Springer.
- Maldonado, V. (2000). Sedimentación. In *Manual I para Plantas Potabilizadoras: Vol. Tomo II*.
- MathWorks. (2023). *Image Processing Toolbox™. User's Guide R2023a*. www.mathworks.com
- Mejía, J. R. (2005). *Apuntes de procesamiento digital de imágenes*.
- Mejías, C. (2015). *Identificación de la función densidad de flujo mediante medición de curvas de asentamiento de suspensiones y simulación numérica de sedimentación continua*. Universidad de Concepción.
- Montano, Y., Tapia, P. M., Quispe, C., & Fuentealba Editado, B. (2022). *El drenaje ácido de roca y sus potenciales impactos ambientales (Folleto)*.
- Nguyen, C. V, Dinh, E., Doi, A., Nguyen, T. V, & Nguyen, A. V. (2021). Accurate, fully automated determination of the initial settling rate of flocculated suspensions. *Minerals Engineering*, 164, 106823. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106823>
- Oliva Uc, J., Giacomani Vallejos, G., & Pérez Cortés, M. (2008). Estudio de la dinámica de sedimentación de lodos mediante un sistema óptico. *Ingeniería*, 12(2), 17–29. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46712202>
- Ortiz Hernandez, K. P. (2020). *Estimación de la velocidad de sedimentación en condiciones de flujo estratificado no estacionario en Zona de Máxima Turbidez -Desembocadura del Río Magdalena, Colombia*. Universidad del Norte.

- Perry, S. C., Gateman, S. M., Stephens, L. I., Lacasse, R., Schulz, R., & Mauzeroll, J. (2019). Pourbaix Diagrams as a Simple Route to First Principles Corrosion Simulation. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(11), C3186–C3192. <https://doi.org/10.1149/2.0111911jes>
- Peters, R. P. (2008). *Tratamientos de drenaje ácido de minas. División El Teniente - CODELCO Chile* [Ingeniería Civil Química]. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Quintanilla, J. (2021). El agua ácida que purgan las minas de San Sebastián. *Séptimo Sentido*.
- Ramírez Alcantar, C. J. (2021). *Procesamiento Digital de Imágenes*.
- Reyes-Ortiz, O. J., Mejia, M., & Useche-Castelblanco, J. S. (2019). Técnicas de inteligencia artificial utilizadas en el procesamiento de imágenes y su aplicación en el análisis de pavimentos. *Revista EIA*, 16, 189–207.
- Salinas-Salas, G., & Espinosa-Fuentes, F. (2012). Evaluación experimental del comportamiento de la velocidad de sedimentación de partículas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 11, 239–250. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242012000100020&nrm=iso
- Sánchez, J. (2007). Chapter 7 - The Behavior of Iron and Aluminum in Acid Mine Drainage: Speciation, Mineralogy, and Environmental Significance. In T. M. Letcher (Ed.), *Thermodynamics, Solubility and Environmental Issues* (pp. 137–150). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044452707-3/50009-4>
- SERNAGEOMIN. (2018). *Emisiones GEI en la minería del cobre al 2021 y análisis del contexto actual*. www.sernageomin.cl
- Sgier, H., Macías, F., Nieto, J. M., & Rötting Tobias. (2015). Diseño de una planta piloto para el tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina. *TECNOAQUA*, 11. www.tecnoaqua.es
- Shi, Z., Zhang, G., Zhang, Y., He, T., & Pei, G. (2019). Modeling of Flocculation and Sedimentation Using Population Balance Equation. *Journal of Chemistry*, 2019, 9187204. <https://doi.org/10.1155/2019/9187204>

- Soulsby, R. L., Manning, A. J., Spearman, J., & Whitehouse, R. J. S. (2013). Settling velocity and mass settling flux of flocculated estuarine sediments. *Marine Geology*, 339, 1–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.04.006>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & David Stensel, H. (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and reuse*. McGraw-Hill Companies, Inc.
- Valdebenito, L., & Morales, A. L. (2015). *Catastro de Medidas y Tecnologías para la prevención, control y tratamiento del drenaje minero*.
- Valdebenito, L., Morales, A. L., Rakela, V., Cortes, E., Mella, M., & Lacassie, J. (2015). Guía metodológica química de faenas e instalaciones mineras. In *Sernageomin*.
- Witten, T. A., & Sander, L. M. (1983). Diffusion-limited aggregation. *Physical Review B*, 27, 5686–5697. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:264962458>
- Yaghouti, M. R., Rezakhanlou, F., & Hammond, A. (2009). Coagulation, diffusion and the continuous Smoluchowski equation. *Stochastic Processes and Their Applications*, 119(9), 3042–3080. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spa.2009.04.001>
- Zaldívar, D., Cuevas, E., & Pérez-Cisneros, Ma. (2010). *Procesamiento digital de imágenes usando MatLAB & Simulink* (Alfaomega, Ed.).

ANEXOS

Anexo A: Código de tratamiento de imágenes para binarización en MATLAB.

```
%% Video reading

vid = VideoReader('Ril X - pH X.mp4'); % Import the suspension settling
recording
num = vid.NumFrames;
sTime= 1; % Initial settling time [s]
fTime=1710; % Final settling time [s]
fRate= 25; % Frame rate [m/s]

startEx=sTime*fRate;
finishEx=fTime*fRate;

%% Column areas

x = [x1 x2 x3 x4];
y = [y1 y2 y3 y4];

anchopix{1} = x(2)-x(1); % Column one width
anchopix{2} = x(4) -x(3); % Column two width

v1 = [x(1) y(1) x(2)-x(1) y(2)-y(1)]; % Column one coordinate vector
v2 = [x(3) y(3) x(4)-x(3) y(4)-y(3)]; % Column two coordinate vector

%% Convert pixet to meter

startEx{1}=sTime*fRate; % [m]
finishEx{1}=fTime{1}*fRate; % [m]

startEx{2}=sTime*fRate; % [m]
finishEx{2}=fTime{2}*fRate; % [m]

%% Iteration

u = 1;
%i= 30000;

for i =startEx:fRate:finishEx

    frame1 = read(vid,i);
    frame1 = im2double(frame1);
    I = imcrop(frame1,v1);
    I =imcrop(I,v3);
    I2 = imcrop(frame1,v2);
    str = string(u);

    b1=I(:, :,3);
    b2=I2(:, :,3);
    b1 = imadjust(b1, [0.0832 0.286]);
    b2 = imadjust(b2, [0.0832 0.286]);
    c1 = imbinarize(b1,"adaptive", "ForegroundPolarity", "dark");
```

```

c2 = imbinarize(b1);

nb1 = strcat('Badj_1_',str, '.tiff');
nb2 = strcat('Badj_2_',str, '.tiff');
nc1 = strcat('bin_1_',str, '.jpg');
nc2 = strcat('bin_2_',str, '.jpg');

imwrite(b1,nb1)
imwrite(b2,nb2)
imwrite(c1,nc1)
imwrite(c2,nc2)
u = u+1;
end

```

Anexo B: Código de velocidad de sedimentación discreta en MATLAB.

```

%% Video reading

vid = VideoReader('Ril X - pH X.MP4'); % Import the suspension settling
recording
num = vid.NumFrames;
sTime = 1; % Initial settling time [s]
fTime = 1740; % Final settling time [s]
fRate = 25; % Frame rate [m/s]
nExp = 'Ril X - pH X';

%% Column areas

x = [241 321 420 500]; % X coordinate vector
y = [59 438 59 438]; % Y coordinate vector

anchopix{1} = x(2)-x(1); % Column one width
anchopix{2} = x(4) -x(3); % Column two width

vector{1} = [x(1) y(1) x(2)-x(1) y(2)-y(1)]; % Column one coordinate vector
vector{2} = [x(3) y(3) x(4)-x(3) y(4)-y(3)]; % Column two coordinate vector

height=0.37; % [m]
diameter=0.065; % [m]

%% Convert pixet to meter

startEx=sTime*fRate; % [m]
finishEx=fTime*fRate; % [m]

%% Iteration

par1 = zeros(50000,4);
par2 = zeros(50000,4);
%i = 50;

for p=1:1:2
    crop = vector{1,p};
    h=1; % Settling rate first point
    for i=startEx:25:finishEx

```

```

frame1=read(vid,i);
Im=imcrop(frame1,crop);
Im = imlocalbrighten(Im);
[n,m]=size(Im);
pix2met=diameter/anchopix{p};

B = Im(:,:,3); % Higher contrast component
y=mean(B,2);
x=1:n;
x = transpose(x);

F=@(a,x)0.5*(a(1)+a(2))+0.5*(a(2)-a(1))*tanh((x-a(3))/a(4)); %this
equation is usually used for the fitting of air/water interface
a0=[147,80,100,40]; % Initial iterators
[a]=lsqcurvefit(F,a0,x,y);
k=int2str(i);
v=a(3);

if (v*pix2met > 0) && (v*pix2met <= height)
    SettlingRate_Time(h,p)=((i+0.9)/fRate-sTime)/60; %minute
    SettlingRate_Height(h,p)=height-v*pix2met; %meter
    for t = 1:1:4
        if p == 1
            par1(h,t) = a(t);
        else
            par2(h,t) = a(t);
        end
    end
    h=h+1;
end
close all
end
end

%% Graph

SR = zeros(2,1);
SRT = zeros(2,1);
SettlingRate_Height = SettlingRate_Height*100; % [cm]

for p = 1:1:2
    xdata=SettlingRate_Time(:,p);
    ydata=SettlingRate_Height(:,p);
    fi = fitype('a*exp(b*x)');
    fit1 = fit(xdata,ydata,fi,'StartPoint',[1 1]);
    co = coeffvalues(fit1);
    SR1=-co(1)*co(2);
    fdata = feval(fit1,xdata);
    I = abs(fdata - ydata) > 0.8*std(ydata); %identify "outliers" as points at a
distance greater than 1 stdv
    outliers = excludedata(xdata,ydata,'indices',I);
    fit2 = fit(xdata,ydata,fi,'StartPoint',[1 1],'Exclude',outliers);
    co2 = coeffvalues(fit2);
    SR2=-co2(1)*co2(2);

```

```

C1 = num2str(p);
C1 = strcat(' ',C1);
str = strcat('Settling Rate',C1,' = ');
XX=[str,num2str(SR2),'(m/h)'];
disp(XX)
a = ['b';'g'];
a = strcat(a(p),'o');
plot(fit1,'c--',xdata,ydata,a,outliers,'m*')
hold on
plot(fit2,'r-');
%data = strcat('Data',C1);
legend('Data','Excluded data','Fitted curve','Best-Fitted Curve');
xlabel('Time (h)');
ylabel('Height (m)');
set(gca,'XScale','log');
ntitle = strcat('Best Fitted - ',nExp);
title(ntitle);
txt=XX;
str = strcat('Y ',C1,' = ');
YY=[str,num2str(co2(1)), '*', 'exp(',num2str(co2(2)), '*X)'];
txt2=YY;
SR(p,1) = SR2;

if p==1
    text(0.01,0.29,txt);
    text(0.01,0.31,txt2);
else
    text(0.01,0.17,txt)
    text(0.01,0.19,txt2)
end
hold on
end
hold off

```

Anexo C: Código de velocidad de sedimentación floculante en MATLAB.

```

%% Video reading

vid = VideoReader('Ril X - pH X.MP4'); % Import the suspension settling
recording
num = vid.NumFrames;
sTime = 1; % Initial settling time [s]
d = vid.Duration;
fTime = ceil((d/1000)*1000)-1; % Final settling time [s]
fRate = vid.FrameRate; % Frame rate [m/s]
nExp = 'Ril X - pH X.MP4';

%% Column areas

x = [173 253 398 478];
y = [63 442 61 440];

anchopix{1} = x(2)-x(1); % Column one width
anchopix{2} = x(4) -x(3); % Column two width

```

```

vector{1} = [x(1) y(1) x(2)-x(1) y(2)-y(1)]; % Column one coordinate vector
vector{2} = [x(3) y(3) x(4)-x(3) y(4)-y(3)]; % Column two coordinate vector

height=0.37; % [m]
diameter=0.065; % [m]

%% Convert pixel to meter

startEx=sTime*fRate; % [m]
finishEx=fTime*fRate; % [m]

%% Iteración

par1 = zeros(50000,4);
par2 = zeros(50000,4);
h=1; %the first point of settling rate
crop = vector{1,1};
ite = zeros(30000,5);

for i=startEx:25:finishEx
    if i>5700
        frame1=read(vid,i);
        Im=imcrop(frame1,crop);
        Im = imlocalbrighten(Im);
        [n,m]=size(Im);
        pix2met=diameter/anchopix{1};

        B = Im(:,:,3);
        B = im2double(B);
        B = imadjust(B,[0.0832 0.286]);
        B = imbinarize(B);
        B = bwareaopen(~B,30);
        disk = strel("disk",15);
        B = imclose(B,disk);
        b1 = ~B;
        d = 0;
        it = 1;

        for p = 1:1:5

            A =
[it,it+1,it+2,it+3,it+4,it+5,it+6,it+7,it+8,it+9,it+10,it+11,it+12,it+13,it+14,i
t+15];
            y1 =
b1(:,A(1))+b1(:,A(2))+b1(:,A(3))+b1(:,A(4))+b1(:,A(5))+b1(:,A(6))+b1(:,A(7))+b1(
(:,A(8))+b1(:,A(9))+b1(:,A(10))+b1(:,A(11))+b1(:,A(12))+b1(:,A(13))+b1(:,A(14))+b
1(:,A(15))+b1(:,A(16));
            it = A(16)+1;
            y = mean(y1,2);
            x=1:n;
            x = transpose(x);
            F=@(a,x)0.5*(a(1)+a(2))+0.5*(a(2)-a(1))*tanh((x-a(3))/a(4)); %this
equation is usually used for the fitting of air/water interface
            a0=[147,80,100,40];
            [a]=lsqcurvefit(F,a0,x,y);

```

```

k=int2str(i);
v=a(3);

if (v*pix2met > 0) && (v*pix2met <= height)
    SettlingRate_Time(h,p)=(i/fRate-sTime)/60; %minute
    SettlingRate_Height(h,p)=height-v*pix2met; %meter
    d=1;
    %ite(w) = i;
    %w = w+1;
end

end

if d == 1
    h = h+1;
end
end
end

%% Graph

SR = zeros(5,1);
Parameters = zeros(5,2);
SettlingRate_Height = SettlingRate_Height*100; % [cm]

for p = 1:1:5
    xdata = SettlingRate_Time(:,p);
    ydata = SettlingRate_Height(:,p);

    n1 = find(xdata==0);
    n2 = find(ydata==0);

    xdata(n1) = [];
    ydata(n2) = [];

    fi = fittype('a*exp(b*x)');
    fit1 = fit(xdata,ydata,fi,'StartPoint',[1 1]);
    co = coeffvalues(fit1);
    SR1=-co(1)*co(2);
    fdata = feval(fit1,xdata);
    I = abs(fdata - ydata) > 0.8*std(ydata); %identify "outliers" as points at a
distance greater than 1 stdv
    outliers = excludedata(xdata,ydata,'indices',I);
    fit2 = fit(xdata,ydata,fi,'StartPoint',[1 1],'Exclude',outliers);
    co2 = coeffvalues(fit2);
    SR2=-co2(1)*co2(2);

    a = ['b';'g';'r';'k';'c'];
    a = strcat(a(p),'-');
    plot(fit1,'w--',xdata,ydata,a,outliers,'m*')
    hold on

    legend('Data','Excluded data','Fitted curve','Best-Fitted Curve');
    xlabel('Time (min)');
    ylabel('Height (cm)');

```

```

set(gca, 'XScale', 'log');
ntitle = strcat('Curves - ', nExp);
title(ntitle);
SR(p,1) = SR2;
Parameters(p,1) = co(1);
Parameters(p,2) = co(2);
hold on
end

hold off

```

Anexo D: Valores de parámetros de modelos de velocidad de sedimentación.

Estos parámetros corresponden a los existentes en la ecuación de velocidad de sedimentación de la Ecuación (32).

Tabla 12: Parámetros de modelos de velocidad de sedimentación interferida.

Experimento	pH	Columna 1		Columna 2	
		a	b	a	b
1	5	0,375	-1,925	0,383	-1,944
2		0,380	-1,777	0,383	-1,852

Tabla 13: Parámetros de modelos de velocidad de sedimentación floculante a pH 4.

Experimento	Segmento	Columna 1		Columna 2	
		a	b	a	b
2	1	0,341	-0,101	0,434	-0,863
	2	0,357	-0,188	0,438	-0,959
	3	0,364	-0,266	0,426	-0,948
	4	0,364	-0,254	0,416	-0,820
	5	0,357	-0,154	0,371	-0,571
3	1	0,672	-6,835	0,715	-7,100
	2	0,687	-6,954	0,707	-6,636
	3	0,651	-6,261	0,695	-6,520
	4	0,688	-6,800	0,664	-6,446
	5	0,716	-7,251	0,728	-8,036
5	1	0,724	-2,370	0,398	-0,739
	2	0,451	-1,126	0,458	-0,836
	3	0,453	-1,083	0,466	-0,821
	4	0,488	-1,157	0,466	-0,796
	5	0,520	-1,336	0,500	-0,987

Tabla 14: Parámetros de modelos de velocidad de sedimentación floculante a pH 5.

Experimento	Segmento	Columna 1		Columna 2	
		a	b	a	b
1	1	0,396	-1,714	0,468	-2,003
	2	0,427	-2,029	0,419	-1,834
	3	0,432	-2,141	0,413	-1,886
	4	0,439	-2,214	0,402	-1,704
	5	0,427	-2,105	0,465	-2,285
2	1	0,714	-16,151	0,483	-10,224
	2	0,671	-13,892	0,493	-10,066
	3	0,615	-12,404	0,492	-10,053
	4	0,585	-11,749	0,474	-9,980
	5	0,613	-12,926	0,405	-8,878
3	1	0,502	-6,685	2,809	-28,170
	2	1,847	-21,885	2,119	-24,043
	3	1,507	-18,996	2,172	-24,669
	4	1,722	-20,299	2,105	-25,341
	5	2,738	-25,813	0,708	-15,840