

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 La contaminación de las aguas.....	3
1.2 Tratamiento de las aguas residuales.....	5
1.3 Características de los fangos activados.....	8
1.3.1 Composición de los fangos activados.....	8
1.3.2 Biofloculación de los fangos activados.....	12
1.3.2.1 Modelo de la doble capa (DLVO).....	15
1.3.2.2 Teoría de formación de puentes con los cationes multivalentes.....	17
1.3.3 Densidad de los fangos activados.....	19
1.3.3.1 Densidad del fango.....	20
1.3.3.2 Densidad del fango seco.....	20
1.3.3.3 Densidad de los flóculos.....	21
1.3.4 Propiedades de los flóculos.....	23
1.3.4.1 Tamaño y distribución del tamaño de los flóculos.....	24
1.3.4.2 Forma de los flóculos.....	29
1.3.4.3 Estructura fractal de los flóculos.....	31
1.3.4.4 Porosidad y permeabilidad de los flóculos.....	38
1.3.4.5 Estabilidad y resistencia de los flóculos.....	42
1.4 Floculación de los fangos activados.....	45
1.4.1 Modelo de rotura y agregación.....	48
1.4.2 Modelo de balance de población.....	50
1.5 Sedimentación de los fangos activados.....	52
1.5.1 Tipos de sedimentación.....	52
1.5.2 Medida de la sedimentabilidad del fango.....	55
1.5.2.1 Velocidad de sedimentación zonal.....	55
1.5.2.2 Otras medidas de la sedimentabilidad del fango.....	64
1.5.3 Modelización de la velocidad de sedimentación.....	71
1.5.3.1 Velocidad de sedimentación discreta y modificaciones de la ley de Stokes.....	71
1.5.3.2 Velocidad de sedimentación zonal.....	80
1.5.3.3 Velocidad de sedimentación por compresión.....	90

1.5.4	Diseño, simulación y operación de decantadores secundarios.....	96
1.5.4.1	La teoría de flujo de sólidos	96
1.5.4.2	Diseño de decantadores secundarios	98
1.5.4.3	Simulación de decantadores secundarios.....	102
1.5.4.4	Operación de decantadores secundarios.....	104
1.6	Aceleración de los fangos en los ensayos de sedimentación	106
1.6.1	Periodos de inducción en los ensayos de sedimentación	106
1.6.2	Aumento de la velocidad de sedimentación y la formación de canales	109
1.6.3	Efecto de la coagulación-floculación en la sedimentación zonal	111
2	OBJETIVOS	125
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	129
3.1	La depuradora de aguas residuales industriales de Ford España.....	129
3.2	Ensayos de sedimentación	132
3.2.1	Descripción de las columnas de sedimentación.....	132
3.2.2	Diseño de los ensayos de sedimentación	136
3.3	Densidad de los fangos activados	144
3.3.1	Densidad del fango seco.....	144
3.3.2	Densidad de los flóculos	146
3.4	Morfología y tamaño de los flóculos	151
3.4.1	Adquisición de las imágenes de los flóculos.....	152
3.4.2	Análisis y procesamiento de las imágenes	153
4	CARACTERIZACIÓN DEL FANGO Y MODELIZACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN ZONAL INICIAL Y FINAL.....	163
4.1	Caracterización del fango.....	163
4.1.1	Densidad del fango	163
4.1.2	Tamaño y morfología de los flóculos.....	164
4.2	Velocidad de sedimentación zonal inicial y final del fango	172
4.2.1	Resultados experimentales.....	172
4.2.2	Cálculo de la velocidad de sedimentación zonal inicial y final	175
4.2.3	Modelización de la velocidad de sedimentación zonal inicial y final	194

4.3 Sedimentabilidad del fango	216
4.3.1 <i>IVF</i> e <i>IVFD</i> del fango.....	216
4.3.2 Velocidad de sedimentación zonal del fango	218
5 APLICACIÓN DEL MODELO DE RICHARDSON Y ZAKI	223
5.1 Aplicación del modelo de Richardson y Zaki en las etapas de sedimentación zonal inicial y final	223
5.1.1 Aplicación del modelo	223
5.1.2 Características de los flóculos.....	232
5.1.2.1 Diámetro equivalente de los flóculos.....	233
5.1.2.2 Índice volumétrico del agregado, porosidad y densidad de los flóculos.....	235
5.1.2.3 Velocidad de sedimentación terminal de los flóculos.....	240
5.1.3 Discontinuidad de la velocidad de sedimentación y concentración de sólidos suspendidos crítica (SS_c).....	242
5.2 Modificaciones del modelo de Richardson y Zaki.....	245
5.2.1 Estructura fractal de los flóculos	245
5.2.2 Permeabilidad de los flóculos.....	249
5.2.3 Esfericidad de los flóculos.....	253
5.3 Aplicación del modelo de Richardson y Zaki en la etapa de sedimentación zonal final considerando la etapa de transición	258
5.3.1 Aplicación del modelo	258
5.3.2 Características de los flóculos en la etapa de sedimentación zonal final.....	265
5.3.2.1 Diámetro equivalente de los flóculos e índice volumétrico del agregado	265
5.3.2.2 Porosidad y densidad de los flóculos	272
5.3.3 Discontinuidad de la velocidad de sedimentación zonal final.....	276
6 MODELIZACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN ZONAL Y DEL PROCESO DE ACELERACIÓN DE LOS FANGOS.....	285
6.1 Introducción	285
6.2 Velocidad de sedimentación zonal en función del tiempo.....	287
6.2.1 Velocidad de sedimentación numérica	287
6.2.2 Modelo escalón	289
6.2.3 Modelos de crecimiento sigmoideo	290

6.2.4 Selección del modelo de crecimiento sigmoideo para la velocidad de sedimentación	295
6.3 Modelo logístico de la velocidad de sedimentación zonal	297
6.3.1 Descripción del modelo logístico.....	297
6.3.2 Ajuste del modelo logístico a los ensayos de sedimentación zonal	302
6.3.3 Validación del modelo logístico de sedimentación zonal.....	314
6.4 Efecto de la composición del sobrenadante en la velocidad de sedimentación zonal y en el proceso de aceleración de los fangos	325
6.4.1 Efecto de los productos químicos utilizados en el tratamiento físico-químico.....	326
6.4.2 Efecto de la dilución del sobrenadante	328
6.5 Relación entre el modelo logístico de la velocidad de sedimentación zonal y el modelo de Richardson y Zaki.....	332
7 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	347
7.1 Conclusiones	347
7.2 Desarrollos futuros.....	354
8 APÉNDICES.....	359
8.1 Cálculo de errores	359
8.1.1 Cálculo de errores aleatorios.....	360
8.1.2 Cálculo de errores de los parámetros de una regresión	362
8.1.3 Propagación de errores en una medida indirecta	362
8.2 Regresión no lineal.....	363
8.2.1 Introducción a la regresión no lineal	363
8.2.2 Regresión no lineal con Mathematica	369
9 BIBLIOGRAFÍA	373
ÍNDICE DE FIGURAS.....	391
ÍNDICE DE TABLAS.....	401
ABREVIATURAS Y NOMENCLATURA.....	405