

Índice general.

1	INTRODUCCIÓN.	3
1.1	GENERALIDADES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.	3
1.1.1	Introducción.	3
1.1.2	Contaminación del medio natural.	4
1.1.3	Los nutrientes en las aguas residuales.	6
1.1.3.1	El nitrógeno en las aguas residuales.	6
1.1.3.1.1	Formas del nitrógeno.	6
1.1.3.1.2	Problemas del nitrógeno como contaminante.	7
1.1.3.2	El fósforo en las aguas residuales.	9
1.1.4	Métodos en la depuración de aguas residuales.	9
1.1.5	Procesos de eliminación biológica de nutrientes.	12
1.1.5.1	Procesos de eliminación biológica de nitrógeno.	12
1.1.5.1.1	Nitrificación.	13
1.1.5.1.2	Desnitrificación.	14
1.1.5.1.3	Esquemas de tratamiento.	15
1.1.5.2	Procesos de eliminación biológica de fósforo.	17
1.2	NUEVOS PROCESOS BIOLÓGICOS PARA LA ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO AMONIACAL.	18
1.2.1	Procesos de Nitrificación – Desnitrificación simultáneos (proceso SND).	19
1.2.2	Proceso de nitrificación parcial – desnitrificación (proceso SHARON).	20
1.2.3	Proceso de oxidación de amonio en condiciones anaerobias (proceso ANAMMOX).	23
1.2.4	Combinación de los procesos de nitrificación parcial y ANAMMOX.	24
1.2.5	Procesos para eliminación de N con oxígeno limitado (procesos CANON y OLAND).	25
1.2.6	Oxidación desnitrificante de amonio (proceso DEAMOX).	27
1.2.7	Proceso de incremento de la biomasa nitrificante (Proceso BABE).	28
1.2.8	Comparación de los diferentes procesos de eliminación de nitrógeno.	30
1.3	BACTERIAS RESPONSABLES DEL PROCESO DE NITRIFICACIÓN.	33
1.3.1	Clasificación y características de las bacterias.	33
1.3.2	Ecología y detección de las bacterias.	35
1.3.2.1	Técnica de hibridación in situ (FISH).	37
1.3.3	Metabolismo de las bacterias.	40
1.3.3.1	Bioquímica de las bacterias amonioxidantes.	40
1.3.3.2	Bioquímica de las bacterias nitritoxidantes.	41
1.3.4	Factores que afectan al crecimiento de las bacterias.	42
1.4	MODELACIÓN MATEMÁTICA EN EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.	47
1.4.1	Modelación de los procesos biológicos.	48
1.4.1.1	Bases del crecimiento microbiano: La cinética de Monod.	48
1.4.1.2	Estequiometría y cinética de los procesos biológicos.	50
1.4.1.3	Formato y notación.	52
1.4.2	Modelos existentes en el tratamiento de aguas residuales.	54
1.4.2.1	Modelos matemáticos para el proceso de fangos activados.	54

1.4.2.2	Modelos matemáticos para el proceso de digestión anaerobia	56
1.4.2.3	Integración de procesos en un solo modelo biológico general.	61
1.4.3	Biological Nutrient Removal Model No.1 (BNRM1).	61
1.4.3.1	Componentes y procesos del modelo.	62
1.4.3.1.1	Componentes del modelo.	62
1.4.3.1.2	Procesos cinéticos.	65
1.4.3.1.3	Procesos de equilibrio acido-base. Calculo del pH.	65
1.4.3.2	Ecuaciones de continuidad.	68
1.5	MODELACIÓN DEL PROCESO DE NITRIFICACIÓN.	70
1.5.1	Modelos de nitrificación en una etapa versus nitrificación en dos etapas.	70
1.5.2	Revisión de los principales modelos de nitrificación vía nitrito.	71
1.6	CALIBRACIÓN DE MODELOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.	75
1.6.1	Metodologías de calibración.	76
1.6.1.1	Calibración en estado estacionario.	76
1.6.1.2	Calibración dinámica.	77
1.6.1.3	Calibración off-line en laboratorio.	77
1.6.1.3.1	Técnicas respirométricas.	78
1.6.2	Protocolos de calibración.	79
1.6.2.1	Protocolo de Calibración BIOMATH (Vanrolleghem et al., 2003).	79
1.6.2.2	Protocolo de Calibración STOWA (Hulsbeek et al., 2002)	81
1.6.2.3	Protocolo de Calibración HSG (Langergraber et al., 2004).	83
1.6.2.4	Protocolo de Calibración WERF (Melcer et al., 2003).	85
1.7	CALIBRACIÓN DE BACTERIAS AMONIOXIDANTES Y NITRITOXIDANTES.	86
2	OBJETIVOS.	91
3	MATERIALES Y MÉTODOS.	97
3.1	MÉTODOS DE ANÁLISIS.	97
3.1.1	Analíticas de seguimiento en los reactores SHARON.	97
3.1.2	Analíticas de seguimiento en la planta piloto.	99
3.2	REACTOR SHARON A ESCALA LABORATORIO.	101
3.2.1	Montaje de los reactores.	101
3.2.2	Características del agua residual influente.	102
3.2.3	Operación de los reactores SHARON.	102
3.3	PLANTA PILOTO DE AGUAS RESIDUALES CON ELIMINACIÓN DE NUTRIENTES.	108
3.3.1	Descripción de la planta piloto.	108
3.3.2	Equipos de medición de la planta piloto.	111
3.3.3	Operación de la planta piloto.	112
3.4	DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS.	115
3.4.1	Montaje para experimentos con fango del reactor SHARON.	115
3.4.2	Montaje para experimentos con fango de la planta piloto.	117
4	MODELO MATEMÁTICO DEL PROCESO DE NITRIFICACIÓN EN DOS ETAPAS.	123
4.1	INTRODUCCIÓN.	123
4.2	CONSIDERACIONES ESTABLECIDAS.	124

4.2.1	Componentes del modelo.	125
4.2.2	Procesos del modelo.	126
4.2.3	Dependencia con la temperatura.	136
4.3	RESUMEN DEL MODELO DE NITRIFICACIÓN EN DOS ETAPAS DESARROLLADO.	137
4.4	INCORPORACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO AL MODELO BNRM1.	140
5	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO.	145
5.1	DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN PARA FANGO DEL REACTOR SHARON.	146
5.1.1	Determinación de la constante de semisaturación del oxígeno.	147
5.1.2	Determinación de las constantes de semisaturación e inhibición del NH_3	148
5.1.3	Determinación de la constante de inhibición del HNO_2	151
5.1.4	Determinación de las constantes de inhibición del pH.	152
5.1.5	Determinación del efecto de la temperatura en la actividad de las bacterias.	153
5.1.6	Determinación del rendimiento celular de las bacterias.	154
5.1.7	Determinación de la tasa máxima de crecimiento de las bacterias.	155
5.2	DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN PARA FANGO DE LA PLANTA PILOTO.	156
5.2.1	Determinación del método para medir de forma independiente la actividad de las bacterias amonioxidantes y nitritoxidantes en cultivos mixtos.	157
5.2.1.1	Inhibidor específico de la actividad de las bacterias.	158
5.2.1.2	Método de adiciones sucesivas.	160
5.2.2	Experimentos para la calibración de los parámetros de bacterias amonioxidantes y nitritoxidantes en cultivos mixtos.	161
5.2.2.1	Calibración de parámetros de bacterias nitritoxidantes presentes en la planta piloto.	164
5.2.2.1.1	Determinación de las constantes de semisaturación e inhibición del HNO_2	164
5.2.2.1.2	Determinación de la constante de inhibición por NH_3	165
5.2.2.1.3	Determinación de la constante de semisaturación del oxígeno.	166
5.2.2.1.4	Determinación de las constantes de inhibición del pH.	167
5.2.2.1.5	Determinación del rendimiento celular de las bacterias.	168
5.2.2.1.6	Determinación de la tasa máxima de crecimiento de las bacterias.	168
5.2.2.2	Calibración de parámetros de bacterias amonioxidantes presentes en la planta piloto.	169
5.2.2.2.1	Determinación de las constantes de semisaturación e inhibición del NH_3	169
5.2.2.2.2	Determinación de la constante de inhibición por HNO_2	170
5.2.2.2.3	Determinación de la constante de semisaturación de oxígeno.	171
5.2.2.2.4	Determinación de las constantes de inhibición del pH.	172
5.2.2.2.5	Determinación del rendimiento celular de las bacterias.	172
5.2.2.2.6	Determinación de la tasa máxima de crecimiento de las bacterias.	173
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS.	177
6.1	CALIBRACIÓN DE BACTERIAS AMONIOXIDANTES PRESENTES EN UN REACTOR SHARON A ESCALA LABORATORIO.	178
6.1.1	Constante de semisaturación del oxígeno (K_{O_2}) de las bacterias amonioxidantes.	178
6.1.2	Constantes de semisaturación e inhibición del amoníaco ($K_{\text{NH}_3}/K_{\text{INH}_3}$) de las bacterias amonioxidantes.	183
6.1.3	Constante de inhibición del ácido nitroso (K_{HNO_2}) de las bacterias amonioxidantes.	191

6.1.4	Constantes de inhibición del pH (K_H/K_{IH}) de las bacterias amonioxidantes.....	194
6.1.5	Efecto de la temperatura sobre la actividad de las bacterias amonioxidantes.	201
6.1.6	Rendimiento celular de las bacterias amonioxidantes (Y_{NH}).....	206
6.1.7	Tasa máxima de crecimiento de las bacterias amonioxidantes (μ_{NH}).....	211
6.1.8	Simulaciones de los reactores SHARON operados en el laboratorio.....	213
6.1.8.1	Simulación del reactor SHARON R_1 . Determinación de la tasa de lisis de las bacterias amonioxidantes.....	214
6.1.8.2	Simulación del reactor SHARON R_2 . Determinación de la capacidad máxima de tratamiento del reactor.....	216
6.2	CALIBRACIÓN DE BACTERIAS DESARROLLADAS EN UNA PLANTA PILOTO DE FANGOS ACTIVADOS.....	221
6.2.1	Método para medir independientemente las actividades de bacterias amonioxidantes y nitritoxidantes en cultivos mixtos.....	222
6.2.2	Determinación de parámetros de las bacterias nitritoxidantes.....	227
6.2.2.1	Constantes de semisaturación e inhibición del ácido nitroso (K_{HNO_2}/K_{IHNO_2}).....	227
6.2.2.2	Constante de inhibición del amoníaco (K_{INH_3}).....	230
6.2.2.3	Constante de semisaturación del oxígeno (K_{O_2}).....	232
6.2.2.4	Constantes de inhibición del pH (K_H/K_{IH}).....	236
6.2.2.5	Rendimiento celular de las bacterias nitritoxidantes (Y_{NO}).....	238
6.2.2.6	Tasa máxima de crecimiento de las bacterias nitritoxidantes (μ_{NO}).....	240
6.2.3	Determinación de parámetros de las bacterias amonioxidantes.....	242
6.2.3.1	Constantes de semisaturación e inhibición del amoníaco (K_{NH_3}/K_{INH_3}).....	242
6.2.3.2	Constante de inhibición del ácido nitroso (K_{IHNO_2}).....	245
6.2.3.3	Constante de semisaturación del oxígeno (K_{O_2}).....	247
6.2.3.4	Constantes de inhibición del pH (K_H/K_{IH}).....	250
6.2.3.5	Rendimiento celular de las bacterias amonioxidantes (Y_{NH}).....	253
6.2.3.6	Tasa máxima de crecimiento de las bacterias amonioxidantes (μ_{NH}).....	255
6.3	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PARÁMETROS CALIBRADOS EN LOS SISTEMAS ESTUDIADOS.....	256
6.4	POTENCIALES APLICACIONES DEL MODELO DESARROLLADO Y LAS METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN PROPUESTAS.....	264
7	CONCLUSIONES.....	269
	ANEXO I. SOFTWARE DE SIMULACIÓN DESASS.....	277
	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	285