

INGENIERÍA SANITARIA

Tratamiento, evacuación
y reutilización de aguas residuales

SEGUNDA EDICIÓN
METCALF & EDDY, INC.

Revisada por
GEORGE TCHOBANOGLOUS
profesor de ingeniería civil
Universidad de California, Davis

125133



EDITORIAL LABOR, S. A.

ÍNDICE

1. INGENIERÍA SANITARIA: UNA PANORÁMICA	1
1.1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	2
1.1.1. Antecedentes	2
1.1.2. Situación actual	2
1.1.3. Nuevas tendencias	4
1.2. EVACUACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE EFLUENTES Y FANGOS	7
1.2.1. Antecedentes	7
1.2.2. Estado actual y nuevas direcciones	8
1.3. EL PAPEL DEL INGENIERO	10
BIBLIOGRAFÍA	11
2. CAUDALES DE AGUA RESIDUAL	12
2.1. COMPONENTES DE LOS CAUDALES DE AGUA RESIDUAL	12
2.2. AGUA UTILIZADA PARA CONSUMO PÚBLICO	13
2.2.1. Dotaciones de agua para abastecimientos públicos de agua	14
2.2.2. Variaciones del consumo en las ciudades	16
2.2.3. Consumo de agua según los distintos tipos de establecimientos y aparatos domésticos típicos	18
2.2.4. Fluctuaciones en el consumo de agua	19
2.2.5. Proporción de agua de abastecimiento municipal que llega a las alcantarillas	21
2.3. CAUDALES Y PROCEDENCIA DE LAS AGUAS RESIDUALES	21
2.3.1. Origen y caudales de las aguas residuales domésticas	21
2.3.2. Procedencia y caudales de aguas residuales industriales	25
2.3.3. Infiltración y conexiones incontroladas	26
2.3.4. Variaciones en los caudales de agua residual	29

2.4. Análisis de los datos de caudales de aguas residuales	31
2.4.1. Factores punta para caudales de aguas residuales	32
2.4.2. Factores punta de la infiltración	34
2.4.3. Factores punta para caudales de conexiones incontroladas	34
2.4.4. Caudales permanentes	35
2.4.5. Análisis estadístico	36
2.5. REDUCCIÓN DEL CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES	39
2.6. MEDIDA DEL CAUDAL DE AGUAS RESIDUALES	42
2.6.1. Métodos de descarga directa	42
2.6.2. Métodos velocidad-área	54
PROBLEMAS	57
BIBLIOGRAFÍA	58
3. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	60
3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	60
3.2. ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL	63
3.2.1. Muestreo	64
3.2.2. Preservación de la muestra	65
3.2.3. Métodos de análisis	66
3.2.4. Expresión de los resultados analíticos	68
3.3. COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL	69
3.3.1. Constituyentes en el agua residual y del líquido de las fosas sépticas	70
3.3.2. Necesidad de análisis adicionales	70
3.3.3. Incremento del contenido mineral por el uso del agua	71
3.4. FACTORES DE APORTACIÓN UNITARIA A LA CONTAMINACIÓN	72
3.5. VARIACIONES EN LAS CONCENTRACIONES DE LOS CONSTITUYENTES DEL AGUA RESIDUAL	74
3.5.1. Variaciones a corto plazo	74
3.5.2. Variaciones estacionales	75
3.5.3. Variaciones industriales	76
3.6. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE CARGAS DEL AGUA RESIDUAL	77
3.6.1. Media simple	78
3.6.2. Medias proporcionales al caudal	78
3.6.3. Cargas contaminantes	79
3.6.4. Cargas contaminantes punta duraderas	79
3.7. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS: DEFINICIÓN Y APLICACIÓN	82
3.7.1. Sólidos totales	82
3.7.2. Olores	83
3.7.3. Temperatura	88
3.7.4. Color	88
3.8. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS: DEFINICIÓN Y APLICACIÓN	89
3.8.1. Materia orgánica	89
3.8.2. Medida del contenido orgánico	92

3.8.3. Materia inorgánica	106
3.8.4. Gases	112
3.9. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS: DEFINICIÓN Y APLICACIÓN	114
3.9.1. Microorganismos	114
3.9.2. Organismos patógenos	116
3.9.3. Organismos coliformes	116
3.9.4. Relación entre los coliformes fecales y los estreptococos fecales	119
3.9.5. Ensayos biológicos	120
PROBLEMAS	124
BIBLIOGRAFÍA	127
4. OBJETIVOS, MÉTODOS Y PROYECTO DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	130
4.1. REGLAMENTOS Y OBJETIVOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	130
4.2. CLASIFICACIÓN Y APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	132
4.2.1. Clasificación de los métodos de tratamiento	133
4.2.2. Aplicación de los métodos de tratamiento	134
4.3. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE UNA PLANTA	137
4.3.1. Diagrama de flujo de los procesos de tratamiento	137
4.3.2. Criterios de diseño del proceso	138
4.3.3. Balance de sólidos	140
4.3.4. Línea piezométrica	140
4.3.5. Implantación	141
4.4. OTROS ASPECTOS IMPORTANTES	145
4.4.1. Necesidades de recursos y energía	145
4.4.2. Análisis de costos	148
4.4.3. Evaluación del impacto ambiental	150
4.4.4. Planes y especificaciones	151
PROBLEMAS	151
BIBLIOGRAFÍA	153
5. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE PROCESOS	154
5.1. REACCIONES Y CINÉTICA DE REACCIÓN	155
5.1.1. Tipos de reacciones	155
5.1.2. Velocidad de reacción	156
5.1.3. Velocidad específica de reacción	157
5.1.4. Efectos de la temperatura en las constantes de velocidad específica	158
5.1.5. Análisis de la cinética de las reacciones	159
5.2. ANÁLISIS DEL BALANCE DE MASAS	162
5.2.1. Balance de masas	162
5.2.2. Balance másico en un reactor de flujo discontinuo	165
5.2.3. Procedimiento de solución	165
5.2.4. Simplificación del estado estacionario	166

5.3. REACTORES Y SUS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS	167
5.3.1. Tipos de reactores	167
5.3.2. Características hidráulicas de los reactores	168
5.4. ANÁLISIS DE PROCESOS	177
5.4.1. Selección de las expresiones de la velocidad de reacción o criterios de carga	180
5.4.2. Selección del tipo de reactor	180
5.5. CINÉTICA DE REACCIÓN Y SELECCIÓN DEL REACTOR	181
5.5.1. Reactores de mezcla completa en serie con conversión	181
5.5.2. Reactor de flujo en pistón con conversión	182
5.5.3. Comparación entre los reactores de mezcla completa y de flujo en pistón	185
5.5.4. Reactores de flujo en pistón con dispersión axial y conversión	186
5.5.5. Reactores con otros regímenes de flujo y combinación de reactores	188
5.6. ASPECTOS PRÁCTICOS DEL DISEÑO DE REACTORES	190
PROBLEMAS	192
BIBLIOGRAFÍA	195
6. OPERACIONES FÍSICAS UNITARIAS	196
6.1. DESBASTE	198
6.1.1. Descripción	198
6.1.2. Análisis	202
6.2. HOMOGENEIZACIÓN DE CAUDALES	203
6.2.1. Descripción	203
6.2.2. Análisis	205
6.3. MEZCLADO	213
6.3.1. Descripción y aplicación	213
6.3.2. Análisis	215
6.4. FLOCULACIÓN	217
6.4.1. Descripción	217
6.4.2. Análisis	217
6.5. SEDIMENTACIÓN	219
6.5.1. Descripción	219
6.5.2. Análisis de la sedimentación de partículas discretas (tipo 1)	221
6.5.3. Análisis de la sedimentación floculenta (tipo 2)	226
6.5.4. Análisis de los decantadores lamelares	228
6.5.5. Análisis de la sedimentación zonal (tipo 3)	229
6.5.6. Análisis de la sedimentación por compresión (tipo 4)	242
6.6. FLOTACIÓN	242
6.6.1. Descripción	243
6.6.2. Análisis	245
6.7. FILTRACIÓN EN MEDIO GRANULAR	248
6.7.1. Descripción del funcionamiento de la filtración	249
6.7.2. Clasificación de sistemas de filtración	252
6.7.3. Variables del proceso de filtración	255

6.7.4. Mecanismos de eliminación de partículas	260
6.7.5. Análisis general de la operación de filtración	261
6.7.6. Análisis de la filtración de agua residual	262
6.7.7. Necesidad de estudios en plantas piloto	269
PROBLEMAS	275
BIBLIOGRAFÍA	279
7. PROCESOS QUÍMICOS UNITARIOS	281
7.1. PRECIPITACIÓN QUÍMICA	282
7.1.1. Descripción de la precipitación química para mejorar el comportamiento de la planta	283
7.1.2. Reacciones de la precipitación química para la eliminación de fosfatos y para el tratamiento fisicoquímico	287
7.1.3. Aspectos teóricos de la precipitación química	289
7.2. TRANSFERENCIA DE GASES	293
7.2.1. Descripción	293
7.2.2. Análisis de la transferencia de gases	295
7.2.3. Evaluación de la eficiencia del sistema de aireación	302
7.3. ADSORCIÓN	303
7.3.1. Descripción	303
7.3.2. Análisis de la adsorción del carbón activo	306
7.3.3. Análisis del proceso	309
7.4. DESINFECCIÓN	311
7.4.1. Descripción de los métodos y medios de desinfección	313
7.4.2. Mecanismos de la acción de los desinfectantes	315
7.4.3. Análisis de los factores que influyen en la acción de los desinfectantes	316
7.5. DESINFECCIÓN CON CLORO	319
7.5.1. Descripción de la química del cloro	319
7.5.2. Reacción al breakpoint	322
7.5.3. Factores que afectan a la eficacia del cloro	326
7.6. DECLORACIÓN	332
7.6.1. Toxicidad de los compuestos residuales de cloro	332
7.6.2. Análisis de la decloración	333
7.7. DESINFECCIÓN CON OZONO	335
7.7.1. Descripción	335
7.7.2. Análisis	335
7.8. OTRAS APLICACIONES QUÍMICAS	337
PROBLEMAS	337
BIBLIOGRAFÍA	339
8. PROYECTO DE INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO FÍSICO Y QUÍMICO DEL AGUA RESIDUAL	342
8.1. REJAS Y TAMICES DE MALLA GRUESA	342
8.1.1. Rejas	344
8.1.2. Tamices de malla gruesa	348

8.1.3. Cantidad de residuos	349
8.1.4. Eliminación de los residuos	349
8.2. DILACERACIÓN	350
8.2.1. Descripción	350
8.2.2. Aplicación y proyecto	352
8.3. DESARENADORES	353
8.3.1. Tipos	353
8.3.2. Cantidades de arena	361
8.3.3. Eliminación de la arena	361
8.4. HOMOGENEIZACIÓN Y REGULACIÓN DEL CAUDAL	362
8.4.1. Construcción del tanque	362
8.4.2. Necesidades de mezclado de aire	364
8.4.3. Bombas y control de bombeo	364
8.5. OTRAS OPERACIONES DE PRETRATAMIENTO	365
8.5.1. Separadores de grasas	366
8.5.2. Floculación	366
8.5.3. Preaireación	368
8.6. TANQUES DE DECANTACIÓN PRIMARIA	368
8.6.1. Bases de proyecto	369
8.6.2. Tipo, tamaño y forma de los tanques	372
8.6.3. Producción de fango	380
8.7. OTRAS UNIDADES Y OPERACIONES PARA LA ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS	382
8.7.1. Flotación	382
8.7.2. Tamices de malla fina	383
8.7.3. Tanques Imhoff y fosas sépticas	386
8.8. PRECIPITACIÓN QUÍMICA	389
8.8.1. Mejora del rendimiento de los tanques de decantación	390
8.8.2. Tratamiento fisicoquímico independiente	390
8.8.3. Eliminación del fósforo	392
8.8.4. Cantidad de fango	393
8.8.5. Almacenamiento, dosificación, conducción y sistemas de control de los productos químicos	396
8.9. FILTRACIÓN EN MEDIO GRANULAR	396
8.9.1. Fuerza actuante, número y tamaño de los filtros	396
8.9.2. Selección del lecho filtrante	397
8.9.3. Sistemas de lavado a contracorriente	400
8.9.4. Accesorios de los filtros	404
8.9.5. Problemas de los filtros	406
8.9.6. Sistemas de control e instrumentación	406
8.10. MICROTAMIZADO	408
8.10.1. Descripción	408
8.10.2. Diseño funcional	409
8.11. CLORACIÓN	410
8.11.1. Aplicación	410
8.11.2. Compuestos del cloro	412

8.11.3. Equipo de la cloración y control de la dosificación	413
8.11.4. Instalaciones de cloración	417
8.12. CONTROL DE OLORES	424
PROBLEMAS	426
BIBLIOGRAFÍA	428
9. PROCESOS BIOLÓGICOS UNITARIOS	430
9.1. TRATAMIENTO BIOLÓGICO: UNA PANORÁMICA	431
9.1.1. Definiciones	431
9.1.2. Papel de los microorganismos	434
9.1.3. Procesos de tratamiento	434
9.2. ALGUNOS FUNDAMENTOS DE MICROBIOLOGÍA	435
9.2.1. Conceptos básicos	435
9.2.2. Microorganismos importantes	437
9.2.3. Fisiología de la célula	442
9.3. CRECIMIENTO BACTERIANO Y OXIDACIÓN BIOLÓGICA ...	449
9.3.1. Características generales del crecimiento en cultivos puros ...	449
9.3.2. Crecimiento en cultivos mixtos	451
9.3.3. Oxidación bacteriana	451
9.4. CINÉTICA DEL CRECIMIENTO BIOLÓGICO	452
9.4.1. Crecimiento logarítmico	453
9.4.2. Crecimiento con limitación de sustrato	453
9.4.3. Crecimiento celular y utilización del sustrato	454
9.4.4. Efectos del metabolismo endógeno	455
9.4.5. Efectos de la temperatura	456
9.4.6. Aplicación de la cinética al tratamiento biológico	457
9.4.7. Determinación de los coeficientes cinéticos	464
9.4.8. Otras expresiones cinéticas	469
9.5. PROCESOS DE TRATAMIENTO AEROBIO DE CULTIVO EN SUS- PENSIÓN	470
9.5.1. Proceso de fangos activados	470
9.5.2. Nitrificación en cultivos en suspensión	479
9.5.3. Lagunas aireadas aerobias	480
9.5.4. Digestión aerobia	481
9.5.5. Estanques de estabilización aerobia	483
9.6. PROCESOS AEROBIOS DE TRATAMIENTO DE CULTIVO FIJO .	484
9.6.1. Filtros percoladores	484
9.6.2. Filtros de pretratamiento	495
9.6.3. Sistemas biológicos rotativos de contacto (biodiscos)	496
9.6.4. Reactores de lecho compacto	497
9.7. PROCESOS ANÓXICOS DE CULTIVOS EN SUSPENSIÓN Y FI- JOS	497
9.7.1. Desnitrificación con cultivos en suspensión	498
9.7.2. Desnitrificación en capa fina	498
9.8. PROCESOS ANAEROBIOS DE TRATAMIENTO DE CULTIVOS EN SUSPENSIÓN	498

9.8.1. Digestión anaerobia	499
9.8.2. Proceso anaerobio de contacto	504
9.9. PROCESOS ANAEROBIOS DE TRATAMIENTO DE CULTIVO FIJO	504
9.9.1. Filtro anaerobio	504
9.9.2. Estanques anaerobios	505
9.10. COMBINACIÓN DE PROCESOS DE TRATAMIENTO AEROBIOS/ANÓXICOS O ANAEROBIOS	505
9.10.1. Estanques facultativos	505
9.10.2. Estanques de maduración o terciarios	507
PROBLEMAS	507
BIBLIOGRAFÍA	510
10. PROYECTO DE INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DEL AGUA RESIDUAL	513
10.1. TRATAMIENTOS DE FANGOS ACTIVADOS (CULTIVO AEROBIO EN SUSPENSIÓN)	515
10.1.1. Consideraciones sobre el diseño del proceso	515
10.1.2. Diseño del proceso	526
10.1.3. Tipos de procesos y modificaciones	530
10.1.4. Aireación por difusión	541
10.1.5. Aireadores mecánicos	545
10.1.6. Generación de oxígeno puro	550
10.1.7. Diseño de los tanques de aireación y sus elementos complementarios	552
10.1.8. Diseño de instalaciones para la separación de sólidos	556
10.1.9. Dificultades operacionales	570
10.2. LAGUNAS AIREADAS (CULTIVO AEROBIO EN SUSPENSIÓN)	573
10.2.1. Consideraciones sobre el diseño del proceso	573
10.2.2. Diseño del proceso	579
10.2.3. Separación de sólidos	582
10.3. FILTROS PERCOLADORES (CULTIVO AEROBIO FIJO)	585
10.3.1. Clasificación de los filtros	585
10.3.2. Diseño del proceso	589
10.3.3. Diseño de las instalaciones	593
10.4. PROCESOS COMBINADOS DE TRATAMIENTO AEROBIO	599
10.4.1. Procesos de filtro percolador y fangos activados en serie	599
10.4.2. Procesos de fangos activados y filtros percoladores en serie	600
10.5. ESTANQUES DE ESTABILIZACIÓN	601
10.5.1. Clasificación de los estanques	601
10.5.2. Aplicación	601
10.5.3. Análisis y diseño del proceso	605
10.5.4. Separación de sólidos	614
10.5.5. Diseño de las instalaciones	620
PROBLEMAS	621
BIBLIOGRAFÍA	625

11. PROYECTO DE INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO Y EVACUACIÓN DEL FANGO	628
11.1. DIAGRAMAS DE PROCESOS DE TRATAMIENTO DEL FANGO	630
11.2. PROCEDENCIA, CANTIDAD Y CARACTERÍSTICAS DEL FANGO	631
11.2.1. Procedencia	636
11.2.2. Característica	638
11.2.3. Cantidad	639
11.3. BOMBEO DE FANGOS Y ESPUMAS	644
11.3.1. Bombas	644
11.3.2. Aplicación de las bombas a cada tipo de fango	646
11.3.3. Determinación de la pérdida de carga	647
11.3.4. Tuberías de fangos	651
11.4. OPERACIONES DE PRETRATAMIENTO	652
11.4.1. Dilaceración del fango	652
11.4.2. Desarenado del fango	652
11.4.3. Mezclado del fango	653
11.4.4. Almacenamiento del fango	655
11.5. CONCENTRACIÓN (ESPESADO)	657
11.5.1. Aplicación	658
11.5.2. Descripción de los equipos de espesado	659
11.5.3. Proyecto de espesadores	664
11.6. ESTABILIZACIÓN: PROCESOS QUÍMICO Y TÉRMICO	666
11.6.1. Oxidación con cloro	666
11.6.2. Estabilización con cal	667
11.6.3. Tratamiento térmico	668
11.7. ESTABILIZACIÓN: PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DEL FANGO	668
11.7.1. Descripción del proceso	669
11.7.2. Diseño del proceso	672
11.7.3. Producción, recogida y utilización del gas	679
11.7.4. Mezclado del digestor	682
11.7.5. Calefacción del digestor	682
11.8. ESTABILIZACIÓN: PROCESO DE DIGESTIÓN AEROBIA DEL FANGO	687
11.8.1. Descripción del proceso	688
11.8.2. Digestión aerobia convencional con aire	689
11.8.3. Digestión anaerobia con oxígeno puro	693
11.8.4. Digestión aerobia termófila	694
11.9. ACONDICIONAMIENTO	695
11.9.1. Acondicionamiento químico	695
11.9.2. Elutriación	696
11.9.3. Tratamiento térmico	697
11.9.4. Otros procesos	700
11.10. DESINFECCIÓN	700
11.10.1. Pasteurización	701

11.10.2. Almacenamiento a largo plazo	701
11.11. DESHIDRATACIÓN	702
11.11.1. Filtración al vacío	703
11.11.2. Centrifugación	709
11.11.3. Filtros prensa	712
11.11.4. Filtros de banda horizontales	713
11.11.5. Eras de secado	718
11.11.6. Lagunaje	719
11.12. SECADO TÉRMICO	720
11.12.1. Teoría	720
11.12.2. Opciones de secado térmico	721
11.12.3. Control de la contaminación atmosférica y de los olores ..	724
11.13. COMPOSTAJE	725
11.13.1. Descripción del proceso	725
11.13.2. Opciones de compostaje combinado	726
11.14. REDUCCIÓN TÉRMICA	727
11.14.1. Fundamentos del proceso	728
11.14.2. Procesos de reducción térmica	731
11.15. PREPARACIÓN DE BALANCES DE MASA DE SÓLIDOS ...	737
11.15.1. Bases para la preparación de balances de masa	738
11.15.2. Datos de rendimiento para instalaciones de tratamiento de fangos	738
11.16. TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y EVACUACIÓN DEL FANGO Y SÓLIDOS	750
11.16.1. Métodos de transporte	750
11.16.2. Almacenamiento de fango	753
11.16.3. Evacuación final	754
PROBLEMAS	756
BIBLIOGRAFÍA	760
12. TRATAMIENTO AVANZADO DEL AGUA RESIDUAL	763
12.1. EFECTOS DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS PRESENTES EN EL AGUA RESIDUAL	764
12.2. PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIOS Y DIAGRAMAS DE PROCESO	765
12.2.1. Clasificación	765
12.2.2. Selección del proceso y desarrollo de los diagramas de trata- miento	765
12.2.3. Datos típicos del rendimiento del proceso	766
12.3. CONVERSIÓN Y ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO	766
12.3.1. Formas del nitrógeno	766
12.3.2. Fuentes del nitrógeno	767
12.3.3. Operaciones y procesos para el control del nitrógeno	767
12.4. NITRIFICACIÓN	776
12.4.1. Procesos de nitrificación	776
12.4.2. Estequiometría de la nitrificación	779

12.4.3. Análisis del proceso (nitrificación)	780
12.4.4. Aplicaciones del proceso	788
12.5. DESNITRIFICACIÓN Y NITRIFICACIÓN-DESNITRIFICACIÓN	790
12.5.1. Procesos de desnitrificación	790
12.5.2. Estequiometría de la desnitrificación	797
12.5.3. Análisis del proceso (desnitrificación)	798
12.5.4. Aplicación del proceso	801
12.6. ELIMINACIÓN DEL NITRÓGENO POR PROCESOS FÍSICOS	804
12.6.1. Separación del amoníaco por arrastre con aire (air stripping)	804
12.6.2. Cloración al breakpoint	810
12.6.3. Intercambio iónico	812
12.7. ELIMINACIÓN DEL FÓSFORO	815
12.7.1. Formas del fósforo	816
12.7.2. Operaciones y procesos para la eliminación del fósforo	816
12.7.3. Comparación de procesos	823
12.8. ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA REFRACTARIA	823
12.8.1. Adsorción sobre carbón	823
12.8.2. Oxidación química	823
12.9. ELIMINACIÓN DE SUSTANCIAS ORGÁNICAS DISUELTAS	825
12.9.1. Precipitación química	825
12.9.2. Intercambio iónico	826
12.9.3. Ósmosis inversa (hiperfiltración)	827
12.9.4. Electrodiálisis	828
12.10. EVACUACIÓN FINAL DE CONTAMINANTES	829
PROBLEMAS	829
BIBLIOGRAFÍA	831
13. SISTEMAS DE TRATAMIENTO POR APLICACIÓN AL TERRENO	833
13.1. DESARROLLO DE SISTEMAS DE APLICACIÓN AL TERRENO	833
13.1.1. Evolución histórica	834
13.1.2. Aplicación al terreno del agua residual	835
13.1.3. Aplicación del fango al terreno	840
13.2. CONSIDERACIONES FUNDAMENTALES EN LOS SISTEMAS DE APLICACIÓN AL TERRENO	840
13.2.1. Características del agua residual y mecanismos de tratamiento	840
13.2.2. Vegetación	843
13.2.3. Salud pública	844
13.3. SISTEMAS DE RIEGO	847
13.3.1. Objetivos de proyecto	847
13.3.2. Selección del emplazamiento	848
13.3.3. Tratamiento previo a la aplicación	849
13.3.4. Clima y almacenamiento	850
13.3.5. Cargas aplicadas	850
13.3.6. Necesidades del terreno	855
13.3.7. Selección del cultivo	855
13.3.8. Técnicas de distribución	858

13.3.9. Sistemas de drenaje	862
13.3.10. Control de la escorrentía superficial	863
13.3.11. Estudio de un caso particular (Muskegon, Michigan)	865
13.4. SISTEMAS DE INFILTRACIÓN RÁPIDA	871
13.4.1. Objetivos de proyecto	872
13.4.2. Selección del lugar	873
13.4.3. Tratamiento previo a la aplicación	873
13.4.4. Clima y almacenamiento	873
13.4.5. Magnitud de las cargas	874
13.4.6. Técnicas de distribución	876
13.4.7. Ciclos de aplicación	877
13.4.8. Control del flujo subterráneo	877
13.5. SISTEMAS DE RIEGO POR CIRCULACIÓN SUPERFICIAL EN LÁMINA	881
13.5.1. Objetivos de diseño	882
13.5.2. Elección del emplazamiento	882
13.5.3. Tratamiento previo a la aplicación	882
13.5.4. Clima y almacenamiento	883
13.5.5. Tasas de aplicación	884
13.5.6. Superficie necesaria	886
13.5.7. Características de los bancales	886
13.5.8. Elección de la vegetación	886
13.5.9. Técnicas de distribución	886
13.5.10. Recogida de la escorrentía	888
13.6. OTROS SISTEMAS	888
13.6.1. Aplicación a tierras pantanosas	888
13.6.2. Acuicultura	891
13.7. APLICACIÓN DEL FANGO AL TERRENO	893
13.7.1. Objetivos	893
13.7.2. Características del fango	894
13.7.3. Elección del emplazamiento	895
13.7.4. Consideraciones respecto a la comercialización del fango	896
13.7.6. Métodos de operación	897
PROBLEMAS	904
BIBLIOGRAFÍA	905
14. EVACUACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE EFLUENTES	909
14.1. CONTROL DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA	910
14.1.1. Normas sobre aguas receptoras	910
14.1.2. Normas sobre efluentes	911
14.1.3. Establecimiento de normas	911
14.1.4. Eliminación de efluentes por dilución	912
14.2. VERTIDO A LAGOS	913
14.2.1. Análisis del problema	913
14.2.2. Estratificación en grandes lagos	915
14.3. VERTIDO EN RÍOS	917

14.3.1. Reoxigenación en ríos	917
14.3.2. Agotamiento del oxígeno en los ríos	918
14.3.3. Desarrollo del modelo de agotamiento del oxígeno	920
14.3.4. Proyecto de emisarios de vertidos a ríos	926
14.4. EVACUACIÓN A ESTUARIOS	927
14.4.1. Análisis matemático de estuarios	928
14.4.2. Determinación del coeficiente de difusión turbulenta	930
14.5. VERTIDO AL MAR	931
14.5.1. Estimación de la dilución inicial	933
14.5.2. Dilución debida a la dispersión	935
14.5.3. Dilución debida a la descomposición del residuo	937
14.5.4. Diseño del emisario	938
14.6. REUTILIZACIÓN DIRECTA E INDIRECTA DEL AGUA RESI- DUAL	943
14.6.1. Reutilización municipal	944
14.6.2. Reutilización industrial	944
14.6.3. Reutilización agrícola	944
14.6.4. Reutilización en zonas de recreo	945
14.6.5. Recarga de acuíferos	945
PROBLEMAS	945
BIBLIOGRAFÍA	948
APÉNDICES	950
ÍNDICE ALFABÉTICO	956