

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES	15
1.1 Fuentes de aguas residuales	17
1.2 Características de las aguas residuales	19
1.3 Efectos de polución por las aguas residuales	23
1.4 Características de importancia en aguas residuales	27
Acidez	28
Ácido sulfhídrico	28
Actinomiçes	29
Alcalinidad	29
Algas	30
Bacterias	31
Bioensayos	33
Ejemplo 1.1	34
Carbohidratos	35
Carbono orgánico total (COT)	35
Cloruros	36
Coliformes	36
Color	37
Compuestos orgánicos volátiles	37
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	38
DBO nitrogenácea	41
Ejemplo 1.2	42
Ejemplo 1.3	43
Cálculo de K y L	43
Método de los mínimos cuadrados para el cálculo de K y L	43
Método de Thomas para el cálculo de K y L	45
Ejemplo 1.4	47
Ejemplo 1.5	48
Ejemplo 1.6	49
Ejemplo 1.7	51
Ejemplo 1.8	52
Ejemplo 1.9	52
Ejemplo 1.10	53
Ejemplo 1.11	53

Ejemplo 1.12	53
Demanda química de oxígeno (DQO)	54
Demanda teórica de oxígeno	55
Ejemplo 1.13	55
Ejemplo 1.14	56
Ejemplo 1.15	56
Detergentes, SAAM	57
Dióxido de carbono	57
Fenoles	58
Fósforo	58
Grasas y aceites	59
Hongos	59
Materia orgánica	60
Metales pesados	60
Metano	61
Nitrógeno	61
Nocardia	62
Olor	62
Oxígeno disuelto	64
Pesticidas	65
pH	66
POR	67
Proteínas	67
Protozoos	68
Sólidos	68
Sulfatos	68
Sulfuros	69
Temperatura	70
Turbiedad	70
Virus	71
Problemas	71
CAPÍTULO 2. MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES	73
<hr/>	
2.1 Muestreo	75
Ejemplo 2.1	77
Ejemplo 2.2	78
Muestreo manual	78
Preservativos	79
Volumen de la muestra	80
Monitoreo	80
2.2 Aforo	80
Vertederos	82
Canaleta Parshall	88
Ejemplo 2.3	90
Medidores de velocidad	92
Ecuación de Manning	92
Ejemplo 2.4	92

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	95
3.1 Cifras significativas	98
3.2 Redondeo	99
3.3 Distribución normal	100
3.4 Promedios	102
Promedio aritmético	102
Promedio geométrico	102
Promedio ponderado	103
Mediana	104
Moda	104
Cuartiles, deciles, percentiles	104
3.5 Desviación estándar	105
3.6 Límites de confianza	106
3.7 Desviación estándar relativa o coeficiente de variación	108
3.8 Intervalo	109
3.9 Sesgo	109
3.10 Curtosis	110
3.11 Error estándar del promedio	111
3.12 Varianza	111
3.13 Distribución LOG normal	112
3.14 Rechazo de datos	112
3.15 Métodos de análisis	113
Método A	114
Método B	114
3.16 Ejemplo método A	115
3.17 Ejemplo método B	116
3.18 Ejemplo	117
3.19 Medida de la exactitud de un ensayo	121
3.20 Medida de la precisión de un ensayo	123
Desviación promedio	123
3.21 Coeficiente de correlación (r)	124
3.22 Muestreo	125
3.23 Verificación de la corrección de un análisis	125
Problema	126
CAPÍTULO 4. OBJETIVOS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	127
Requisitos de tratamiento	131
CAPÍTULO 5. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	137
Tratamiento de contaminantes inorgánicos	148
Arsénico	149
Bario	149
Cadmio	149
Cianuro	149
Cobre	150
Cromo hexavalente	150

Cromo total	151
Fluoruros	151
Hierro	151
Manganeso	152
Mercurio	152
Níquel	153
Plata	153
Plomo	153
Selenio	153
Zinc	153
CAPÍTULO 6. CARGAS CONTAMINANTES	155
<hr/>	
Ejemplo 6.1	159
Ejemplo 6.2	159
CAPÍTULO 7. COSTOS	163
<hr/>	
7.1 Costos de plantas de tratamiento de aguas residuales	165
Costos de operación y mantenimiento	168
7.2 Costos de alcantarillado	169
Ejemplo	169
7.3 Comparación de costos	171
Ejemplo	173
Ejemplo	173
Ejemplo	174
CAPÍTULO 8. PRINCIPIOS DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PTAR	177
<hr/>	
8.1 Diseño	179
8.2 Operación y mantenimiento	183
Arranque del sistema de tratamiento	185
CAPÍTULO 9. BIOLÓGICA DE LAS AGUAS RESIDUALES	187
<hr/>	
9.1 Organismos del agua residual	189
Bacterias	191
Coliformes	193
Hongos	194
Algas	194
Protozoos	194
Rotíferos	195
Crustáceos	195
Virus	195
Plancton	196
Perifitón	196
Macrofitón	196
Macroinvertebrados bénticos	196

	Nematodos	196
	Platelmintos	197
	Peces	197
9.2	Requerimientos nutricionales de los microorganismos	197
9.3	Crecimiento microbioal	199
	Cinética del crecimiento microbioal	202
	Utilización de sustrato	206
	Tasa de crecimiento neto	207
	Efecto de la temperatura	209
	Consideraciones sobre el estado permanente de un reactor biológico	210
9.4	El sistema sapróbico	212
9.5	Clasificación sapróbica de calidad del agua del ENA	217
	Índice de calidad del agua	218
	Ejemplos de clasificación sapróbica	219
CAPÍTULO 10. PRINCIPIOS DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO		223
10.1	Oxidación biológica	226
10.2	Proceso aerobio	229
10.3	Proceso anaerobio	233
	Producción de metano	240
	Crecimiento biológico anaerobio	243
10.4	Aspectos comparativos	244
10.5	Proceso anóxico	246
10.6	Consideraciones ambientales	249
	Dosificación de nutrientes	253
CAPÍTULO 11. REACTORES Y SUS MODELOS		255
11.1	Tipos de reactores	259
11.2	Reactor de cocheda con mezcla completa	260
	Ejemplo	261
11.3	Reactor de flujo continuo y mezcla completa	262
11.4	Remoción de DBO en reactores de mezcla completa y flujo continuo	263
11.5	Remoción de DBO en reactores de mezcla completa en serie	265
11.6	Reactor de flujo en pistón	266
11.7	Reactor de flujo en pistón con dispersión longitudinal	268
11.8	Comparación de la eficiencia de remoción de DBO en reactores de mezcla completa y flujo en pistón	270
11.9	Remoción de DBO con cinética de segundo orden	271
11.10	Ejemplo	272
11.11	Ejemplo	272
11.12	Ejemplo	274
11.13	Ejemplo	275
11.14	Ejemplo	275
11.15	Ejemplo	276
11.16	Ejemplo	276
11.17	Ejemplo	277

11.18 Ejemplo	278
11.19 Ejemplo	278
11.20 Ejemplo	279
11.21 Ejemplo	279
11.22 Ejemplo	281
Problemas	283
CAPÍTULO 12. CRIBAS Y DESARENADORES	285
12.1 Cribado	287
Pérdidas en rejillas	288
Cantidades de material retenido	289
Disposición del material retenido	290
12.2 Ejemplo	292
12.3 Desarenadores	293
Desarenadores de flujo horizontal	294
Cantidad de arena	295
Disposición de la arena	295
12.4 Ejemplo	296
Problemas	301
CAPÍTULO 13. IGUALAMIENTO	303
13.1 Generalidades	305
13.2 Cálculo del volumen del tanque de igualamiento	306
13.3 Ejemplo	307
13.4 Cálculo del efecto del igualamiento	309
13.5 Ejemplo	313
13.6 Construcción de tanques de igualamiento	316
Problemas	316
CAPÍTULO 14. NEUTRALIZACIÓN	319
14.1 Introducción	321
14.2 Fundamentos	322
14.3 Métodos	329
14.4 Control	333
14.5 Ejemplo	334
14.6 Lechos de caliza	335
Procedimiento experimental	336
14.7 Ejemplo	338
14.8 Ejemplo	340
CAPÍTULO 15. FLOTACIÓN	343
15.1 Generalidades	345
15.2 Flotación por aire disuelto (FAD)	345
15.3 Fundamentos teóricos	350
15.4 Parámetros de diseño	353

15.5	Celda de flotación	356
15.6	Ejemplo	359
15.7	Ejemplo	359
15.8	Ejemplo	361
15.9	Problema	363
15.10	Separador de aceite API	363
15.11	Ejemplo	366
	Problemas	370
CAPÍTULO 16. AIREACIÓN		373
16.1	Principios	376
16.2	Concentración de saturación de gases en el agua	379
16.3	Ejemplo	380
16.4	Ejemplo	381
16.5	Evaluación del coeficiente de transferencia $K_L a$	382
16.6	Ejemplo	384
16.7	Equipos de aireación	388
16.8	Mezcla	399
16.9	Diseño de sistemas de aireación	402
	Ejemplo	404
16.10	Diseño de sistemas de aireación difusa	406
	Compresores	407
	Ejemplo	409
	Ejemplo	410
	Ejemplo (adaptado de la referencia 34)	410
16.11	Diseño de sistemas de aireación de turbina	413
	Ejemplo (adaptado de la referencia 34)	414
	Problemas	416
CAPÍTULO 17. LODOS ACTIVADOS		419
	El diagrama de predominio relativo	425
	Punto A	426
	Punto B	426
	Punto C	428
	Punto D	428
	Punto E	429
17.1	Sistema convencional de lodos activados	431
17.2	Sistema convencional con aireación gradual	435
17.3	Sistema convencional con aireación escalonada	436
17.4	Proceso de mezcla completa	437
17.5	Proceso Kraus	438
17.6	Proceso de tasa alta	438
17.7	Proceso de estabilización y contacto	439
17.8	Proceso de aireación prolongada	440
17.9	Proceso de oxígeno puro	441
17.10	Aireación	441

17.11	Requisitos nutricionales	444
	Dosificación de nutrientes	445
17.12	Parámetros de diseño para procesos de lodos activados	446
17.13	Modelo de mezcla completa sin recirculación	455
17.14	Modelo cinético de mezcla completa con recirculación	462
17.15	Determinación de los coeficientes cinéticos en reactores de mezcla completa	467
	Ejemplo	469
17.16	Modelo de flujo en pistón con recirculación	471
17.17	Características de los lodos activados	473
17.18	Hinchamiento y levantamiento de lodos	481
	Causas del problema	482
	Control operativo	484
	Corrección del problema	487
17.19	Significado del tiempo promedio de retención celular	489
17.20	Diseño de un proceso de lodos activados	490
	1. Datos necesarios	490
	2. Tratamiento primario	491
	3. Parámetros de diseño	491
	4. Ejemplos de diseño	491
17.21	Ejemplo	497
17.22	Reactor secuencial de cochada	499
	Problemas	500
CAPÍTULO 18. ZANJONES DE OXIDACIÓN		503
18.1	Introducción	505
18.2	Historia	506
18.3	Parámetros de diseño	506
18.4	Aireación	510
18.5	Producción de lodos	513
18.6	Ejemplo	513
18.7	Zanjón de oxidación de Cota	515
18.8	Ejemplo	518
18.9	Diseños típicos de zanjonés de oxidación	522
CAPÍTULO 19. LAGUNAS AIREADAS		525
19.1	Descripción	527
19.2	Requisitos de diseño	528
19.3	Características de remoción de DBO	528
	Determinación experimental de K	534
19.4	Requerimientos de oxígeno para oxidación biológica	534
19.5	Temperatura en lagunas aireadas	536
19.6	Relaciones de transferencia de oxígeno	536
19.7	Requisitos de mezcla	538
19.8	Configuración y disposición de los aireadores	539
19.9	Concentración de biomasa en la laguna	540
19.10	Producción de lodos	541
19.11	Clarificación y depuración del efluente	541

19.12 Optimización del diseño de lagunas aireadas en serie	542
19.13 Ejemplo	543
19.14 Ejemplo	545
Problemas	549
CAPÍTULO 20. FILTROS BIOLÓGICOS	551
20.1 Tipos de filtros percoladores	559
20.2 Diseño de filtros percoladores	561
Modelo general de diseño	561
20.3 Modelo de Eckenfelder	563
20.4 Ecuaciones del NRC	565
Para filtros primarios o de una etapa	566
Para filtros de segunda etapa	567
20.5 Modelo de Bruce y Merkens	567
20.6 Diseño de filtros percoladores con datos experimentales	569
20.7 Ejemplo	573
20.8 Fórmula de Oleszkiewicz	579
20.9 Modelo de Germain	582
20.10 Ejemplo de diseño según modelo de Germain	583
20.11 Ejemplo de diseño sin recirculación según modelo de Bruce y Merkens	585
20.12 Ejemplo de diseño con recirculación según modelo de Bruce y Merkens	586
20.13 Cálculo de la eficiencia de filtros de dos etapas	587
20.14 Ejemplo de diseño según ecuaciones del NRC	588
20.15 Ejemplo de diseño planta de dos etapas	590
20.16 Ejemplo de diseño planta de dos etapas	593
20.17 Procesos combinados	596
Biofiltro activado	596
Biofiltro – Contacto de sólidos	597
Biofiltro de desbaste – Lodos activados	598
Biofiltro – Lodos activados	598
Filtro percolador – Lodos activados	599
20.18 Sistemas de filtros percoladores	599
Problemas	603
CAPÍTULO 21. BIODISCOS	607
21.1 Introducción	609
21.2 Modelo cinético	610
21.3 Modelo de Wu	612
21.4 Tipos de biodiscos	614
21.5 Microbiología	621
21.6 Ejemplo planta de biodiscos	622
Condiciones de diseño	622
Tanque de sedimentación final	625
21.7 Ejemplo de cálculo de los coeficientes cinéticos p y K	626
21.8 Método de Steels	627

Ejemplo	627
Problemas	630
CAPÍTULO 22. SEDIMENTACIÓN DE AGUAS RESIDUALES	631
22.1 Tanques primarios de sedimentación	635
Ejemplo	643
22.2 Tanques de sedimentación intermedia	644
22.3 Tanques secundarios de sedimentación	644
Ejemplo	645
22.4 Tanques de sedimentación química	647
22.5 Tanques de flujo ascensional para plantas pequeñas	647
22.6 Diseño con base en ensayos de sedimentación en cochada	649
22.7 Ejemplo	653
Problemas	655
CAPÍTULO 23. FILTRACIÓN DE AGUAS RESIDUALES	657
23.1 Generalidades	659
23.2 Tipos de filtros	662
23.3 Criterios de diseño	666
Recomendaciones generales de diseño	673
23.4 Control y limpieza	673
Problemas	677
CAPÍTULO 24. SISTEMAS ANAEROBIOS	679
24.1 Tanque Imhoff	683
24.2 Tanque séptico	688
Capacidad	688
Ejemplo	689
Especificaciones	693
24.3 Proceso anaerobio de contacto	694
24.4 Proceso ascensional de manto de lodos anaerobio	696
24.5 Planta de tratamiento de aguas residuales Río Frío, Bucaramanga	703
24.6 Filtro anaerobio de flujo ascensional	706
24.7 Filtro anaerobio de flujo en descenso	708
24.8 Proceso anaerobio de película adherida y lecho expandido	710
24.9 Reactor anaerobio de pantallas	714
24.10 Proceso anaerobio de dos fases	715
24.11 Control y monitoreo	715
CAPÍTULO 25. TRATAMIENTO EN EL MISMO SITIO	721
25.1 El suelo como un sistema de tratamiento y disposición de aguas residuales	723
25.2 Tanque séptico	726
25.3 Trampa para grasas	727
25.4 Campos de infiltración	730
Zanjas de infiltración	732

Ejemplo	734
Requisitos de construcción	735
Lechos de infiltración	736
Requisitos de construcción	736
Pozo de infiltración	737
Ejemplo	738
Montículos	739
25.5 Filtros intermitentes de arena	741
25.6 Sistema de distribución a presión para filtros de arena	744
Ejemplo	748
25.7 Tanque séptico - Filtro anaerobio	750
25.8 Laguna de evaporación/infiltración	751
Ejemplo	752
CAPÍTULO 26. TRATAMIENTO DE LODOS	755
<hr/>	
26.1 Tipos de lodos	757
26.2 Características de los lodos	758
Ejemplo	763
Ejemplo	765
Ejemplo	767
Ejemplo	768
Ejemplo	768
26.3 Flujo de lodos	769
Ejemplo	770
26.4 Producción de lodos	772
26.5 Métodos de tratamiento de lodos	775
26.6 Espesamiento de lodos de aguas residuales	779
Espesamiento por gravedad	779
Ejemplo	784
Espesamiento por flotación	784
26.7 Digestión anaerobia de lodos de aguas residuales	787
Diseño	793
Producción de gas	793
Reducciones de sólidos volátiles	794
Diseño con base en la edad de lodos	796
Ejemplo	797
Configuración	799
Mezcla	799
26.8 Digestión aerobia de lodos de aguas residuales	801
Ejemplo	804
Volumen del digester aerobio	805
Ejemplo	806
26.9 Estabilización con cal	807
26.10 Acondicionamiento de lodos	808
Ensayos de acondicionamiento de lodos	809
Ejemplo	811
Acondicionamiento químico inorgánico	813

Acondicionamiento químico orgánico	814
Acondicionamiento térmico	815
Elutriación	816
Acondicionamiento con permanganato de potasio	817
26.11 Secado de lodos	817
Filtración al vacío	818
Ejemplo	822
Centrifugación	823
Filtros a presión de correas	824
Ejemplo	827
Filtros prensa de placas	828
Lechos de secado de arena	831
Lagunas de secado de lodos	834
26.12 Compostaje de lodos	835
26.13 Incineración de lodos	843
26.14 Disposición de lodos sobre el suelo	848
Requisitos	849
Tasas de aplicación	852
Nutrientes	856
Nitrógeno	856
Fósforo	858
Área requerida	859
Lodos de tanques sépticos	860
Ejemplo	860
26.15 Disposición en rellenos de lodos	864
Capacidad del relleno	864
Métodos de construcción	864
Uso del sitio	866
Recubrimiento	869
Tapa	869
Coberturas	871
Recolección y tratamiento de lixiviados	872
26.16 Lechos de cañas para secado de lodos	878
26.17 Vermiestabilización	880
Problemas	880
CAPÍTULO 27. TRATAMIENTO ACUÁTICO	883
<hr/>	
27.1 Principales plantas acuáticas	886
Jacinto de agua (<i>Eichhornia crassipes</i>)	886
Lenteja de agua (<i>Lemna sp.</i> , <i>Spirodela sp.</i> , <i>Wolffia sp.</i> , <i>Wolffiella sp.</i>)	887
Vellorita o primavera de agua (<i>Ludwigia sp.</i>)	888
Espadaña (<i>Typha sp.</i>)	888
Anea o enea (<i>Scirpus sp.</i>)	888
Cañas	889
Hierba mala (<i>Elodea nuttallii</i>)	889
27.2 Tratamiento con jacintos	890
27.3 Tratamiento con lenteja de agua	893

27.4 Humedales	893
Humedales con espejo de agua	893
Ejemplo 27.1	897
Humedales de flujo subsuperficial	898
Ejemplo 27.2	901
CAPÍTULO 28. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES SOBRE EL SUELO	905
28.1 Sistemas de tratamiento sobre el suelo	907
28.2 Proceso de tasa lenta o irrigación	917
Carga hidráulica de diseño para sistemas tipo 1	920
Carga hidráulica de diseño para sistemas tipo 2	921
Carga hidráulica de diseño con base en una concentración limitante de nitrógeno	922
Carga hidráulica de diseño con base en la carga orgánica	923
Área requerida	923
Ejemplo 29.1 cálculo del área para un sistema de tasa lenta	924
Almacenamiento requerido	925
Ejemplo 28.2 Diseño de un sistema de tasa lenta	926
Ejemplo 28.3 Cálculo de la carga hidráulica con base en los requerimientos de agua para riego, para un sistema de tasa lenta tipo 2	929
Datos	929
Cálculos	929
28.3 Procesos de infiltración rápida (IR)	930
Diseño	931
Ejemplo 28.4	939
28.4 Proceso de flujo sobre el suelo	940
Ejemplo 28.5	946
28.5 Calidad del agua para riego	946
Clases según la conductividad	948
Clases según el contenido del sodio	948
Boro	950
Bicarbonatos	951
Problemas	954
CAPÍTULO 29. DISPOSICIÓN DE EFLUENTES	955
29.1 Autopurificación	957
29.2 Reaireación	960
29.3 El río como un sistema de tratamiento de aguas residuales	962
Zona de descomposición	962
Zona de descomposición activa	963
Zona de recuperación	964
Zona de agua limpia	964
29.4 Indicadores biológicos de polución	965
Crecimiento bacterial en ríos	967
Método de Ruth Patrick para medir las condiciones de un río	969
Sistema sapróbico	972

29.5	Cargas en ríos	972
	Transformación de una fuente puntual	974
	Transformación de una fuente no puntual	975
29.6	Ejemplo	977
	Contaminantes conservativos	980
29.7	Factores que afectan la autpurificación	980
29.8	Remoción de DBO	981
29.9	Formulación de modelos de OD en ríos	982
	Modelo de Streeter y Phelps	984
	Cálculo de la concentración de saturación de OD	988
	Determinación de la constante de desoxigenación (K_1)	989
	Reaireación de ríos	991
	Ecuación de reaireación de Texas	992
	Ecuación de O'Connor y Dobbins	992
	Ecuación de Churchill	993
	Ecuación de Owens	993
	Ecuación de Langbein y Durum	993
	Ecuación de Tsivoglou y Wallace	994
	Demanda bental de oxígeno	995
	Efectos de la desinfección sobre el número de bacterias en ríos	998
	Carga máxima permisible de DBO	999
29.10	Modelo de OD con nitrificación	999
29.11	QUAL2E: modelo para simulación de calidad del agua en ríos	1002
	Representación del prototipo	1002
	Limitaciones del modelo	1003
	Archivo de salida	1004
	Datos de entrada	1004
29.12	Ejemplo	1006
29.13	Ejemplo	1009
	Esquema ilustrativo	1009
REFERENCIAS		1013
APÉNDICES		1025
A.	Propiedades físicas del agua a 1 atm	1027
B.	Propiedades físicas del agua	1028
C.	Valores de saturación de oxígeno disuelto, en agua, en función de la temperatura y la concentración de cloruros a 760 mm Hg	1029
D.	Propiedades físicas del aire a 20°C	1030
E.	Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000, del Ministerio de Desarrollo Económico de la República de Colombia, RAS - 2000, Título E	1030
F.	Ejemplo de diseño de un desarenador con canaleta Parshall	1200
G.	Caudal de diseño PTARM (adaptado de RAS-2000)	1207
ABREVIATURAS Y SIGLAS		1211
ÍNDICES		1215
	Índice de tablas	1217
	Índice de figuras	1225
	Índice analítico	1233