

# Índice general

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Prólogo</b>  | <b>XI</b> |
| <b>1. El agua</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Introducción . . . . .                               | 1         |
| 1.2. Composición del agua . . . . .                       | 4         |
| 1.3. Propiedades físicas del agua . . . . .               | 5         |
| 1.4. Sinopsis de la química del agua . . . . .            | 9         |
| 1.4.1. Solubilidad. Efecto del ión común . . . . .        | 10        |
| 1.4.2. Precipitaciones químicas . . . . .                 | 12        |
| 1.4.3. Autoprotolisis del agua. pH . . . . .              | 13        |
| 1.4.4. Fuerza de los ácidos y bases . . . . .             | 14        |
| 1.4.5. Hidrólisis . . . . .                               | 15        |
| 1.4.6. Concentración activa . . . . .                     | 21        |
| 1.4.7. Oxidación reducción . . . . .                      | 27        |
| 1.4.8. rH . . . . .                                       | 37        |
| 1.4.9. Cambio iónico . . . . .                            | 38        |
| 1.5. Agua en la atmósfera: lluvia ácida natural . . . . . | 45        |
| <b>2. Oxígeno disuelto</b>                                | <b>47</b> |
| 2.1. Introducción . . . . .                               | 47        |
| 2.2. Solubilidad del oxígeno . . . . .                    | 47        |
| 2.3. Regulación de los vertidos en los ríos . . . . .     | 52        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 2.4.      | Autodepuración de los ríos . . . . .                                      | 54        |
| 2.4.1.    | Desoxigenación . . . . .  | 55        |
| 2.4.2.    | Reoxigenación . . . . .   | 56        |
| 2.4.3.    | Déficit de concentración de oxígeno . . . . .                             | 56        |
| 2.4.4.    | Evolución de la concentración de oxígeno causada por un vertido . . . . . | 59        |
| 2.4.5.    | Determinación de las constantes de la autodepuración . . . . .            | 60        |
| 2.5.      | Amperometría del oxígeno disuelto . . . . .                               | 61        |
| 2.6.      | Oxímetros . . . . .   | 63        |
| 2.7.      | Calibración de los oxímetros . . . . .                                    | 64        |
| <b>3.</b> | <b>Demanda bioquímica de oxígeno</b>                                      | <b>67</b> |
| 3.1.      | Introducción . . . . .  | 67        |
| 3.2.      | Cálculo de la fórmula empírica del agua residual . . . . .                | 67        |
| 3.2.1.    | Rendimiento de producción de lodos . . . . .                              | 70        |
| 3.3.      | Requerimientos nutricionales de la DBO . . . . .                          | 71        |
| 3.4.      | Conceptos relacionados con la DBO . . . . .                               | 72        |
| 3.5.      | Medidores de la DBO . . . . .   | 74        |
| 3.6.      | Cinética de la DBO . . . . .  | 77        |
| 3.7.      | Determinación de las constantes cinéticas de la DBO . . . . .             | 78        |
| 3.7.1.    | Cálculo de la determinación de la DBO . . . . .                           | 79        |
| <b>4.</b> | <b>Demanda química de oxígeno</b>   | <b>83</b> |
| 4.1.      | Introducción . . . . .  | 83        |
| 4.2.      | Definición de la DQO . . . . .  | 84        |
| 4.3.      | Demanda química de oxígeno de sustancias puras . . . . .                  | 84        |
| 4.4.      | Patrón para la medida de la DQO . . . . .                                 | 86        |
| 4.5.      | Interferencias en la determinación de la DQO . . . . .                    | 87        |
| 4.6.      | Procedimiento y reactivos de la DQO . . . . .                             | 87        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 4.7.      | Determinación de la absorptividad . . . . .                  | 89         |
| 4.7.1.    | Determinación de la $f$ de patrones . . . . .                | 91         |
| 4.8.      | Demanda total de oxígeno . . . . .                           | 93         |
| 4.9.      | Carbono orgánico total . . . . .                             | 93         |
| 4.10.     | Coefficientes de transformación . . . . .                    | 94         |
| 4.10.1.   | Relación de lodos activos y absorción de nitrógeno . . . . . | 96         |
| 4.11.     | Cálculo de muestras compuestas . . . . .                     | 97         |
| <b>5.</b> | <b>Modelos dinámicos de tanques</b>                          | <b>101</b> |
| 5.1.      | Introducción . . . . .                                       | 101        |
| 5.2.      | Modelo dinámico de un tanque . . . . .                       | 102        |
| 5.3.      | Análisis de un tanque de mezcla perfecta . . . . .           | 108        |
| 5.4.      | Transferencia de oxígeno-agua . . . . .                      | 115        |
| 5.5.      | Diseño de tanques reguladores de caudal . . . . .            | 119        |
| 5.6.      | Simulación dinámica de un ecualizador . . . . .              | 124        |
| <b>6.</b> | <b>Sedimentación de sólidos floculentos</b>                  | <b>131</b> |
| 6.1.      | Introducción . . . . .                                       | 131        |
| 6.2.      | Generalidades de lodos activos . . . . .                     | 131        |
| 6.3.      | Velocidad de sedimentación . . . . .                         | 136        |
| 6.4.      | Flujo de sólidos en el sedimentador . . . . .                | 141        |
| 6.5.      | Modelización del sedimentador secundario . . . . .           | 145        |
| 6.5.1.    | Modelo dinámico simplificado del sedimentador . . . . .      | 145        |
| 6.5.2.    | Modelo dinámico riguroso del sedimentador . . . . .          | 146        |
| 6.6.      | Determinación de retrasos y derivadas . . . . .              | 155        |
| <b>7.</b> | <b>Cinética de reacciones y reactores</b>                    | <b>159</b> |
| 7.1.      | Introducción . . . . .                                       | 159        |
| 7.2.      | Reacciones homogéneas . . . . .                              | 160        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 7.3.      | Dependencia de la concentración . . . . .  | 166        |
| 7.3.1.    | Método integral de análisis de datos . . . . .                                     | 166        |
| 7.3.2.    | Método diferencial de análisis de datos . . . . .                                  | 173        |
| 7.4.      | Reacción de biodegradación . . . . .   | 175        |
| 7.4.1.    | Dependencia de la temperatura . . . . .  | 178        |
| 7.4.2.    | Dependencia del pH . . . . .   | 181        |
| 7.4.3.    | Limitación por nutrientes . . . . .  | 184        |
| 7.5.      | Reactores químicos . . . . .   | 184        |
| 7.5.1.    | Reactor continuo de mezcla perfecta . . . . .                                      | 185        |
| 7.5.2.    | Reactor de flujo pistón . . . . .  | 187        |
| 7.6.      | Modelización de la degradación de la materia carbonácea . . . . .                  | 193        |
| 7.7.      | Reactores reales . . . . .   | 195        |
| 7.7.1.    | Análisis de reactores en serie con trazadores . . . . .                            | 198        |
| 7.8.      | Características de los reactores biológicos en la depuración de<br>aguas . . . . . | 201        |
| 7.8.1.    | Reactor de mezcla completa . . . . .   | 201        |
| 7.8.2.    | Reactor de flujo pistón . . . . .  | 202        |
| 7.8.3.    | Reactores de mezcla perfecta en cascada . . . . .                                  | 203        |
| 7.8.4.    | Proceso contacto estabilización . . . . .  | 204        |
| 7.8.5.    | Proceso de alimentación escalonada . . . . .                                       | 205        |
| 7.9.      | Redimensionando reactores . . . . .  | 205        |
| <b>8.</b> | <b>Modelado del proceso de lodos activos</b>                                       | <b>215</b> |
| 8.1.      | Introducción . . . . .   | 215        |
| 8.2.      | Velocidad de dilución y lavado del reactor . . . . .                               | 217        |
| 8.2.1.    | Reactor biológico sin recirculación . . . . .                                      | 217        |
| 8.3.      | Reactor biológico con recirculación . . . . .                                      | 220        |
| 8.4.      | Tasa de crecimiento y edad de lodos . . . . .                                      | 222        |
| 8.5.      | Relación de recirculación de lodos . . . . .                                       | 224        |

|   |            |
|---|------------|
| 8.6. Modelo matemático del reactor biológico . . . . .            | 225        |
| 8.7. Modelo matemático del tratamiento secundario . . . . .       | 232        |
| 8.7.1. Modelo dinámico del proceso de lodos activos . . . . .     | 233        |
| 8.7.2. Modelo estacionario del proceso de lodos activos . . . . . | 238        |
| <b>9. Respirometría de lodos activos</b>                          | <b>243</b> |
| 9.1. Introducción . . . . .                                       | 243        |
| 9.2. Oxidación bioquímica . . . . .                               | 244        |
| 9.3. Consumo específico de oxígeno . . . . .                      | 245        |
| 9.4. Respirogramas . . . . .                                      | 249        |
| 9.4.1. Determinación de la DBO en tiempo corto . . . . .          | 250        |
| 9.5. Toxicidad como inhibición respirométrica . . . . .           | 252        |
| <b>Referencias bibliográficas</b>                                 | <b>257</b> |
| <b>Índice alfabético</b>  | <b>261</b> |