

# Control de la calidad del agua

## Procesos fisicoquímicos

WALTER J. WEBER, JR.

EDITORIAL REVERTÉ



# Control de la calidad del agua

## Procesos fisicoquímicos

---

**WALTER J. WEBER, JR.**

Professor of Civil And Water Resources Engineering  
The University of Michigan

*Con la colaboración de*

**Jack A. Borchardt**, Professor, The University of Michigan

**Raymond P. Canale**, Assistant Professor, The University of Michigan

**John L. Cleasby**, Professor, Iowa State University

**James E. Cruver**, Engineer, Gulf Environmental Systems, Inc.

**Richard I. Dick**, Professor, The University of Illinois

**Francis M. Donahue**, Associate Professor, The University of Michigan

**Charles R. O'Melia**, Professor, The University of North Carolina

**Hans S. Posselt**, Research Associate, The University of Michigan



**EDITORIAL  
REVERTÉ**

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

*Titulo de la obra original*

**Physicochemical Processes for Water Quality Control**

*Edición original en lengua inglesa publicada por*

**Wiley-Interscience**

**A division of John Wiley & Sons, Inc., New York**

**Copyright © John Wiley & Sons, Inc.**

Edición en papel:

© Editorial Reverté, S. A., 1979

ISBN 978-84-291-7522-6

Edición e-book (PDF):

© Editorial Reverté, S. A., 2021

ISBN 978-84-291-9199-8

*Versión española por el*

**Dr. Jorge Bessa Feixas**

*Revisada por el*

**Dr. Rogelio Areal Guerra**

Profesor Adjunto de la Universidad Politécnica de Barcelona

Profesor de Ingeniería del Medio Ambiente en la

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Tarrasa (Doctorado)

**Propiedad de:**

**EDITORIAL REVERTÉ, S. A.**

**Loreto, 13-15, Local B**

**08029 Barcelona**

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

*Los primeros filósofos pensaban que los principios de substancia natural eran los únicos principios de todas las cosas. De lo que se componen todas las cosas que existen, el principio del que provienen, el fin en el que se convierten.. éste dicen es el elemento y aquel el principio de las cosas.. aunque no todos se ponen de acuerdo en el número y naturaleza de estos principios. Thales, el fundador de este tipo de filosofía, dice que el principio es el agua..*

*Algunos piensan que incluso los antiguos que vivieron mucho antes de la generación actual y fueron los primeros que concibieron la importancia de los dioses, tuvieron una visión similar de la naturaleza pues hicieron al Océano y Tetis padres de la creación, siendo representado el juramento de los dioses por el agua, a la que dieron el nombre de Estigia, puesto que lo más viejo es lo más honorable y se jura por la cosa más honorable.*

*ARISTOTELES 336 a.J.C.*



A WENDY, BETH, PAM Y LINDA

आपोसमं, राहुल, भावन्नं भावेहि ।  
आपोमम, सत्या ।



# PRÓLOGO DE LAS SERIES CIENCIAS DEL MEDIO AMBIENTE Y TECNOLOGÍA

*Las series monográficas sobre la ciencia del medio ambiente y su tecnología, los libros de texto, y mejoras al respecto se dedican al estudio de la calidad del medio ambiente y a la tecnología para su conservación. Por tanto, la ciencia del medio ambiente trata de las modificaciones químicas, físicas, y biológicas del mismo ocasionadas por la contaminación o perturbación, la naturaleza física y comportamiento biológico del aire, agua, suelos, alimentos, y residuos en cuanto están influenciados por las actividades humanas agrícolas, industriales y sociales, y la aplicación de la ciencia y tecnología para el control y mejora de la calidad ambiental.*

*El deterioro de la calidad ambiental, que empezó cuando el hombre por primera vez se agrupó en poblados y utilizó el fuego, constituyó un problema serio a partir de la revolución industrial. En la segunda mitad del siglo XX, debido a un crecimiento exponencial de la población e industrialización de la sociedad, la contaminación ambiental del aire, agua, suelos y alimentos ha constituido una amenaza para la subsistencia de muchas comunidades de plantas y animales del ecosistema (Tierra) y puede llegar a ser una amenaza para la supervivencia de la raza humana.*

*Parece evidente que si queremos preservar para futuras generaciones cierto parecido del orden biológico del mundo pasado y esperar que se mejoren los patrones sobre el deterioro de la salud pública urbana, es necesario que la ciencia ambiental y su tecnología se incorporen rápidamente, como factor determinante, en el diseño de nuestra estructura social e industrial futura. Debe desarrollarse científicamente un criterio riguroso sobre la*

## X Prólogo de las series

*calidad ambiental. Basándonos en estos criterios, deben establecerse patrones reales y nuestro progreso tecnológico ha de acomodarse a los mismos. Es obvio que nuestra civilización seguirá necesitando cantidades cada vez mayores de fuel, transporte, compuestos químicos para la industria, abonos, pesticidas, y un sinfín de otros productos y continuará produciendo toda clase de residuos.*

*Lo que se precisa urgentemente es un enfoque para los sistemas completos de nuestra civilización moderna, por medio del cual los científicos e ingenieros, en colaboración con los sociólogos y médicos, se centren en el desarrollo de un orden y equilibrio para las secciones actualmente desequilibradas de nuestro medio ambiente. En la actualidad se dispone de la mayor parte del conocimiento práctico y medios que se precisan. Resulta evidente que una tecnología que ha creado esta diversidad de problemas ambientales también es capaz de resolverlos. Esperamos que estas series sobre la Ciencia del Medio Ambiente y su Tecnología servirán para mentalizar al profesional sobre este problema y estimularán al estudiante hacia las nuevas carreras que abre este campo importantísimo.*

*Robert L. Metcalf*

*James N. Pitts, Jr.*

# PRÓLOGO

*En este tratado se desarrollan las bases racionales para el diseño, interpretación, ejecución y control de los procesos fisicoquímicos en orden a llevar a cabo o intervenir en las transformaciones cualitativas del agua. El enfoque, como el título indica, pone más énfasis en los procesos que en las operaciones, abarcando las transformaciones cualitativas en aguas naturales, aguas de abastecimiento y aguas municipales e industriales residuales.*

*El libro ha surgido principalmente de dos cursos que he desarrollado y enseñado en la Universidad de Michigan. Está escrito a medida que los cursos se fueron realizando, para los estudiantes de carrera avanzados y estudiantes posgraduados en ingeniería del medio ambiente y recursos de agua, ingeniería química, e ingeniería mecánica. Este libro pretende ser útil para ingenieros profesionales y científicos especializados en los procesos de control para calidad del agua.*

*He intentado escribir esta obra de tal forma que pudiera utilizarse como un libro de texto para: un curso amplio de un semestre de duración sobre los procesos fisicoquímicos, durante el cual se expliquen por extenso los doce capítulos; y un curso de un semestre de duración durante el cual se estudien con profundidad los capítulos que tratan de los procesos convencionales y de los que se aplican corrientemente: o, como yo prefiero, un curso de dos semestres durante el cual se estudien con profundidad los conceptos sobre dinámica de procesos y todas las materias del libro.*

*Existen varias razones para que se ponga más énfasis en los principios del proceso que en las operaciones básicas. Primera, un entendimiento de los mecanismos del proceso y las variables de control es fundamental para la aplicación eficaz de las operaciones básicas con el fin de obtener unos objetivos de tratamiento específicos. Segunda, la frecuencia cada vez mayor con que se altera el ciclo hidrológico normal del agua da lugar a que los*

*límites superficiales entre aguas naturales, abastecimientos de agua y aguas residuales sea cada vez más artificial. Debido a esto, los conceptos de proceso desarrollados en este libro se refieren al control de la calidad del agua en un sentido amplio y general.*

*Los ingenieros y científicos deben enfrentarse con la realidad de disponer de una serie de calidades de agua y tienen que desarrollar y cumplir las medidas para transformar el agua de una calidad determinada dentro de la serie en un agua de una calidad fijada para un uso particular. Los procesos tales como coagulación, adsorción, y oxidación que se aplican en el tratamiento del agua y agua residual, o para transformar la calidad del agua de un lago o río, son muy parecidos en cuanto a su operación.*

*La tercera razón para adoptar este enfoque desde el punto de vista del proceso, proviene del uso corriente del método de planta piloto en el campo del control de la calidad del agua debido a que resulta muy complejo adaptar un sistema de operaciones básicas para una aplicación específica de tratamiento. Sin embargo, el enfoque de planta piloto para el diseño ingenieril, resulta algo mejor que la "regla del dedo", si la información obtenida no se interpreta y aplica eficazmente. Esto requiere un entendimiento completo de los conceptos de proceso, dinámica, e interacciones.*

*Con el fin de suministrar un conocimiento elevado dentro de cada materia considerada, he invitado a los expertos de cada campo en particular para que prepararan o me ayudaran en la elaboración de algunos capítulos del libro. Cada capítulo ha sido escrito por un autor(es) que ha contribuido activamente al estado actual de conocimientos del proceso discutido en el capítulo por medio de la investigación y aplicación ingenieril.*

*El primer capítulo considera los principios sobre la dinámica de procesos. En un curso de un semestre de duración, la información de este capítulo puede introducirse brevemente y usarse como una fuente de referencia para los principios de proceso; el resto de los capítulos pueden darse tal cual están si el profesor sólo dispone de un semestre para explicar toda la materia. El primer capítulo puede extenderse de 5 a 10 semanas con el fin de dar al estudiante un conocimiento más elevado sobre la dinámica de procesos que le capacite para estudiar los capítulos siguientes con más profundidad. Para esto es preciso, como a mí me gusta dar los cursos, que se dediquen dos semestres al desarrollo de la materia. Una forma de llevarlo a cabo dentro de la estructura de un programa típico sobre ingeniería del medio ambiente y recursos de agua, consiste en dar el material del primer capítulo durante la última parte de un curso introductorio sobre química del agua.*

*Los capítulos 2 al 9 tratan de los procesos de tratamiento fisicoquímicos de coagulación, sedimentación, filtración, adsorción, intercambio iónico, procesos de membrana, oxidación química, y desinfección, en una secuencia parecida a la que podría sufrir el agua durante el tratamiento. De hecho, sería muy extraño encontrar una planta de tratamiento con todos estos procesos en serie, puesto que varios de ellos se diseñan para obtener el mismo objetivo de tratamiento. Sin embargo, no hay redundancia al explicar la materia de esta forma, puesto que este plan parece lógico desde el punto de vista de presentar los conceptos de proceso.*

*El capítulo 10 trata de la corrosión y su control, y aunque no sea un proceso de tratamiento per se, tiene la mayor importancia en las operaciones de tratamiento. Los*

*procesos de corrosión influyen mucho en la selección de los materiales para la construcción del reactor, y el control de la corrosión debe considerarse en el desarrollo de cualquier proceso de tratamiento.*

*El capítulo 11 presenta una discusión general sobre la transferencia de gas que se aplica por igual a un cierto número de operaciones en el tratamiento del agua y agua residual, y a la transferencia de gases en corrientes y lagos.*

*El capítulo 12, que es el último, versa sobre el tratamiento del fango, que constituye la última operación, una de las más importantes, en cualquier esquema de proceso para aguas y aguas residuales. La orientación desde el punto de vista de operaciones básicas es más adecuado en este capítulo que en los otros por motivos que deberían ser evidentes.*

*La preparación de este libro ha sido un proceso en el que directa e indirectamente han participado muchas personas. Estoy muy agradecido a varios autores que han contribuido o me han ayudado en varios capítulos. El capítulo 2 sobre coagulación lo escribió el Dr. Charles R. O'Melia de la Universidad de North Carolina; el capítulo 3 sobre sedimentación, el Dr. Raymond P. Canale y el Dr. Jack A. Borchardt de la Universidad de Michigan; el capítulo 4 sobre filtración, el Dr. John L. Cleasby de la Universidad del Estado de Iowa; el capítulo 7 sobre procesos de membrana, el Dr. James E. Cruver de Gulf Environmental Systems Inc.; el capítulo 10 sobre corrosión y su control, el Dr. Francis M. Donahue de la Universidad de Michigan; y el capítulo 12 sobre tratamiento del fango, el Dr. Richard I. Dick de la Universidad de Illinois. El Dr. Canale colaboró conmigo en la redacción de los capítulos sobre dinámica de procesos (Capítulo 1) y transferencia gaseosa (Capítulo 11), y el Dr. Hans S. Possel de la Universidad de Michigan en la elaboración de los capítulos sobre oxidación química (Capítulo 8) y desinfección (Capítulo 9).*

*En la Universidad de Michigan he tenido el privilegio de tener la colaboración de estudiantes prominentes y claustro de profesores. Su estimulación intelectual ha influido muchísimo sobre mi forma de pensar, como queda reflejado a lo largo de todo el libro. Un agradecimiento especial a aquellos estudiantes y colegas con los cuales he colaborado en la investigación sobre los temas discutidos en este libro; sus contribuciones se reflejan en la diversidad de referencias correspondientes a su trabajo.*

*Muchos colegas me han suministrado sugerencias útiles respecto al alcance del libro y a la forma como debía presentarse la información para obtener un libro de texto eficaz y a la vez de referencia. A este respecto me ayudó principalmente el Profesor John Austin de la Universidad de Clemson.*

*Las Srtas. Karen Young y Nanci Curtis contribuyeron muchísimo en la terminación del libro con su mecanografía, correcciones del manuscrito y su paciencia con el autor.*

*Por último, estoy muy agradecido a mi esposa, Ruth, y a mis hijas Wendilyn, Elizabeth, Pamela, y Linda por su comprensión a lo largo de las preocupaciones que acompañan invariablemente a un esfuerzo como éste.*

WALTER J. WEBER, JR.



# ÍNDICE ANALÍTICO

## 1. DINAMICA DE PROCESOS, REACCIONES Y REACTORES

W. J. Weber, Jr., y R. P. Canale

### **Dinámica de procesos, 1**

Procesos de transporte y reacción, 1

Ecuaciones de balance material, 2

### **Mecánica del transporte de materia, 5**

Procesos de transporte, 5

Transporte de materia por difusión, 6

Transporte de materia convectivo, 7

### **Reacciones y energía, 7**

Equilibrio y energía, 8

Energía libre, 10

Constante de equilibrio, 13

Estequiometría, 15

### **Cinética y velocidades de reacción, 16**

Ecuaciones de la ley de acción de masas, 17

Órdenes de reacción, 19

Tratamiento de los datos cinéticos, 20

Limitaciones de las ecuaciones de ley de acción de masas, 23

Aplicación de la ecuación de primer orden, 24

Reacciones de primer orden retardantes y autocatalíticas, 25

Reacciones consecutivas, 27

Reacciones simultáneas, 29

Reacciones reversibles, 31

Reacciones enzimáticas, 33

## XVI Índice analítico

Temperatura y energía de activación, 36

Catálisis, 37

Catálisis homogénea, 39

Catálisis heterogénea, 40

**Ingeniería de reactores y diseño de procesos, 41**

Reactores discontinuos completamente agitados, 42

Reactores de flujo completamente agitado, 43

Reactores CMF en serie, 45

Determinación de los parámetros de velocidad en reactores CMF, 46

Reactores de flujo a tapón, 48

Flujo tapón con dispersión, 51

**Problemas, 58**

**Referencias, 62**

## 2. COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

C. R. O'Melia

**Procesos de coagulación, 64**

Coagulación y floculación, 66

**La estabilidad de los coloides, 67**

Potenciales de atracción y repulsión, 67

Solvatación, 70

**Desestabilización de los coloides, 71**

Compresión de la doble capa, 71

Adsorción y neutralización de la carga, 73

Inmersión en un precipitado, 75

Adsorción y enlace de puente interpartícula, 76

**Desestabilización en el tratamiento del agua y del agua residual, 78**

Desestabilización por Al(III) y Fe(III), 79

Polímeros orgánicos sintéticos, 85

Sílice activada, 89

Biofloculación, 90

Selección de un coagulante, 91

Unidades de mezclado rápido, 94

**Transporte de las partículas coloidales, 95**

Floculación pericinetica, 96

Floculación ortocinetica, 97

Ecuaciones para determinar el gradiente de velocidad medio, 99

**Transporte de partícula en el tratamiento del agua y agua residual, 100**

Unidades de floculación, 101

**Recopilación, 104**

**Problemas, 106**

**Referencias, 112****3. SEDIMENTACIÓN**

R. P. Canale y J. A. Borchardt

**Procesos de sedimentación, 115**

Clarificación clase-1, 116

Clarificación clase-2, 122

Decantación zonal, 124

Compresión, 127

**Canalización y modelos de dispersión, 128****Diseño del tanque de sedimentación, 131**

Funciones del diseño, 132

Configuración del clarificador, 133

Decantadores de tubos, 135

Estructuras de entrada y salida, 135

Factores de seguridad, 137

**Problemas, 138****Referencias, 143****4. FILTRACIÓN**

J. L. Cleasby

**Procesos de filtración, 145**

Medio filtrante, 146

Mecanismos principales de la filtración, 147

**Hidráulica del flujo a través de un medio poroso, 148**

Desarrollo de la pérdida de carga en un filtro de gravedad, 150

**Tratamiento previo del agua (pretratamiento), 151****Modelos de control de velocidad y métodos, 152**

Filtración a presión constante, 153

Filtración a velocidad constante, 154

Filtración con velocidad decreciente, 155

Modelos de pérdida de carga a velocidad constante, 157

**Modelo de calidad para el efluente del filtro, 160**

Filtros de precapa, 161

Filtros granulares profundos, 161

**Modelos matemáticos para filtros granulares profundos, 161**

Modelo de superficie específica para partículas esféricas, 164

Modelo de superficie específica para capilares cilíndricos, 165

Velocidad intersticial, 166

**Filtración lenta con arena, 170**

- Operación de un filtro lento de arena, 170
- Rendimiento de los filtros de arena lentos, 171

**Filtración rápida con arena, 171**

- Velocidad de filtración, 172
- Tendencias actuales de la filtración rápida con arena, 172
- Detalles de un filtro de gravedad, 173
- Detalle de un filtro de arena rápido a presión, 176
- Variables de diseño y operación para filtros granulares profundos, 176
  - Medio filtrante, 176
  - Lavado de los filtros, 179
  - Fluidificación y expansión del lecho durante el lavado, 180
  - Agitación auxiliar durante el lavado, 183
  - Sistemas de desagüe inferior, 186
  - Diseño del canal de recogida para el agua de lavado, 187
  - Problemas de operación, 190

**Filtración de precapa, 191**

- El ciclo del filtro, 192
- Tipos de filtros, 193
- Modelo matemático para la filtración de precapa, 193
- Condiciones óptimas de trabajo, 199

**Problemas, 200**

**Referencias, 207**

**5. ADSORCIÓN**

W. J. Weber, Jr.

**Procesos de adsorción, 210**

- Relación entre la tensión superficial y la adsorción, 211
- Causas y tipos de adsorción, 215

**Equilibrio de adsorción e isoterma de adsorción, 217**

- Ecuaciones de Langmuir y BET, 218
- La ecuación de Freundlich, 221

**Velocidades de adsorción, 222**

- Etapa limitadora de la velocidad, 223

**Cinética de sorción para reactores discontinuos, 225**

- Ecuación de conservación de la masa que se difunde, 228

**Cinética de sorción en reactores de flujo continuo, 231**

- Ecuaciones de balance-material, 232
- Método de cinética de segundo orden, 233
- Mecanismo y velocidad de transferencia molecular, 235
  - Reacción superficial, 236
  - Difusión externa, 236

Difusión interna, 237  
Difusión externa e interna combinadas, 238

**Factores que influyen la adsorción, 241**

Área superficial, 241  
Naturaleza del adsorbato, 242  
pH, 246  
Temperatura, 248  
Adsorción de solutos mixtos, 249  
Naturaleza del adsorbente, 251

**Sistemas de contacto y modos de operación, 255**

Sistemas discontinuos y de flujo continuo, 255  
Curva de saturación, 356  
Diseño de un adsorbedor de lecho fijo, 258

**Problemas, 263**

**Referencias, 269**

**6. INTERCAMBIO IÓNICO**

W. J. Weber, Jr.

**Procesos de intercambio, 274**

**Materiales de intercambio, 274**

Resinas sintéticas, 275  
Métodos de preparación, 277

**Reacciones de intercambio, 278**

Equilibrios, 279  
Isotermas de intercambio, 287  
Selectividad iónica, 287  
Cinética de intercambio, 291

**Procedimientos de trabajo, 293**

Método para el diseño de la columna, 294

**Aplicaciones, 295**

Ablandamiento del agua (desendurecimiento), 295  
Desmineralización del agua, 300  
Tratamiento de aguas industriales residuales, 301  
Tratamiento de aguas residuales municipales, 302  
Sistemas de intercambio, 303  
Equipo y detalles de operación, 309  
Consideraciones económicas, 310  
Ensayo de las resinas, 310

**Problemas, 311**

**Referencias, 317**

**7. PROCESOS DE MEMBRANA**

J. E. Cruver

**Procesos de separación, 319**

**Ósmosis inversa, 322**

Ósmosis y presión osmótica, 324

Difusión de agua y soluto, 326

Propiedades de las membranas de acetato de celulosa, 329

Temperatura y pH de la alimentación, 331

Rechazo del soluto, 332

Otros sistemas de membranas, 334

Capa límite, 335

Diseño del sistema, 337

Pretratamiento y mantenimiento del flujo por unidad de superficie, 341

Aplicaciones, 343

Economía, 343

**Ultrafiltración, 344**

Ecuaciones matemáticas, 344

Propiedades de la membrana, 346

Polarización por concentración, 346

Diseño, 349

Aplicaciones, 350

**Electrodialisis, 350**

Energía requerida mínima, 353

Transporte iónico selectivo, 353

Propiedades de las membranas y preparación, 356

Polarización por concentración, 357

Potencia y energía necesaria, 357

Eficacia de la corriente, 358

Voltaje, 360

Diseño, 361

Método de cálculo, 362

Configuración de celda y pila (paquetes de celdas), 364

Aplicaciones, 367

Economía, 368

**Problemas, 368**

**Referencias, 376**

**8. OXIDACIÓN QUÍMICA**

H. S. Posselt y W. J. Weber, Jr.

**Procesos de oxidación, 379**

Limitaciones de los procesos de oxidación y los agentes oxidantes en el tratamiento de aguas y aguas residuales, 381

**Principios y teorías de la oxidación química, 382**

Conceptos y definiciones, 382

Degradación oxidativa versus sustitución, 385  
Igualación de las ecuaciones de oxidación-reducción, 386  
Consideraciones termodinámicas, 387  
Consideraciones cinéticas, 390  
Efectos de los catalizadores sobre las oxidaciones químicas, 391  
Papel del pH en las oxidaciones químicas, 392  
Naturaleza de los reactivos, 394

**Oxígeno, 395**

Propiedades físicas y químicas del oxígeno, 395  
Aplicaciones específicas, 396

**Ozono, 397**

Propiedades físicas y químicas del ozono, 398  
Métodos analíticos, 400  
Generación de ozono, 400  
Sistemas de contacto para el ozono, 401  
Aplicaciones específicas, 401

**Permanganato, 403**

Propiedades físicas y químicas del permanganato, 404  
Oxidaciones con permanganato en el tratamiento del agua, 405  
Métodos analíticos, 410  
Cómo se aplica el permanganato, 411

**Cloro, 412**

Consideraciones prácticas, 413

**Dióxido de cloro, 414**

Generación del dióxido de cloro, 414  
Propiedades físicas y químicas del dióxido de cloro, 415  
Reacciones del dióxido de cloro, 416  
Métodos analíticos, 417

**Problemas, 417****Referencias, 425****9. DESINFECCIÓN**

W. J. Weber, Jr., y H. S. Posselt

**Procesos de desinfección, 429**

Historia de la desinfección, 430  
Métodos de desinfección, 431  
Velocidades de desinfección, 432  
Concentración del desinfectante, 436  
Temperatura, 437  
Efecto del pH, 438  
Materia orgánica, 439

**Métodos no químicos de desinfección, 439**

Métodos térmicos, 439

Radiación ultravioleta, 440  
Radiaciones gamma y X, 441

**Desinfectantes químicos, 442**

**Cloro y sus derivados, 443**  
Propiedades del cloro, 443  
Alimentación de cloro, 444  
Manejo seguro del cloro, 444  
Química del cloro acuoso, 445  
Cloraminas, 447  
Cloración de ruptura, 451  
Cloración residual-libre, 453  
Cloración residual-combinada, 453  
Cloración del agua residual, 454  
Efectividad vírica, 455  
Decloración, 456  
Cloro disponible, 457  
Hipoclorito sódico, 458  
Cal clorada, 458  
Hipoclorito cálcico, 458  
Dióxido de cloro, 459

**Halógenos distintos del cloro, 459**

Flúor, 460  
Bromo, 460  
Iodo, 461

**Agentes oxidantes distintos de los halógenos, 464**

Ozono, 464  
Peróxido de hidrógeno, 46  
Permanganato, 467

**Reactivos varios, 467**

Metales pesados, 467  
Ácidos y bases, 469  
Tensoactivos, 469

**Problemas, 469**

**Referencias, 472**

**10. CORROSIÓN Y CONTROL DE LA CORROSION**

F. M. Donahue

**Procesos de corrosión, 475**

Corrosión en los sistemas de calidad del agua, 475  
Naturaleza electroquímica de la corrosión, 476

**Termodinámica electroquímica, 477**

Potencial de electrodo, 477

Diagramas de Pourbaix, 479  
Electrosorción, 480

**Cinética electroquímica, 481**

Ley de Faraday, 481  
La ecuación de Butler, 482  
Control del transporte de materia, 484  
Potenciales mixtos, 487

**Propiedades metalúrgicas, 493**

Homogeneidad, 493

**Propiedades de los metales en medios corrosivos, 494**

Corrosión general, 494  
Corrosión galvánica, 495  
Pasividad, 499  
Corrosión en holguras muy finas, 503  
Corrosión debida al gas hidrógeno, 504  
Corrosión por picado, 504  
Agrietamiento por corrosión bajo tensión, 505  
Corrosión bacteriana, 506  
Corrientes vagabundas, 507

**Métodos para controlar la corrosión, 508**

Control de la corrosión por diseño, 508  
Control de la corrosión por modificación del entorno, 509  
Control de la corrosión por técnicas electroquímicas, 510

**Ensayo de corrosión, 512**

Ensayos de planta, 512  
Ensayo de laboratorio, 514

**Problemas, 517**

**Referencias, 520**

**11. AIREACIÓN Y TRANSFERENCIA DE GAS**

R. P. Canale y W. J. Weber, Jr.

**Procesos de transferencia de gas, 522**

Pasos de transporte, 523  
Ecuaciones de transferencia de gas, 524  
Factores que afectan a la solubilidad del gas, 527

**Velocidad de transferencia de gas, 529**

Transferencia de película, 529  
Acumulación en la fase líquida, 531  
Reacción heterogénea, 533  
Transporte en la fase líquida, 534

**Sistemas de aireación y transferencia de gas, 537**

Sistemas de aire comprimido, 537

## XXIV Índice analítico

Sistemas de aspiración, 539

Sistemas mecánicos, 539

### **Factores que influyen sobre las velocidades de aireación y transferencia de oxígeno, 540**

Velocidad y tamaño de las burbujas, 542

Efectos de la composición de la disolución, 543

### **Correlaciones de transferencia, 545**

Correlaciones de transferencia para aireadores, 545

Correlaciones de transferencia para corrientes, 547

### **Problemas, 548**

### **Referencias, 551**

## **12. TRATAMIENTO DEL FANGO**

R. J. Dick

### **Fangos y procesos de tratamiento, 553**

### **Alternativas en la manipulación de los fangos, 555**

### **Características de los fangos, 557**

Concentración, 557

Peso específico, 559

Propiedades reológicas, 559

Propiedades de sedimentación, 562

Propiedades deshidratantes, 562

Poder calorífico, 564

Propiedades químicas, 566

Propiedades biológicas, 567

### **Acondicionamiento del fango, 568**

Métodos de acondicionamiento químicos, 569

Métodos de acondicionamiento físicos, 571

Acondicionamiento con calor, 571

Acondicionamiento por congelación, 571

Uso de aditivos, 572

### **Espesamiento, 572**

Espesamiento por gravedad, 573

Medición de las propiedades de decantación, 575

Diseño de los espesadores por gravedad, 577

Flotación, 580

Sistema de flotación, 581

Flotación por aire disuelto a presión, 582

### **Desidratación del fango, 585**

Filtración a vacío, 585

Otros métodos de filtración, 593

- Filtro prensa, 593
- Filtros de gravedad rotatorios, 594
- Centrifugación, 594
- Eras de secado de fango, 597
- Lagunas de fango, 599

**Secado, 600****Procesos de conversión, 601**

- Digestión anaerobia, 601
- Digestión aerobia, 602
- Combustión, 602
  - Hornos de bandejas superpuestas, 603
  - Reactores de lecho fluidificado, 603
  - Combustión en cámara de pulverización, 605
  - Incineración (Flash Drying), 605
  - Combustión húmeda, 605

**Aprovechamiento del fango, 607****Vertido final, 608**

- Vertido al aire, 608
- Vertido al agua, 608
- Vertido en tierra, 609

**Problemas, 612****Referencias, 612**

- Apéndice A. Símbolos, 621
- Apéndice B. Factores de conversión, 631
- Índice alfabético, 645



# Capítulo 1

---

## DINÁMICA DE PROCESOS, REACCIONES Y REACTORES

### DINÁMICA DE PROCESOS

#### Procesos de transporte y reacción

Los cambios en la composición y concentraciones de los productos en una masa natural de agua o en un reactor que se utilice para llevar a cabo el tratamiento de un agua residual, provienen de cualquiera de dos procesos distintos o de ambos a la vez. Los cambios pueden ser producidos por un transporte de materia aglutinante incluida y/o dispersada a lo largo de la capa límite del sistema, o pueden resultar de las reacciones o procesos que ocurren dentro de la capa límite del sistema. Ambos tipos de procesos son importantes en los sistemas de agua y agua residual. De hecho, la mayor parte de las operaciones en el tratamiento del agua y agua residual implican, o bien la adición de materiales que reaccionarán, o la eliminación de materiales que han experimentado reacción. La descarga de efluentes a las aguas receptoras es un ejemplo de una operación para la cual ambos procesos son importantes.

En general, un análisis de dinámica de procesos implica un análisis de los dos aspectos de los cambios que resultan del proceso que acaba de mencionarse. En primer lugar, es necesario conocer la extensión del cambio y en segundo, saber con qué rapidez ocurre el cambio. Cada uno de estos aspectos debe ser considerado desde los puntos de vista conjuntos de procesos de transporte y reacción. El punto lógico de partida para

## 2 Dinámica de procesos, reacciones y reactores

efectuar un análisis cuantitativo de la dinámica de procesos es desarrollar una ecuación de balance material a partir de los procesos de transporte y reacción. Este balance material puede efectuarse en un tanque de una operación de tratamiento de agua o agua residual, en una sección de tubería, en un lago o en una sección de un río. Con respecto al proceso de transporte, la magnitud del transporte dispersivo es una función de la distribución de componentes, o gradientes de concentración, dentro del volumen de control. El transporte incluido del material se lleva a cabo por flujo másico. Los efectos de las reacciones entre los componentes del volumen de control están superpuestos a los efectos de transporte. Las reacciones pueden dar lugar a una generación o consumo de los componentes.

### Ecuaciones de balance material

El principio termodinámico de la conservación de masa es el punto central en la aplicación de ecuaciones de balance material para análisis de la dinámica de procesos. La imposición de este principio da lugar a una ecuación de continuidad para componentes de interés. Una ecuación general representa la distribución temporal y espacial de las sustancias reactivas e inertes. Los compuestos reactivos se llaman componentes no-conservativos, y los inertes conservativos. El principio del balance material puede establecerse del modo siguiente:

$$\begin{array}{r}
 \text{Velocidad neta} \\
 \text{de acumulación} \\
 \text{de } i \text{ dentro del} \\
 \text{volumen de control}
 \end{array}
 =
 \overbrace{\begin{array}{cc}
 \text{Velocidad neta de entrada} \\
 \text{velocidad de entrada de masa de } i \\
 \text{a través de los límites del volumen de control} \\
 - \\
 \text{velocidad de salida de masa de } i \\
 \text{a través de los límites del volumen de control}
 \end{array}}
 +
 \begin{array}{c}
 \text{velocidad de reacción} \\
 \text{química de } i \\
 \text{dentro del volumen} \\
 \text{de control}
 \end{array}
 \quad (1-1)$$

El balance está escrito para un componente específico del sistema, componente  $i$ . El volumen de control es arbitrario y se indica en la figura 1-1. El volumen de control es  $V$ , y está rodeado por una superficie  $S_v$ .

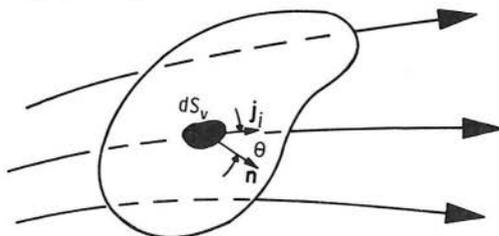


Figura 1-1 Flujo a través de un volumen de control.

Consideremos los cambios en la cantidad total de  $i$  dentro de  $V$  durante un tiempo  $\Delta t = t_2 - t_1$ . En el tiempo  $t = t_1$ , la cantidad de  $i$  en el volumen de control viene dada por

$$\text{masa de } i \text{ dentro de } V \text{ para } t = t_1 = \int_V C_i dV \Big|_{t=t_1} \quad (1-2)$$

en donde  $C_i$  es la concentración de masa de  $i$ . La  $C_i$  es una función de la posición y del tiempo. De forma similar

$$\text{masa de } i \text{ dentro de } V \text{ para } t = t_2 = \int_V C_i dV \Big|_{t=t_2} \quad (1-3)$$

Así la velocidad de acumulación del componente  $i$  en el volumen de control como función del tiempo viene dada por

$$\text{velocidad neta de acumulación de } i \text{ dentro de } V = \frac{\int_V C_i dV \Big|_{t=t_2} - \int_V C_i dV \Big|_{t=t_1}}{\Delta t} \quad (1-4)$$

La cantidad de  $i$  que pasa dentro o fuera del volumen de control viene determinada por la distribución de la densidad de flujo másico en la región del volumen de control. La densidad de flujo másico,  $\mathbf{j}_i$ , es un vector, cuya magnitud representa la masa de  $i$  por unidad de área y tiempo que atraviesa una superficie infinitesimal perpendicular a la dirección del flujo, y cuya dirección es paralela a la dirección del flujo. La velocidad neta de flujo másico fuera del volumen de control viene dada por

$$\text{velocidad neta de flujo fuera del volumen de control} = \oint_{S_v} \mathbf{j}_i \cdot \mathbf{n} dS_v \quad (1-5)$$

en donde  $\mathbf{n}$  es un vector unitario perpendicular a  $S_v$  y dirigido hacia el exterior de la superficie.

La velocidad de reacción de  $i$  se define como la variación en la concentración de  $i$  en el tiempo y dentro del volumen,  $V$ , debido solamente a la reacción. Esta velocidad es una función de la concentración de  $i$  y por tanto varía con el espacio y tiempo dentro del volumen de control. Por tanto,

$$\text{velocidad de reacción química dentro de } V = \int_V r_i dV$$

Combinando las ecuaciones 1-1, 1-4, 1-5, y 1-6 y tomando el límite para  $\Delta t \rightarrow 0$  obtenemos

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \int_V C_i dV \right] = - \oint_{S_v} \mathbf{j}_i \cdot \mathbf{n} dS_v + \int_V r_i dV \quad (1-6)$$

#### 4 Dinámica de procesos, reacciones y reactores

La ecuación 1-7 es una forma general integral de la ecuación de continuidad la cual es válida para cualquier volumen de control arbitrario y no depende de los mecanismos de la densidad de flujo o reacción. Puede aplicarse a volúmenes finitos homogéneos para los cuales  $C_i$  y  $r_i$  son funciones sólo del tiempo,

$$V \frac{dC_i}{dt} = F_i^\circ + Vr_i \quad (1-8)$$

en donde  $F_i^\circ$  es la densidad de flujo neta de entrada de  $i$  para una escala macroscópica y un volumen  $V$  constante.

Si la concentración de  $i$  dentro de  $V$  no es homogénea,  $C_i$  varía con la posición y el tiempo. En este caso es necesario aplicar la ecuación de continuidad en un punto dentro del sistema e integrar la ecuación diferencial parcial resultante. La solución de esta ecuación da perfiles de concentración que describen la distribución espacial y temporal de  $i$ .

Antes de llevar a cabo esta integración es necesario hacer dos transformaciones en la ecuación 1-7. En primer lugar la integral de superficie debe pasarse a integral para todo el volumen  $V$ . Esto puede llevarse a cabo utilizando el teorema de la divergencia de Gauss, el cual establece que

$$\oint_{S_v} \mathbf{j}_i \cdot \mathbf{n} \, dS_v = \int_V \nabla \cdot \mathbf{j}_i \, dV \quad (1-9)$$

en donde  $\nabla$  es el operador divergencia. Por ejemplo en coordenadas rectangulares,

$$\nabla = \mathbf{i}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{i}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{i}_z \frac{\partial}{\partial z}$$

en donde  $\mathbf{i}_x$ ,  $\mathbf{i}_y$  e  $\mathbf{i}_z$ , son vectores unitarios en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ . También es necesario transformar el orden de la integración y la diferenciación utilizando la fórmula de Leibnitz,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V C_i \, dV = \int_V \frac{\partial C_i}{\partial t} \, dV \quad (1-10)$$

en donde  $V$  es una constante. Introduciendo las ecuaciones 1-9 y 1-10 en la 1-7, y pasando todas las cantidades al segundo miembro de la ecuación, y combinando todos los factores bajo el signo integral obtenemos

$$\int_V \left[ \frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_i - r_i \right] dV = 0 \quad (1-11)$$

o, debido a que el volumen de control es arbitrario,

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{j}_i + r_i \quad (1-12)$$

que es la forma puntual deseada de la ecuación de continuidad.