

RAFAEL MARÍN GALVÍN

PROCESOS FÍSICOQUÍMICOS EN DEPURACIÓN DE AGUAS

Teoría, práctica y problemas
resueltos



Rafael Marín Galvín (Córdoba, 1958), licenciado y doctor en Ciencias Químicas y Máster en Medio Ambiente, es actualmente responsable de Control de Calidad, Calidad y Medio Ambiente de la Empresa Municipal de Aguas de Córdoba, y profesor de la Escuela de Organización Industrial (EOI) de Sevilla, habiendo ejercido como profesor en la Universidad de Córdoba desde 1999 hasta 2011 en donde continúa su labor dentro de Grupos de Investigación y de Innovación Docente. Su actividad profesional y pedagógica se extiende por el tratamiento de aguas destinadas a potabilización y la depuración de aguas usadas, control de calidad de aguas y subproductos de tratamiento y depuración, así como en el estudio electroquímico de la desactivación natural y artificial de microcontaminantes de los medios acuáticos.

Ha publicado siete libros, colaborando en otros ocho (cinco en inglés), siendo autor de más de 200 trabajos de investigación publicados en revistas nacionales e internacionales y de ponencias presentadas en congresos, simposios y jornadas tanto en España como fuera de ella. Finalmente ha intervenido en más de setenta cursos de diferente nivel (desde Máster, y cursos universitarios, hasta jornadas formativas y seminarios) sobre aguas, siendo vocal de las Comisiones de Aguas Potables y Residuales de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS), Coordinador del Grupo de Vertidos Industriales y Laboratorio de AEAS, miembro del Grupo de Calidad de Producto de la Asociación de Abastecimientos de Aguas y Saneamientos de Andalucía (ASA), y Vicepresidente de la Asociación de Químicos de Andalucía.

Otros libros sobre aguas del autor:

- ***Análisis de aguas y ensayos de tratamiento***
Editorial: GPE. 1995.
ISBN: 84-86052-20-3.
Pedidos al autor rmargal@emacsa.es
- ***Fisicoquímica de aguas***
Editorial: Díaz de Santos, 1999.
ISBN: 84-7978-382-6.
- ***Fisicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas***
Editorial: Díaz de Santos, 2003.
ISBN: 84-7978-590-X.
- ***Ciclo Integral del Agua***
Editorial: Servicio Publicaciones Universidad de Córdoba, 2008.
33 diapositivas (soporte digital).
ISBN: 978-84-7801-909-0.

Presentación.....	XVII
Agradecimientos.....	XXI

1. Procesos químicos empleados en depuración de aguas:

teoría y práctica.....	1
Generalidades	1
Coagulación química	2
<i>Definiciones básicas.....</i>	2
<i>Naturaleza de las partículas presentes en las aguas residuales</i>	2
<i>Carga superficial en partículas coloidales: doble capa eléctrica.....</i>	3
<i>Interacciones partícula-partícula.....</i>	5
<i>Coagulación por sales metálicas hidrolizables: efecto y acción</i>	9
<i>Aproximación a la coagulación-floculación a escala práctica:</i>	
<i>decantación.....</i>	16
Precipitación química	25
<i>Eliminación de fósforo mediante precipitación química.....</i>	27
<i>Eliminación de metales pesados mediante precipitación química.....</i>	32
<i>Co-precipitación de metales pesados y fósforo</i>	35
Neutralización, control de incrustaciones y estabilización de efluentes.....	35
<i>Neutralización: ajuste de pH.....</i>	35
<i>Control de incrustaciones: equilibrio carbónico de un agua.....</i>	36
<i>Estabilización de efluentes</i>	39
Oxidación-Reducción	39
<i>Reacciones químicas de oxidación-reducción.....</i>	39
<i>Potenciales de semirreacción.....</i>	40
<i>Potenciales de reacciones redox completas</i>	40
<i>Aplicaciones prácticas de la oxidación-reducción.....</i>	42
<i>Procesos de reducción.....</i>	44
<i>Práctica de la oxidación.....</i>	45
<i>Oxidación mediante empleo de aire</i>	50
Procesos de Oxidación Avanzada (AOP)	52
Desinfección	54
<i>Mecanismo de la desinfección.....</i>	56
<i>Factores que influyen en la actividad de los desinfectantes.....</i>	57
<i>Aspectos prácticos de la desinfección.....</i>	59
Control químico de olores en las EDAR	65
<i>Tipos y fuentes de olores en aguas residuales</i>	65
<i>Comportamiento de los olores.....</i>	67

<i>Estrategias para control de olores</i>	67
<i>Adición de reactivos químicos al agua residual</i>	68
<i>Empleo de reactivos enmascarantes y neutralizantes</i>	69
<i>Tratamiento químico de olores en fase gaseosa</i>	69
<i>Adsorción de olores en fase gaseosa</i>	70
<i>Tratamiento térmico</i>	70
2. Procesos físicos y otros procesos químicos empleados en depuración de aguas: teoría y práctica	73
Introducción	73
Eliminación de sustancias groseras: desbaste y dilaceración	73
<i>Desbaste o tamizado</i>	73
<i>Dilaceración</i>	74
Desarenado-desengrasado	76
Flotación. Flotadores	78
Filtración-adsorción	81
<i>Filtración sobre lecho filtrante</i>	83
<i>Práctica de la filtración sobre lecho filtrante</i>	87
<i>Adsorción</i>	92
Empleo de membranas filtrantes	97
Intercambio iónico	104
Destilación-evaporación	108
Corrección y afino	111
3. Sistemas de apoyo en depuración de aguas: introducción a la hidráulica	115
Conceptos básicos de hidráulica	115
<i>Densidad absoluta</i>	115
<i>Densidad relativa</i>	115
<i>Presión</i>	116
<i>Altura de elevación</i>	116
Clasificación de las bombas: introducción al tema	121
<i>Bombas centrífugas</i>	121
<i>Bombas rotativas</i>	136
<i>Bombas alternativas</i>	142
<i>Bombas especiales: eyectores y bombas mammut</i>	144
<i>Protecciones de una bomba</i>	146
<i>Instalación de bombas en serie y en paralelo</i>	146
Tornillos de Arquímedes	147
4. Tratamiento fisicoquímico en depuración de aguas residuales domésticas	149
Generalidades	149

Esquemas de tratamiento en depuración de aguas residuales urbanas	150
<i>Depuración fisicoquímica integral</i>	151
<i>Tratamiento fisicoquímico previo al biológico</i>	152
<i>Tratamiento fisicoquímico paralelo al biológico</i>	153
<i>Tratamiento fisicoquímico posterior al biológico</i>	154
Algunas consideraciones sobre la depuración de las aguas residuales urbanas en un próximo futuro.....	155
<i>Introducción a las características de las aguas residuales</i>	156
<i>Normas de calidad ambiental en materia de aguas</i>	161
<i>Depuración de compuestos y sustancias emergentes en las EDAR biológicas</i>	165
A modo de conclusiones	168
5. Depuración fisicoquímica de aguas residuales y efluentes industriales	169
Introducción y generalidades	169
<i>Precipitación química</i>	169
<i>Coagulación-floculación</i>	169
<i>Flotación</i>	169
<i>Cementación</i>	170
<i>Complejación</i>	170
<i>Adsorción</i>	170
<i>Extracción con disolventes</i>	170
<i>Evaporación-destilación</i>	171
<i>Intercambio iónico</i>	171
<i>Tratamientos electrolíticos</i>	171
<i>Procesos de membrana</i>	172
Ejemplos prácticos de depuración de diversos vertidos industriales.....	172
<i>Aguas residuales de preparación de salsas y mayonesas</i>	173
<i>Aguas residuales de productos precocinados</i>	174
<i>Efluentes procedentes del aderezo y envasado de aceitunas</i>	175
<i>Efluentes de producción de conservas de pescado</i>	176
<i>Vertidos procedentes de la elaboración de zumos</i>	177
<i>Aguas residuales de cerveceras</i>	177
<i>Vertidos procedentes de fabricación de bebidas no alcohólicas</i>	178
<i>Efluentes de envasado de conservas vegetales</i>	179
<i>Aguas residuales procedentes de instalaciones de RSU</i>	180
<i>Vertidos de la industria vidriera</i>	182
<i>Aguas procedentes de la industria papelera</i>	183
<i>Efluentes de industrias siderúrgicas y del hierro</i>	185
<i>Efluentes de la industria del cobre</i>	186
<i>Aguas residuales del procesado de aluminio</i>	188
<i>Aguas residuales de la industria del automóvil</i>	188
<i>Vertidos de talleres de automoción</i>	191

<i>Efluentes de la industria cerámica</i>	193
<i>Aguas residuales de producción de jabones y detergentes</i>	194
<i>Efluentes de producción de microcelulosa</i>	194
<i>Aguas residuales de industrias farmacéuticas</i>	195
<i>Efluentes de producción de TNT</i>	197
<i>Efluentes de producción de pesticidas</i>	198
<i>Efluentes de producción de pinturas, barnices y tintas</i>	199
<i>Aguas residuales de la industria del fosfato</i>	200
<i>Vertidos de la industria de los plásticos y resinas</i>	200

6. Procesos químicos parásitos en saneamiento y depuración de aguas: corrosión y agresión a redes de colectores y EDAR..... 205

Fenómenos de corrosión y agresión en saneamientos	205
<i>Procesos químicos parásitos: corrosión electroquímica</i>	206
<i>Otros procesos químicos parásitos</i>	211
<i>Corrosión microbiana</i>	215
Tipología de los agentes corrosivos y agresivos en saneamientos: generalidades	219
<i>Agentes químicos</i>	219
<i>Agentes microbianos</i>	221
<i>Hongos</i>	223
<i>Localización de los agentes productores de corrosiones y agresividad en los sistemas de saneamiento y las EDAR</i>	223
Materiales afectados por fenómenos de corrosividad y agresividad en saneamientos: ejemplos prácticos	226
<i>Elementos metálicos</i>	226
<i>Hormigones y similares</i>	227
<i>Elementos plásticos</i>	228
<i>Efectos prácticos de los fenómenos corrosivos y agresivos</i>	228
Costes asociados a los fenómenos de corrosividad y agresividad en saneamientos	242
<i>Costes no económicos</i>	242
<i>Costes económicos</i>	242
Lucha eficaz contra los fenómenos corrosivos y agresivos en los saneamientos y las EDAR.....	243
<i>Empleo de materiales adecuados</i>	243
<i>Control eficaz de vertidos tanto industriales como domésticos</i>	247
<i>Implantación de prácticas sostenibles</i>	250

7. Práctica del tratamiento fisicoquímico de aguas a escala de laboratorio..... 251

Ensayos de coagulación-floculación: “jar-test”	251
--	-----

<i>Cálculo de disoluciones de reactivos comerciales</i>	254
<i>Ensayos de floculación</i>	257
Ensayos de cloración	258
Ensayos con permanganato potásico (<i>permanganización</i>)	259
Ensayos con dióxido de cloro	261
Ensayos con ozono	262
Ensayos de filtración	263
Ensayos de adsorción	264
Ensayos de ajuste de pH	265
Ensayos de desendurecimiento	267
Plantas piloto	267
8. Problemas básicos de dosificación de reactivos y cálculos hidráulicos de proceso resueltos	269
9. Bibliografía de interés. Libros y revistas técnicas	333
Introducción	333
Fisicoquímica y química del agua	333
Microbiología del agua. Biología y limnología	335
Tratamiento-depuración de aguas residuales	335
Aguas en general y tratamiento de aguas. Instrumentación e hidráulica	336
Revistas técnicas más importantes del sector	338

El tratamiento de aguas usadas es sin duda una garantía de preservación de un entorno acuático aceptablemente limpio, siendo pues una herramienta crítica en la lucha contra la contaminación. También muestra su utilidad en el campo, cada vez más en desarrollo, de la reutilización de aguas residuales depuradas (*o aguas regeneradas*) puesto que este recurso, una vez que ya se cuenta con la preceptiva normativa estatal al efecto, es una fuente de agua nada desdeñable tanto a escala global, como especialmente en geografías deficitarias en aportes naturales, cual es la de nuestro entorno.

Si bien las aguas residuales cuando son de procedencia doméstica mayoritariamente admiten procesos depuradores biológicos dado su alto contenido en materias orgánicas de desecho, ricas en carbono y nitrógeno y, por tanto, fuentes típicas de alimento y energía para muchos microorganismos, el incremento en su contenido en otras sustancias más refractarias al tratamiento biológico hace que estos sistemas se muestran claramente ineficaces en muchas ocasiones para lograr niveles de depuración eficientes y admisibles.

El presente libro aborda la cuestión de los diferentes procesos de carácter fisicoquímico y las técnicas desarrolladas en base a los mismos, que actualmente son aplicados en la mayoría de las estaciones depuradoras de aguas, tanto de procedencia urbana como industrial, a fin de lograr la depuración eficaz de este tipo de efluentes. En este sentido, los procesos fisicoquímicos, particularmente los de base puramente física, también son empleados habitualmente como pre-tratamientos o tratamientos primarios en muchas depuradoras biológicas convencionales. Recuérdese al efecto el empleo de tamizados, rejillas de desbastes, desarenados y desengrasados en cualquier EDAR biológica, así como el sistema de secado térmico también aplicado para el tratamiento de fangos de depuración o *biosólidos* en muchas depuradoras.

Para la elaboración de esta obra se ha contado con la importante labor docente y divulgativa sobre tratamiento de aguas en general, y de aguas residuales en particular, que el autor ha llevado a cabo durante su ya dilatada carrera profesional (desde 1982) impartiendo periódicamente numerosos cursos e interviniendo en jornadas, seminarios y máster de ámbito tanto universitario como no universitario.

Con este bagaje se ha intentado aproximar al lector al tema del tratamiento fisicoquímico de aguas desde una óptica muy práctica, aportando fundamentos y explicaciones sobre los fenómenos involucrados que puedan ser seguidos por profesionales o estudiantes de diferentes rutas formativas de procedencia, pero teniendo en cuenta que se debe partir de una base de conocimiento medio (equivalente al primer ciclo de estudios universitarios) en química, física e hidráulica. El objetivo perseguido es el de actuar como primera fuente de consulta ante problemas de tratamiento fisicoquímico que puedan presentarse al lector tanto a escala teórica como práctica, allanando el camino para la consulta de otras obras de mayor profundidad que la presente, y

huyendo por consiguiente de un excesivo academicismo reservado a las anteriores.

En este sentido, en el Capítulo 1 de esta obra se ha pasado revista al fundamento y práctica de los procesos de tratamiento puramente químicos aplicados en depuración; téngase en cuenta al respecto que lo dicho aquí también puede ser aplicado a la potabilización de aguas: en realidad, el tratamiento de un agua tanto sea su depuración, como su tratamiento para destinarla a consumo humano, se basa en idénticos procesos. Considerando la *coagulación-floculación* como un tema esencial para comprender qué es el tratamiento químico de un agua, también se familiariza al lector con la *precipitación química* (de amplio uso en eliminación de metales pesados, por ejemplo, o en la reducción del contenido en fósforo de un efluente) y con la práctica de la *neutralización de aguas residuales*, una técnica de bajo coste y que resuelve muchos problemas en el día a día.

Constituyendo en cierto modo una segunda parte de este Capítulo, se tratará del fundamento y la aplicación de los procesos de *oxidación-reducción*, siendo los primeros la base de la *desinfección* de un agua, con especial atención a los *procesos de oxidación avanzada*, que cada vez más se usan para eliminación de sustancias refractarias a tratamientos convencionales, bien sean biológicos o químicos. Para finalizar, se hablará del *control químico de olores* en depuradoras actuación con una fuerte demanda social cuando hablamos de depuración.

En el Capítulo 2 se abordarán primero, procesos puramente físicos de depuración que conforman el pre-tratamiento de cualquier EDAR, *desbastes*, *tamizados*, *desengrasados (flotación)* y *desarenados*, así como tratamientos posteriores o finales de un agua ya depurada, caso de la *filtración y adsorción*. Asimismo se incluyen aquí, por seguir la línea de tratamiento habitual de una depuradora avanzada (no convencional), tratamientos de base química como el *intercambio iónico* y el *empleo de membranas* de diferente tipología, cuya práctica puede asemejarse a la de la *filtración* más que a la de la *decantación* (tratamiento químico) en base a los equipos industriales utilizados a tal fin.

Finalizará el capítulo con la revisión de la *destilación y evaporación* (técnicas usadas en depuración de aguas industriales y en tratamiento de fangos, especialmente, la segunda) reservando un punto final a los procesos de *corrección y afino*, que técnicamente no se consideran como procesos de depuración o tratamiento de un agua.

El Capítulo 3 ha parecido conveniente dedicarlo a una aproximación conceptual a la *Hidráulica*, familiarizando al lector con los fundamentos de la misma y con los sistemas de apoyo habituales en cualquier estación depuradora, como son las *bombas centrífugas* (indispensables para el trasvase de aguas), *rotativas* (aplicadas para dosificación de reactivos químicos, por ejemplo) y las *alternativas*. Como aspecto de interés se considerarán tanto cuestiones meramente teóricas como de funcionamiento práctico. También nos acercaremos a los *tornillos de Arquímedes*, que es el segundo gran elemento de trasvase de aguas existente en cualquier depuradora, y en realidad en cualquier red de saneamiento.

Para el Capítulo 4 se ha preparado una breve introducción a los esquemas típicos de tratamiento químico de aguas residuales aplicados en la mayoría de las depuradoras urbanas de nuestro entorno. Dado que el libro no tiene como prioridad la

depuración convencional de aguas urbanas (eminentemente biológica como ya se ha repetido anteriormente) no se ha pensado de interés extender más el tema, habida cuenta de que existen obras (recogidas en la Bibliografía) de conocida valía y utilidad, tanto académica como teórica y práctica para estas cuestiones.

No obstante, en la segunda parte del capítulo se ha planteado una reflexión sobre el futuro de la depuración de aguas residuales urbanas a tenor de dos cuestiones: la primera el *progresivo enriquecimiento* en nuestras aguas residuales domésticas de sustancias químicas hasta hace poco privativas de las aguas residuales industriales (*sustancias prioritarias y preferentes*); la segunda, en que en orden a lo anterior, las normativas sobre aguas depuradas ya prestan atención a estos compuestos, muchos de ellos refractarios a los procesos actuales de depuración de aguas residuales urbanas, limitando su contenido y marcando un cambio de escenario para nuestras depuradoras.

El Capítulo 5 se ha elaborado con la filosofía práctica de presentar al lector una amplia variedad (no exhaustiva) de ejemplos prácticos de depuraciones de aguas residuales de diferentes sectores de actividad, considerando aguas industriales procedentes de *industrias alimentarias, fabricación de bebidas, vidrieras, papeleras, metalúrgicas y afines, cerámicas*, finalizando con un repaso a las más importantes *industrias químicas*. Se han presentado hasta 25 ejemplos prácticos recogiendo las líneas de tratamiento aplicadas y algunas cuestiones de funcionamiento básico al respecto.

El Capítulo 6, aplicando una cierta ironía, se ha enfocado a tratar el tema de los *procesos químicos y microbiológicos parásitos* en saneamiento y depuración de aguas. Es decir, todos aquellos que provocan fenómenos de corrosión y agresión en materiales de redes de saneamiento y depuración de aguas residuales. Hablaremos de corrosión electroquímica, de corrosión y agresividad química, de corrosiones microbianas, de la tipología de los agentes corrosivos y agresivos, de dónde se ubican, y de los efectos negativos que provocan presentando una extensa galería documental de los mismos. Finalizaremos el capítulo reflexionando sobre los métodos de lucha eficaz contra estos fenómenos tanto en la fase previa a la ejecución de instalaciones, como en la fase posterior a las mismas. Incluso en este tema no debe perderse de vista el aspecto de la *sostenibilidad ambiental*.

Dado que cualquier depuradora en su práctica diaria se apoya en los datos de calidad de aguas y de explotación suministrados por el correspondiente *laboratorio de proceso*, se ha conformado un capítulo, el séptimo, en que se recopilan los más habituales *ensayos de tratamiento a escala de laboratorio* normalmente ejecutados en el laboratorio de proceso de cualquier depuradora para que el lector tenga cumplida información al respecto y pueda, en su caso, ayudado de ejemplos sacados de la práctica del autor, establecer la pauta que en un determinado momento pueda ilustrarle para superar una situación concreta.

Relacionado con este apartado, se desarrolla el tema de los *cálculos de dosificación de reactivos químicos*, tanto líquidos como sólidos, y su conversión en magnitudes aplicables en planta. Si bien en principio un tema de interés menor, la experiencia indica que, en muchas ocasiones, no se tiene suficientemente claro qué

cantidad concreta de reactivo (en peso o volumen) considerando su riqueza concreta, y calidad específica (densidad, etc.) corresponde a una determinada cantidad (o flujo) de agua a depurar.

Otro tema importante y que se piensa es adecuado colofón a lo dicho en los Capítulos anteriores, es del de *problemas resueltos de dosificación de reactivos y cálculos hidráulicos de proceso básicos*. Por ello, el Capítulo ocho se reserva para presentar una extensa colección de problemas, cuya resolución práctica se detalla minuciosamente, que sin duda despejará dudas al lector sobre el particular. La filosofía aplicada ha sido la de considerar cada problema de forma independiente con lo que su resolución no dependerá del cuerpo general de todos los presentados con anterioridad o posterioridad al mismo.

Como en realidad no se trata de un libro sobre Química o Hidráulica puras, sino aplicadas, se ha huido de profundizar en demasía sobre estequiometrías de reacciones químicas y similares, o sobre cálculos más complejos de hidráulica, apoyándonos en lo que la rutina diaria nos indica se requiere en la explotación habitual de cualquier sistema de depuración fisicoquímica de aguas usadas: interconversiones entre dosis de reactivos a escala de laboratorio y pesos o volúmenes por unidad de tiempo a aplicar en la estación de tratamiento, sus costes, producción de fangos, así como velocidades ascensionales en decantación, sedimentación y filtración, rendimientos hidráulicos y afines. Para problemas más específicos ya se reseñan en la Bibliografía libros de contrastada solvencia en estos temas, si bien se ha optado por finalizar el capítulo con un extenso y atractivo problema que disecciona una EDAR provista de la mayoría de los procesos de tratamiento desarrollados en los capítulos anteriores.

Enlazando con lo dicho anteriormente, en el capítulo final de esta obra, el de Bibliografía, se mencionan agrupadas en cuatro apartados, libros de *fisicoquímica y química de aguas, microbiología, biología y limnología, tratamiento y depuración de aguas residuales, aguas en general y tratamiento de aguas* (tanto destinadas a consumo –potabilización–, como aguas usadas) e *instrumentación e hidráulica*, finalizando con una relación de revistas del sector que se juzga pueden ser particularmente útiles al lector si quiere mantenerse al día sobre todo lo relacionado con el ciclo integral del agua. No se olvide que las revistas técnicas son un yacimiento insustituible a la hora de pulsar el *estado del arte* en el tema del tratamiento y depuración de aguas, así como en el del control de calidad de las mismas.

RAFAEL MARÍN GALVÍN

AGRADECIMIENTOS

No debo pasar página sin mencionar con especial gratitud a todas aquellas personas, compañeros y colegas en lo profesional, y con los que además comparto lazos de amistad, que en cierto modo han colaborado bien aportando ideas y puntos de vista (a veces lo más difícil), en otras ocasiones material y documentos gráficos, de los cuáles me he permitido la libertad (aceptada de buen grado por ellos) de incorporar a este libro.

Y entre ellos acordarme, no puede ser de otra forma, del Prof. Dr. D. José Miguel Rodríguez Mellado, Catedrático de la Universidad de Córdoba, amigo desde siempre, y con el que siempre cuento incondicionalmente a la hora de ponerme a contrastar ideas y a corregir los *desafueros académicos* que en ocasiones cometo en mi filosofía de acercar lo teórico a lo práctico y situarlo a un nivel de comprensión adecuado a los técnicos que día a día bregamos con las aguas, blancas, grises y negras.

También es de ley citar a D. Rafael Mantecón Pascual, Presidente de la Comisión de Aguas Residuales de la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS) y Coordinador de Saneamiento y Relaciones Externas del Área Metropolitana de Barcelona, con el que hace años comparto inquietud por cómo controlar mejor y más eficientemente nuestras aguas residuales, al mismo tiempo que contrastamos pareceres sobre nuestras aguas y nuestro medio ambiente en general, tan en precario en muchas ocasiones.

Con respecto a *todos los compañeros del Grupo de Trabajo de Inspección de Vertidos Industriales y Laboratorio de AEAS*, a los que está bien les agradezca ahora su apoyo en mi labor de coordinación de este Grupo de Trabajo, de cuyas interesantes e innovadoras actividades he tomado experiencias para elaborar partes de este libro.

Y especialmente cito a D. Josep Navarro Navarro, del Consorcio de Aguas del Besós, a D. Agustín Lahora Cano, de la Entidad de Saneamiento de la Región de Murcia, a D. Iñigo González Canal, del Consorcio de Aguas de Bilbao, a D. Miguel Ángel Doval Aguirre, de la Empresa Metropolitana de Aguas de Sevilla, a D. Félix Ripollés Pascual de IPROMA, a D. Ernesto Santateresa Forcada, de FACSA-Castellón, a D^a. Blanca Díaz de Durana Uriarte del Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz, a D. Valeriano Gómez Ruiz de HACH LANGE, finalizando con D. Francisco Balsera Cubero de MP-Medio Ambiente.

Además, a D. Adrián Gomila (Guldager Electrolisis), a la Dra. D^a Nuria Adroer (ADIQUÍMICA), al Dr. D. Miquel Salgot, a D. Francisco Salvi (Pinturas Villada), así como a D. J. Vicente Pastor (ADEQUA-URALITA) también deseo expresar públicamente mi reconocimiento.

Finalmente, a Joaquín Vioque Lozano por su dedicación a esta obra.

Todos ellos reciban una vez más mi sincera gratitud.

PROCESOS QUÍMICOS EMPLEADOS EN DEPURACIÓN DE AGUAS: TEORÍA Y PRÁCTICA

1

GENERALIDADES

Los procesos químicos (que fueron los primeros empleados en el tratamiento de aguas –potabilización y depuración–) son cada vez más empleados en depuración de aguas residuales, y junto a varios procesos físicos completan el tratamiento secundario y terciario de aguas usadas, incluyendo también aquí la separación de nitrógeno y fósforo. A continuación se reseñan los principales procesos químicos de depuración de aguas aplicados actualmente:

- *Coagulación química*, que se emplea para eliminación de coloides y materias en suspensión, y reducción de carga biodegradable (DBO_5 y DQO).
- *Precipitación química*, que reduce materias en suspensión, contenido global en sales, y carga biodegradable, actuando sobre fósforo y metales pesados, y el control de corrosión en colectores y elementos de depuradoras. Se considera como el tratamiento fisicoquímico general en depuración.
- *Neutralización (control de pH), control de incrustaciones y estabilización de efluentes*.
- *Oxidación-Desinfección*, que aplicando diferentes reactivos químicos (cloro, dióxido de cloro, ozono..) se emplea para control de microorganismos en aguas y fangos, control de olores, eliminación de carga biodegradable, grasas, amonio y reducción del contenido en compuestos orgánicos diversos.
- *Procesos de Oxidación Avanzada* (AOP en sus siglas inglesas) aplicados para reducir el contenido en compuestos orgánicos de síntesis, habitualmente refractarios a otros tipos de depuración química o biológica.
- *Intercambio iónico*, que se enfoca a separación de amonio, metales pesados, sales disueltas e incluso a eliminar algunos compuestos orgánicos concretos.

A tomar contacto con todas estas posibilidades existentes en depuración química de aguas (a excepción de la última, que se incluirá dentro del Capítulo 2 más por su ubicación en el esquema habitual de depuración de aguas residuales que por su fundamento) se enfocará este tema. Como introducción, indiquemos que los procesos químicos complementan a los biológicos y ayudan, o incluso, mejoran notablemente en muchas ocasiones a los primeros. Como contrapartida suelen representar costes económicos adicionales e incluso producción suplementaria de fangos de depuración en las depuradoras que los implementen.

COAGULACIÓN QUÍMICA

Los procesos de coagulación-floculación tienen como misión la de sustraer de un agua las sustancias coloidales cuya extraordinaria estabilidad (basada en su repulsión electrostática, al poseer cargas eléctricas de superficie de igual signo) hace que no puedan ser eliminadas por decantación simple ya que esto supondría tiempos de tratamiento realmente inviables a escala industrial, como puede observarse en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Tiempos de decantación no forzada (profundidad 1 m) para diferentes partículas en función de su tamaño (diámetro).

Diámetro en micras	Tipo partícula	Tiempo
<10	Arcillas	2 horas
10 a 1	Bacterias	8 días
1 a 0,1	Coloides gruesos	2 años
0,1 a 0,001	Coloides finos	20 años

La coagulación es el proceso de desestabilización de los coloides presentes en un agua y su conversión en partículas o *flóculos* de un determinado tamaño susceptibles de decantación. Dado que el proceso de coagulación es sumamente complejo vamos a abordarlo mediante varios apartados a fin de intentar clarificar su comprensión.

DEFINICIONES BÁSICAS

La *coagulación química* se define como el proceso químico de desestabilización de coloides, mientras que los *coagulantes* son aquellos reactivos químicos que la llevan a cabo.

Por su parte, los *floculantes* son sustancias químicas que mejoran la coagulación, posibilitando la *floculación* que es el proceso siguiente al de la coagulación, y que tiene que ver con la sedimentación y decantación de los coloides previamente desestabilizados.

Existen dos tipos de floculación: *floculación pericinética o microfloculación* desarrollada mediante el movimiento Browniano o al azar de las partículas, y *floculación ortocinética o macro-floculación*, que promueve la agregación de partículas induciendo gradientes de velocidad y mezcla en el flujo que contiene las partículas a flocular.

NATURALEZA DE LAS PARTÍCULAS PRESENTES EN LAS AGUAS RESIDUALES

En general son menores que $1,0 \mu\text{m}$ y no decantan de forma natural. Este tamaño suele discriminar las partículas entre *coloides* ($<1,0 \mu\text{m}$) y *partículas en suspensión* ($>1,0 \mu\text{m}$). Las características de las partículas coloidales de un agua residual vienen definidas por:

- Tamaño y cantidad.
- Forma.
- Propiedades superficiales y de carga eléctrica.
- Interacciones partícula-partícula.
- Interacciones con el disolvente.

El *tamaño* de los coloides oscila entre $1,0 \mu\text{m}$ y $10^{-3} \mu\text{m}$ (Tabla 1.1) y su cantidad en un agua sometida a sedimentación física simple suele variar entre 10^6 y 10^{12} por mL.

En cuanto a su *forma*, los coloides y partículas en suspensión en general pueden ser esféricos, semiesféricos, elipsoidales, filamentosos de distinta longitud, en forma de disco y de formas indeterminadas (aquí hay que considerar también a los microorganismos) siendo las partículas más difíciles de agregar las longitudinales. Además, su forma puede variar debido a interacciones eléctricas, *partícula-partícula* y *partícula-disolvente*.

Existen tres tipos generales de coloides en los líquidos: *hidrofóbicos*, *hidrofílicos* y *coloides asociados*. Los dos primeros tipos definen a partículas que son, o bien débil o bien fuertemente atraídas por el agua, respectivamente. En cuanto al tercer tipo se trata de aglomeraciones entre partículas coloidales y otras moléculas del tipo de tensoactivos, detergentes y aceites y grasas, que se agregan en forma de micelas.

CARGA SUPERFICIAL EN PARTÍCULAS COLOIDALES: DOBLE CAPA ELÉCTRICA

Un factor sumamente importante de los coloides es poseer *carga superficial*. La carga de superficie puede adquirirse por varios mecanismos: sustitución isomorfa, imperfecciones estructurales, adsorción preferencial e ionización.

La *sustitución isomorfa* comporta que existan reemplazamiento de iones de la estructura del coloide (arcillas, por ejemplo) con similar tamaño y distinta carga (sustitución de átomos de Si^{4+} por Al^{3+}).

A su vez, la *rotura de estructuras cristalinas* provoca desplazamientos locales de carga eléctrica en la superficie de las partículas coloidales.

Por su parte, partículas coloidales de un agua, tales como gotículas de aceites, gases, arcillas y otras sustancias químicas inertes pueden *adsorber aniones* presentes en el agua, con lo que adquirirían carga negativa.

Finalmente, en el caso de sustancias tales como proteínas o microorganismos la carga superficial se adquiriría mediante *ionización* de sus grupos carboxilo y amino superficiales. A valores de pH inferiores al punto isoeléctrico de la sustancia (es decir, aquél donde habría tanta cantidad de sustancia con cargas positivas como negativas) existirían grupos R-COO^- y a valores de pH superiores, se acumularían grupos R-NH_3^+ .

La existencia de carga eléctrica superficial efectiva en los coloides de un agua supone la formación de una doble capa eléctrica entre la superficie de separación de las dos fases consideradas: el coloide como molécula unitaria y el agua libre (como se observa en la Figura 1.1).

La doble capa antes establecida se comporta como un condensador eléctrico de placas paralelas que consta de dos zonas interconectadas pero a su vez suficientemente diferenciadas. La primera, con un espesor de aproximadamente el propio coloide, permanece unida con poca capacidad de fluctuación, y casi fija a la superficie de la partícula sólida. En esta zona (*capa de Stern*) se experimenta una caída de potencial definida y constante en función del coloide concreto y de las otras características del agua (temperatura, fuerza iónica, cantidad de solutos, etc.).

La segunda zona que se extiende dentro de la propia fase líquida (agua libre) es de carácter difuso (*capa difusa*). Si bien los procesos de agitación térmica permiten el libre movimiento de las partículas, esto provoca que la distribución de los iones positivos y negativos no sea uniforme debido al campo electrostático existente en la superficie. De esta manera, se produce una caída gradual de potencial en la masa del líquido en dos etapas: una definida, que se experimenta entre la superficie del líquido y la capa fija (B-C) y otra entre este punto y la capa difusa (A-C). La caída de potencial en la capa difusa depende de la naturaleza del coloide y de los iones en disolución.

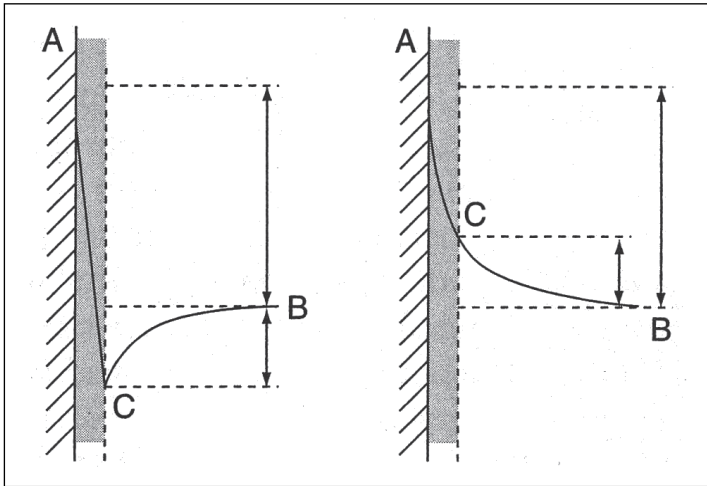


Figura.1.1. Visualización de la doble capa eléctrica definida entre un coloide y el medio que lo rodea (agua).

A esta caída de potencial en la capa difusa se la conoce como “*potencial Z*” y determinará la posibilidad del proceso de coagulación. Esta magnitud es especialmente importante y gobierna el tratamiento y la depuración de aguas. En general, suele experimentar una dinámica de carácter exponencial en un agua sin ningún reactivo. Indíquese que cuánto más pequeña se haga en valor absoluto, el proceso de coagulación discurrirá de forma más óptima.

En la práctica, casi todos los coloides del agua son electronegativos, presentando un valor del potencial Z comprendido entre -14 mV y -30 mV. La medida del potencial Z se efectúa a través de las movilidades electroforéticas de las partículas según la ecuación:

$$Z = k \cdot \delta \cdot (\mu/D)$$

donde “ δ ” es la viscosidad dinámica en (dPa • s), “D” representa la constante dieléctrica del medio, “ μ ” la movilidad iónica de la partícula en $\mu\text{s}/\text{V} \cdot \text{cm}$ y “k” es un término que es función de los valores relativos del diámetro de la partícula y del espesor de la propia doble capa eléctrica. Para partículas gruesas “k” vale 4π aplicando la ecuación de Helmholtz y para partículas pequeñas y esféricas vale 6π según la expresión de Hückel.

INTERACCIONES PARTÍCULA-PARTÍCULA

En general las interacciones partícula-partícula se pueden estudiar considerando dos modelos: el de dos placas planas cargadas y el de dos esferas cargadas. Dado que ninguno de estos modelos puede aplicarse totalmente para las partículas existentes en un agua residual, el más ilustrativo puede ser el de placas cargadas (Figura 1.2).

Como se aprecia en la figura existen dos tipos de fuerzas en el proceso, unas de repulsión derivadas de las propiedades de las placas cargadas, y otras de atracción debidas a fuerzas de Van Der Waals (eléctricas de corto alcance). De la potencia de cada contribución, teniendo en cuenta que la atracción de Van Der Waals es constante, saldrá la energía total del proceso.

Se pueden dar dos casos (1 y 2, -*curvas de repulsión 1 y 2*, en la Figura 1.2) dependiendo de que la repulsión sea más o menos fuerte, con lo que la agregación será más fácil o más dificultosa, es decir, alcanzará a distancias más cortas o más largas desde la superficie de cada coloide considerado.

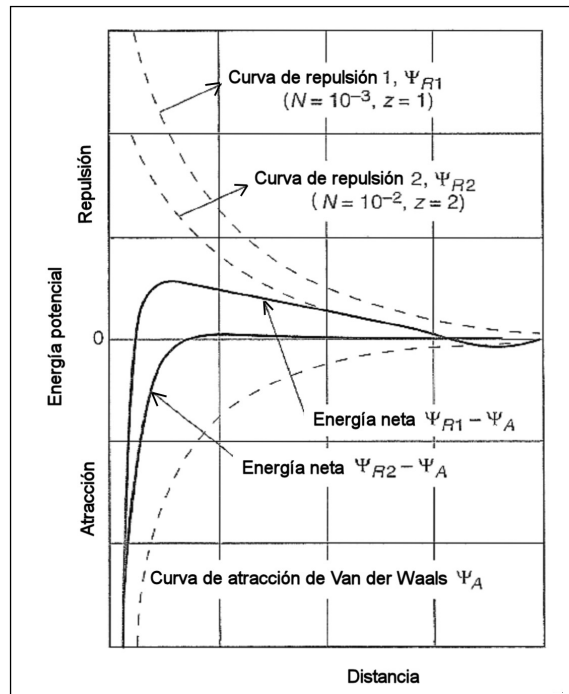


Figura 1.2. Modelo del condensador de placas paralelas para estudiar las interacciones partícula-partícula.

En realidad nos estamos refiriendo a conseguir la reducción del valor del potencial Z de un agua, efecto que se puede lograr mediante dos vías, como se comenta a continuación: acción de contra-iones o de polielectrolitos.

Desestabilización de partículas mediante adición de iones y polielectrolitos

Para conseguir la agregación de las partículas mediante microfloculación pueden emplearse iones que contrarresten la carga eléctrica de la doble capa, o bien adicionar al medio electrolitos cuyo efecto es el de reducir la anchura de la capa difusa, y consiguientemente, el potencial Z asociado.

El efecto de los iones añadidos (*contra-iones*) se puede visualizar en la Figura 1.3, en que se comprueba cómo la adición de ácidos o bases fuertes a un agua reduce la carga de los óxidos u oxihidróxidos metálicos de forma que la energía potencial de superficie del coloide tiende a cero.

La magnitud del efecto dependerá de la concentración y de los iones añadidos. A medida que la carga del contra ion sea más alta, también lo será su capacidad de coagulación logrando una compresión más efectiva de la doble capa. Según la regla de Shultz-Hardy la efectividad en función de la valencia del metal sigue la secuencia “100(+3)/1,6(+2)/0,13(+1)”. El proceso es reversible y el incremento de contra iones provoca la redisolución del agregado formado (Figura 1.3, zona inferior).

Con respecto a los electrolitos, su incremento de concentración en el medio provocará la disminución del potencial Z . En este sentido, se denomina *concentración crítica de coagulación* a la requerida para desestabilizar la suspensión coloidal y es privativa de cada electrolito.

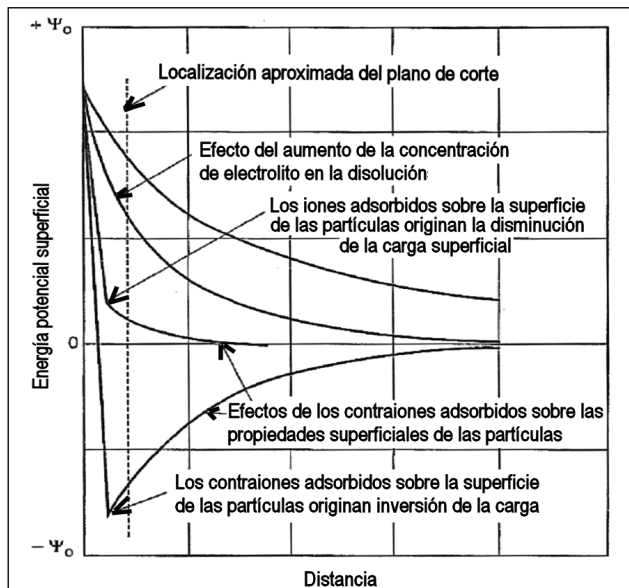


Figura 1.3. Efecto de la adición de contra-iones a un medio acuoso sobre la doble capa eléctrica asociada a un coloide.