

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La contaminación causada por efluentes de la industria textil es un tema que atañe a muchos países. Dentro de los numerosos procesos que se aplican a las fibras textiles, el teñido causa serios problemas porque sus aguas residuales poseen un alto contenido orgánico y además permanecen fuertemente coloreadas. Generalmente los efluentes textiles correctamente tratados pueden descargarse sin inconvenientes a ríos y otras fuentes de agua superficiales. Cuando los efluentes se descargan sin el debido tratamiento, se pueden observar diferencias en la coloración original del cuerpo de agua y la formación de espumas en su superficie; esto se origina por los tintes y tensioactivos, respectivamente. La espuma reduce la proporción de oxígeno transmitido a través de la superficie del río y limita la capacidad de autodepuración de la corriente. Además, los colorantes y tensioactivos pueden en si mismos ser tóxicos para la flora y fauna acuáticas. También es posible que las descargas aumenten la población de peces y algas debido a su contenido de nitrógeno y fósforo (proceso de eutrofización). Estos parámetros deben ser controlados de manera que no se agote el oxígeno disuelto en el agua, pues provocaría su extinción a largo plazo. Otro efecto a considerar es la pérdida de espacios recreativos, debido a la contaminación del agua superficial con el consiguiente perjuicio económico, en particular en zonas turísticas.

Entre las tecnologías avanzadas de oxidación (tecnologías que se basan en la generación de especies transitorias de gran poder oxidante en condiciones suaves mediante diferentes fuentes de energía) la fotocatalisis heterogénea es la única que puede emplear radiación solar para degradar contaminantes, y puede representar una alternativa novedosa, con rendimientos adecuados, limpia y de bajo costo para la eliminación de colorantes provenientes de efluentes textiles.

El rendimiento de un tratamiento fotocatalítico lo determinan los fenómenos de adsorción/desorción, los fenómenos de transporte (transferencia de materia y de energía radiante) y la cinética intrínseca de la reacción. Como consecuencia los procesos fotocatalíticos son procesos complejos de analizar, que dependen de una multitud de variables, empezando por la naturaleza y concentración del contaminante y las condiciones de operación –temperatura, humedad, caudal, etc.-, pasando por el método de preparación y tipo de fotocatalizador o el tipo de fuente de radiación empleada para activar la reacción. Cada caso debe ser estudiado en particular y las conclusiones son difícilmente extrapolables.

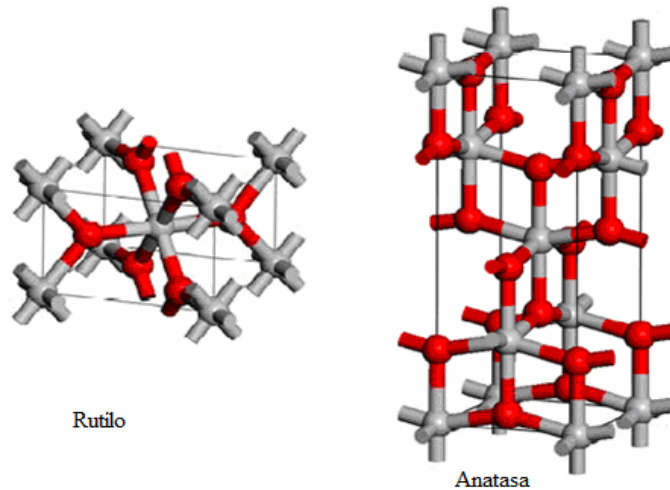
## 1.2 ÓXIDO DE TITANIO ( $TiO_2$ )

Los materiales de  $TiO_2$  han sido estudiados extensivamente debido a su amplia aplicación en pigmentos, soporte de catálisis, fotoconductores, construcción de superficies, materiales dieléctricos, pinturas, productos del cuidado personal, etc. En años recientes, dichos materiales han despertado gran interés y son considerados uno de los materiales más prometedores por las siguientes características:

- Ü Son una de las sustancias químicas más blancas que existen: reflejan prácticamente toda la radiación visible que les llega. Además mantienen el color de forma permanente.
- Ü Son una de las sustancias con índice de refracción más alto (2,4, como el diamante), incluso pulverizado o mezclado con otras cosas. Por la misma razón, son muy opacos. Reflejan prácticamente toda la luz, incluso ultravioleta, y la que no reflejan la absorben.
- Ü Son fotocatalizadores muy eficaces. Esto quiere decir que aceleran mucho las reacciones químicas provocadas por la luz. Hay varios proyectos en marcha para conseguir alternativas a los paneles solares fotovoltaicos, y todos ellos utilizan tintes mezclados con óxido de titanio (IV) para producir una especie de fotosíntesis artificial.
- Ü El óxido de titanio (IV) es un semiconductor sensible a la luz que absorbe radiación electromagnética cerca de la región UV. El óxido de titanio (IV) es anfotérico, muy estable químicamente y no es atacado por la mayoría de los agentes orgánicos e inorgánicos. Se disuelve en ácido sulfúrico concentrado y en ácido fluorhídrico.

Los materiales de  $TiO_2$  pueden existir en una de las siguientes formas cristalinas: anatasa, rutilo y brookita. Diebold [1] ha estudiado las características estructurales básicas de los materiales de anatasa y rutilo debido a que la estructura brookita no es empleada usualmente en investigaciones experimentales. Las dos primeras estructuras cristalinas pertenecen a la clase de octaedro distorsionado. En el rutilo, la distorsión es levemente ortorrómbica donde la celda unidad es estirada hacia una forma cúbica. En anatasa, la distorsión de la red cúbica es más significativa y por ello la simetría resultante es menor que ortorrómbica.

La Figura 1.1 muestra un diagrama estructural de la red de los materiales de anatasa y rutilo.



**Figura 1.1:** Estructura de red de  $TiO_2$  anatasa y rutilo. Ti (gris), O (rojo).

En cada tipo de estructura, el ión titanio está coordinado con seis átomos de oxígeno, los cuales están unidos a tres átomos de titanio y así sucesivamente [2].

### ***1.3 APLICACIONES DE $TiO_2$***

Además de la reducción de la contaminación del aire o de las aguas se han investigado o se están investigando otras múltiples aplicaciones:

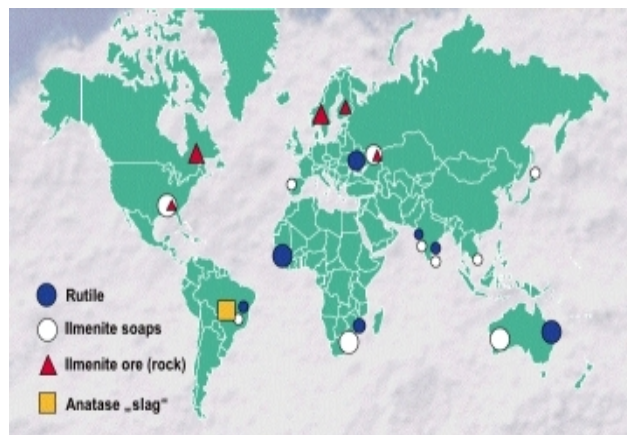
- ü Los pigmentos de óxido de titanio (IV) se utilizan principalmente en la producción de pinturas y plásticos, así como en papel, tintas de impresión, cosméticos, productos textiles y alimentarios. El óxido de titanio (IV) es el pigmento más habitualmente utilizado en el mundo, que proporciona a los productos finales una brillante blancura, opacidad y protección. Este es utilizado en la producción de pinturas que repelen la suciedad.
- ü En el sector de las artes gráficas (impresión) donde se opera con espesores de recubrimientos de menos de 100 micras, se utilizan pigmentos de óxido de titanio (IV) muy finos.
- ü También tiene aplicaciones en las fibras sintéticas, eliminando la apariencia grasosa causada por las propiedades translúcidas de la resina. Los pigmentos de anatasa son los preferidos para esta aplicación.
- ü Otras áreas de aplicación del óxido de titanio (IV) incluyen la industria cerámica, la manufactura de cemento blanco y el coloreado de hule o linoleo. Los pigmentos de óxido de titanio (IV) también se utilizan como absorbentes de rayos UV en

productos para el bronceado, jabones, polvos cosméticos, cremas, pasta de dientes, papel de cigarrillos y la industria cosmética.

Ü El óxido de titanio (IV) también se ha empleado como agente blanqueador y opacador en esmaltes de porcelana, dando un acabado final de gran brillo, dureza y resistencia a ácidos. Además se emplea en pinturas, papel y plásticos, asimismo tiene una amplia gama de aplicaciones en la industria química en general.

#### 1.4 PRODUCCIÓN DE $TiO_2$

El óxido de titanio (IV) es el pigmento blanco más importante producido en el mundo, con unas ventas anuales aproximadas de 4 millones de toneladas y un consumo mundial que aumenta en torno a un 2% anual (2004). La Figura 1.2 muestra los depósitos más importantes del mundo de material crudo básico usado en la manufactura de pigmentos de dióxido de titanio.



**Figura 1.2:** Depósitos más importantes del mundo de material crudo básico usado en la manufactura de dióxido de titanio.

Los principales usuarios son las industrias de pinturas y plásticos. Por cada tonelada de óxido de titanio (IV) fabricado se producen casi 3,8 toneladas de productos derivados. En general, aproximadamente la mitad de estos productos derivados son vendidos, reutilizados o convertidos en otros productos como materia prima en aplicaciones como tratamiento de aguas, prefabricados de yeso, agricultura, cemento y tratamiento de terrenos. Los productos derivados para los cuales no puede encontrarse un mercado son entregados a gestores autorizados para su tratamiento mediante procedimientos ecológicos controlados [3]. La naturaleza no cuenta con los depósitos de

titanio en la forma que se usa actualmente. El titanio usualmente se asocia con el hierro, mayormente como ilmenita [4].

### ***1.5 COLORANTES Y SU EFECTO EN EL MEDIO AMBIENTE***

Los problemas medioambientales que plantea la industria textil proceden de dos fuentes: los métodos de fabricación de géneros textiles y los riesgos asociados con la forma de utilizar los productos. Los principales problemas ambientales que provocan las fábricas de géneros textiles están relacionados con las sustancias tóxicas que liberan a la atmósfera y a las aguas residuales. Además de los agentes potencialmente tóxicos, también los malos olores suelen ser motivo de preocupación.

El proceso de elaboración de productos textiles consiste en un gran número de operaciones unitarias retroalimentadas que utilizan diversas materias primas, como algodón, lana, fibras sintéticas, o mezclas de ellas. El impacto ambiental de sus efluentes líquidos es muy variado, por la gran variedad de materias primas, reactivos y de métodos de producción. En los efluentes se pueden encontrar sales, almidón, peróxidos, tensioactivos, enzimas, colorantes, metales y otros compuestos orgánicos de variada estructura, que provienen de las distintas etapas del proceso global.

La cantidad de agua empleada en los procesos textiles varía en forma considerable, dependiendo del proceso específico y del equipamiento utilizado por la planta. Por ejemplo, en el teñido con colorantes dispersos, se utilizan entre 100 y 150 litros de agua por kilogramo de producto. En la tinción con colorantes reactivos, las cifras varían entre 125 y 170 litros por kilogramo de producto [5].

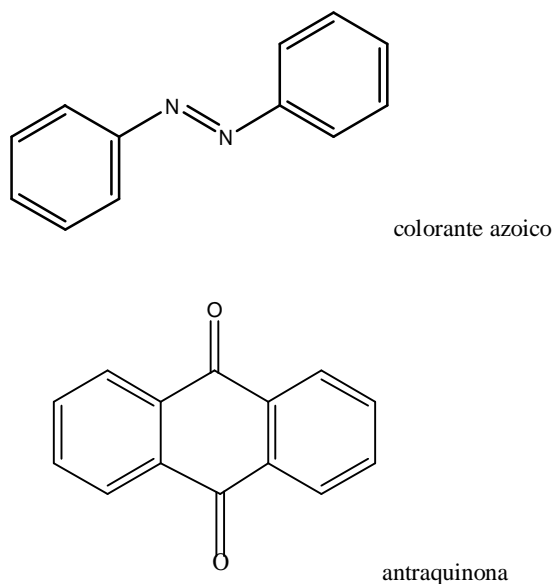
Los procesos de la industria textil no liberan grandes cantidades de metales; sin embargo, aún las pequeñas concentraciones involucradas pueden producir acumulación en los tejidos de animales acuáticos. Muchas veces los efectos se observan a largo plazo, y en la mayoría de los casos son difíciles y costosos de tratar. Las descargas también pueden aumentar la población de peces y algas debido a su alto contenido de nitrógeno, y agotar en el largo plazo el contenido de oxígeno disuelto en el agua.

Los colorantes provenientes de las industrias textiles tienen gran persistencia en el ambiente. Se estima que aproximadamente 400 toneladas diarias pueden permanecer en el mismo, ya sea por disolución primaria o suspendidos en el agua [6].

Una gran proporción de los colorantes no son directamente tóxicos para los organismos vivos; sin embargo, la fuerte coloración que imparten a los medios de

descarga puede llegar a suprimir los procesos fotosintéticos en los cursos de agua, por lo que su presencia debe ser controlada [7].

En general, las moléculas de los colorantes utilizados en la actualidad son de estructuras muy variadas y complejas. La mayoría de ellos son de origen sintético, muy solubles en agua, altamente resistentes a la acción de agentes químicos y poco biodegradables. Alrededor del 60 % de los colorantes en uso en la industria textil actual son colorantes reactivos, que se caracterizan por formar una unión éter con la fibra, lo que garantiza una mayor duración del color en el tejido. Sus estructuras frecuentemente contienen grupos azo o antraquinona (Figura 1.3). Dadas sus características de solubilidad y estabilidad, los métodos convencionales de floculación, oxidación química, separación en membranas y sedimentación, no son útiles en la remoción de estos compuestos.



**Figura 1.3:** Ejemplos estructurales de colorantes textiles.

Sin embargo, el proceso de adsorción de colorantes sobre una superficie apropiada es un proceso fisicoquímico mediante el cual se producen efluentes de alta calidad, que contienen bajas concentraciones de compuestos orgánicos. Además para este proceso se requiere un equipamiento relativamente sencillo.

Los compuestos de TiO<sub>2</sub> han despertado gran interés en los últimos años para degradar contaminantes. Se están empleando como fotocatalizadores debido a su

estabilidad fotoquímica, bajo costo y no toxicidad [8]. Además en el proceso no se consumen oxidantes químicos sino oxígeno atmosférico.

## **1.6 ORDENANZA MUNICIPAL PARA EL VERTIDO DE EFLUENTES LIQUIDOS**

A modo informativo se mencionan algunos de los límites establecidos por la Norma Municipal de la Ciudad de Bahía Blanca (Ordenanza N° 8862) para el vertido de efluentes líquidos.

- ü **Hidrocarburos ≤ 30 mg / L:** Constituyen una contaminación muy grave. En su mayor parte, en la industria textil son aportados por los hilos que contienen un revestimiento aceitoso para lograr unas determinadas características de deslizamiento. Otra posible fuente son los restos de agentes de apresto (impregnación).
- ü **Metales pesados:** En algunos procedimientos de tintura las aguas residuales pueden contener cromo y cobre – derivados de procedimientos de acabado de alta calidad- o cinc.
  - Cromo total: ≤ 0.5 mg / L
  - Cobre total: ≤ 0.5 mg / L
  - Cinc: ≤ 2 mg / L
- ü **Temperatura:** En los procesos de tintado, se evacúa tal cantidad de agua caliente, que si no se adoptasen medidas apropiadas, la temperatura de la totalidad de las aguas residuales podría superar los 40°C. Sin embargo, solamente están permitidos 35°C. En muchos casos, este calor se puede recuperar mediante intercambiadores de calor y reconducirse al proceso.
- ü **pH 6-10:** Mientras que las fábricas que tratan la lana, arrojan en total un excedente ácido que tiene que neutralizarse con álcali, el valor de pH de las aguas residuales de las industrias elaboradoras del algodón se encuentra por lo general en un sector alcalino.
- ü **Sólidos sedimentables, 2 h ≤ 5 mL / L:** Los valores sobre las sustancias sedimentables que se acostumbra a determinar en las aguas residuales, están sometidos a grandes oscilaciones; dependen de muchos factores, tales como el procedimiento de ennoblecimiento, el tipo de fibra o su acondicionamiento y si

el tratamiento es continuo o por cargas. Ocasionalmente, las sustancias no disueltas se quedan incluso en suspensión y no se pueden filtrar.

ü **Total Sólidos Suspendidos  $\leq 150$  mg / L**

ü **Color  $\leq 200$  ppm:** Una carga específica para el medio ambiente derivada de los procesos de ennoblecimiento textil se debe a los colorantes hidrosolubles. La técnica de adsorción permite una recuperación parcial de los contaminantes y un reciclaje de las aguas residuales del proceso.

ü **DBO<sub>5</sub>  $\leq 100$  mg / L:** DBO es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Se utiliza para medir el grado de contaminación, normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción (DBO<sub>5</sub>), y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O<sub>2</sub>/L).

ü **DQO  $\leq 300$  mg / L:** DQO es un parámetro que mide la demanda de oxígeno del agua utilizando un agente químico en lugar de los biológicos. Es una prueba más rápida que la DBO. Oxida casi todos los compuestos orgánicos, en consecuencia es mayor que la DBO.

ü **Cloro Libre  $\leq 5$  mg / L:** Se emplea para blanqueos al cloro, colorantes reactivos con cloro y jabones disolventes enriquecidos con disolventes de la serie de hidrocarburos clorados, como los que se emplean exclusivamente en la “limpieza en seco” para el desengrasado de los artículos de poliéster.

ü **Detergentes  $\leq 2$  mg / L:** Se emplean como productos de lavado, emulsionantes, humectantes, correctores de los procesos de tintura, como agentes auxiliares para elevar la lisura y suavidad.

## ***1.7 $TiO_2$ SEMICONDUCTOR Y FOTOACTIVIDAD***

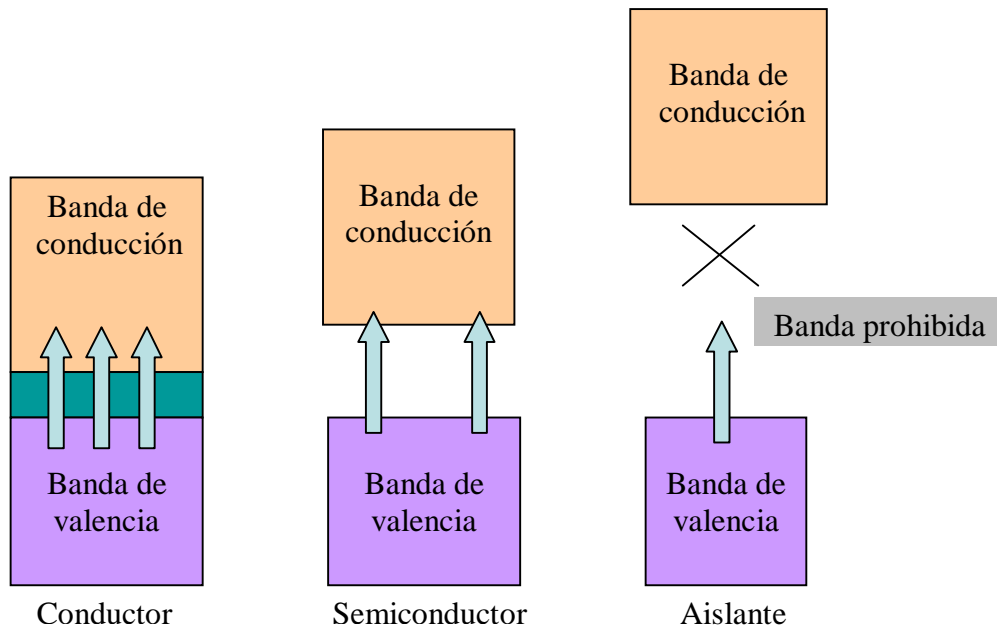
Los materiales semiconductores como el óxido de titanio son caracterizados por su estructura electrónica, la cuál puede describirse por la teoría de bandas de los materiales.

Mediante la teoría de bandas es posible interpretar el comportamiento eléctrico de sólidos cristalinos, es decir, la existencia de cristales muy conductores, como los metales; de aislantes, como los cristales iónicos a bajas temperaturas o el diamante, y de semiconductores, es decir, sustancias que poseen niveles de conducción eléctrica intermedios entre metales y aislantes, como es el  $TiO_2$ . Ese comportamiento depende



tanto de la estructura de bandas como de la forma en que estas bandas están ocupadas por los electrones [9].

La Figura 1.4 ilustra la diferencia en la estructura electrónica de un aislante, de un semiconductor y de un conductor. De acuerdo a la teoría de bandas la banda de valencia (BV) existe como niveles de energía ocupados, mientras que la banda de conducción (BC) consiste en estados electrónicos disponibles que están vacantes hasta que el material es excitado térmicamente o electrónicamente.



**Figura 1.4:** Diferencia en la estructura electrónica de un aislante, de un semiconductor y de un conductor. Las flechas indican transiciones electrónicas.

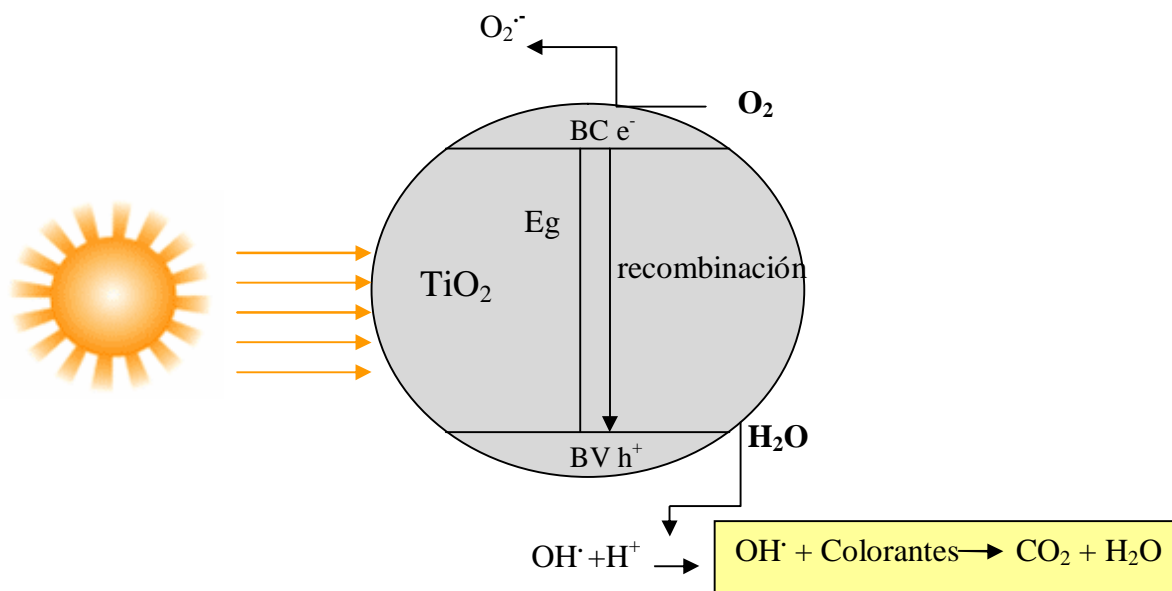
Los electrones pueden promoverse desde la banda de valencia hacia la banda de conducción por diferentes formas de energía que la calórica, como por ejemplo por la luz. Cuando se ilumina al  $\text{TiO}_2$  con un fotón de energía igual o mayor que su ancho de banda ( $E_g$ ), se produce la formación de pares electrón/hueco ( $e^-/h^+$ ) con electrones libres producidos en la banda de conducción vacía ( $e^-_{BC}$ ) dejando atrás una vacancia de electrón o “hueco” en la banda de valencia ( $h^+_{BV}$ ). Si se mantiene la separación de carga, el electrón y el hueco pueden migrar a la superficie del catalizador donde participan en reacciones redox con las especies adsorbidas. Especialmente,  $h^+_{BV}$  puede reaccionar con  $\text{H}_2\text{O}$  o  $\text{OH}^-$  (enlazados en la superficie o provenientes de la humedad del aire) para producir radicales hidroxilo que tienen un elevado potencial de oxidación y atacan cualquier sustancia orgánica que se encuentre en el medio, dando lugar a un

proceso cuyo resultado es una progresiva ruptura de enlaces hasta concluir en compuestos como el dióxido de carbono, agua y simples ácidos inorgánicos diluidos. El  $e^-_{BC}$  es atrapado por el  $O_2$  para generar el anión radical superóxido, como se indica en las siguientes ecuaciones [10]:



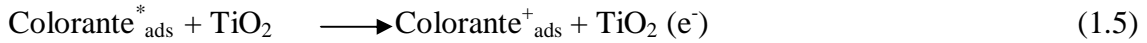
En conclusión, los radicales hidroxilos ( $OH^\cdot$ ) y los aniones radicales superóxido ( $O_2^{\cdot-}$ ) son las especies oxidantes primarias en el proceso de oxidación fotocatalítica. Estas reacciones oxidativas podrían resultar en la remoción de los colorantes provenientes de los efluentes de las industrias textiles.

La Figura 1.5 muestra de manera resumida el proceso de fotodegradación explicado anteriormente, iniciado por el semiconductor de óxido de titanio. La longitud de onda incidente debe ser menor a 390 nm.



**Figura 1.5:** Proceso de destoxificación solar por vía fotocatalítica. Representación esquemática de una partícula de catalizador. Eg es el ancho de banda.

Alternativamente, la absorción directa de luz por el colorante, podría permitir el aporte de carga desde el estado excitado del colorante a la banda de conducción del semiconductor como se resume en las siguientes ecuaciones [11]:



El proceso fotocatalítico presenta una serie de ventajas a la hora de su aplicación práctica:

- Es un método que realmente destruye sustancias tóxicas no biodegradables hasta compuestos totalmente inocuos con el atractivo de usar una energía medioambientalmente benigna como es la energía solar.
- El proceso es capaz de mineralizar prácticamente cualquier tipo de sustancias orgánicas, incluidas mezclas complejas y compuestos difícilmente tratables por otros métodos, como es el caso de las dioxinas, disolventes, pesticidas, etc.
- El proceso permite la oxidación de elementos inorgánicos como los cianuros.
- Al tratarse de un proceso de oxidación-reducción, la degradación mediante fotocátalisis permite realizar una reducción de metales simultánea a la oxidación de compuestos orgánicos.
- Las sustancias contaminantes son eliminadas en un único proceso in situ sin necesidad de ser extraídas previamente ni transportadas.
- El proceso tiene lugar a temperatura ambiente.
- Puede ser usado en combinación con cualquier otro tratamiento convencional, lo que permite su fácil integración en procesos industriales.

De las formas de TiO<sub>2</sub> existentes citadas en la introducción de esta sección, la anatasa provee la mejor fotoactividad, lo cual se atribuye a la baja velocidad de recombinación de los electrones y huecos generados [12].

## ***1.8 ADSORCIÓN EN SUPERFICIES***

Se denomina adsorción al proceso de acumulación de partículas sobre una superficie; la sustancia que se adsorbe es el adsorbato y el material sobre el cual se

adsorbe es el adsorbente o sustrato. La extensión de superficie cubierta se expresa normalmente como la fracción de recubrimiento ( $\theta$ ) definida como:

$\theta = \text{Número de sitios de adsorción ocupados} / \text{Número de posiciones de adsorción disponibles.}$

En la adsorción de solutos a partir de la solución están implicadas tanto fuerzas físicas como químicas. Las fuerzas físicas incluyen fuerzas de van der Waals y los complejos de esfera externa. Las fuerzas químicas incluyen complejación de esfera interna que implica un mecanismo de intercambio de ligando, unión covalente y puente hidrógeno.

Los complejos superficiales de esfera externa tienen al menos una molécula de agua o solvente interpuesta entre las especies del adsorbato y el sitio del adsorbente al cual está unido para formar un complejo de adsorción. Un complejo superficial de esfera interna no tiene moléculas de agua interpuestas entre las especies del adsorbato y el sitio adsorbente que une a éstos.

Los complejos de esfera externa implican interacciones electrostáticas y son débiles comparados a los complejos de esfera interna en los cuales la unión es covalente o iónica. La complejación de esfera externa es usualmente un proceso rápido, reversible, y la adsorción ocurre sólo en superficies con carga opuesta a la del adsorbato. La complejación de esfera interna es usualmente más lenta que la de esfera externa y puede ocurrir en una superficie sin importar la carga superficial. La complejación de esfera externa e interna pueden ocurrir simultáneamente [13].

## 1.9 OBJETIVOS

Las especies catalíticamente activas confinadas en espacios restringidos se transforman en centros de mayor actividad. La posibilidad de variar la forma y el tamaño de los poros, cavidades y canales que conforman un sistema poroso, así como la relativa facilidad con la que su composición intra y extraestructural se pueda modificar y el ordenamiento espacial de los átomos que constituyen su estructura, muestran la gran versatilidad que se puede obtener con los materiales porosos si estos factores pueden ser dirigidos a voluntad. La síntesis de materiales porosos, con poros del orden de varios nm, es una técnica relativamente reciente (los primeros fueron sintetizados en 1992) [14, 15, 16, 17] en la cual se utilizan como moldes microestructuras producidas por surfactantes, tales como microemulsiones, micelas, cristales líquidos, geles y otras, sobre cuyas superficies se condensan materiales que mediante diversos tratamientos forman capas de óxidos metálicos (sílice o alúmina), los cuales son luego liberados del soporte orgánico. Se fijan así en "negativo" imágenes tridimensionales de las microestructuras que sirvieron de base. Estos materiales han despertado considerable atención por la posibilidad de emplearlos en catálisis. Por ejemplo, la introducción de heteroátomos inorgánicos (Al, Ti, V) [14, 18, 19] dentro de la matriz de sílice y la sujeción de derivados reactivos como metalocenos [20] y grupos funcionales orgánicos [21] mediante la reacción con los grupos Si-OH remanentes de la sílice, se han explorado como rutas para la funcionalización de estos materiales con la finalidad de obtener catalizadores ordenados mesoporosos.

Los colorantes reactivos son materiales eliminados en los efluentes de la industria con efectos muy perniciosos en el medio ambiente [22]. Son solubles en agua, y se estima que alrededor del 20 % del colorante usado permanece en los efluentes industriales durante la producción [23], y causan no solo contaminación visual sino que también son perjudiciales para la flora y fauna acuáticas. Consecuentemente es importante el estudio de materiales que sirvan para reducir o eliminar los contaminantes de las aguas residuales provenientes de las industrias textiles, antes de liberarlas al medio ambiente.

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es evaluar la posibilidad de emplear la fotocatalisis heterogénea y la técnica de adsorción para la eliminación de colorantes, con énfasis en su empleo en el tratamiento de efluentes. Para ello se utilizará óxido de titanio.

### **1.9.1 OBJETIVOS GENERALES**

Con el objetivo final en mente se marcaron los siguientes objetivos parciales:

1. Síntesis de materiales de TiO<sub>2</sub> obtenidos a partir de diferentes metodologías, con estructuras de diferente morfología y con diferentes estructuras cristalinas.
2. Dopaje del TiO<sub>2</sub> con el polisacárido quitosano para estudiar la remoción simultánea de colorantes aniónicos y catiónicos.
3. Dopaje de TiO<sub>2</sub> con impurezas metálicas, como por ejemplo con el metal Ag para favorecer la separación de cargas y así mejorar el proceso de fotodegradación de contaminantes.
4. Estudio del efecto de la incorporación de aditivos e impurezas metálicas en la remoción de colorantes y su influencia en el producto final.
5. Caracterización de los fotocatalizadores híbridos sintetizados, con las técnicas típicas de caracterización.
6. Estudio de la actividad fotocatalítica y de su dependencia con las principales variables de operación - concentración del contaminante, temperatura- y de preparación del catalizador –composición química, cantidad del semiconductor.
7. Estudio experimental de adsorción de colorantes sobre los materiales de TiO<sub>2</sub>, con especial atención a la eliminación de contaminantes en los efluentes de la industria textil.
8. Estudio teórico de adsorción de colorantes sobre los materiales de TiO<sub>2</sub>.

## 1.10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Diebold U. *Surf. Sci. Rep.* 48 (2003) 53-229.
- [2] Allen N, Edge M, Verran J, Stratton J, Maltby J, Bygott C. *Polymer degradation and stability* 93 (9) (2008) 1632-1646.
- [3] Huntsman Empresa líder mundial productora de óxido de titanio (IV).
- [4] Kronos World Wide company, INC.
- [5] EPA Office of Compliance Sector Notebook, Project: Profile of the Textile Industry. U. S Environmental Protection Agency (1997).
- [6] Reisch M. S. *Chem. Eng. News*, 74 3 (1996) 10-12.
- [7] O'Neill C, Hawkes F.R, Hawkes D. L, Lourenco M, Pinheiro H.M, Delee W. J. *Chem. Technol. Biotechnol.*, 74 (1999) 1009-1018.
- [8] Hoffman M. R, Martin S.T, Choi W, Bahnemann D. W. *Chem Rev.*, 95 (1995) 69-98.
- [9] Bazan J. C. *Washington: Organización de los Estados Americanos* (1984) 25-26.
- [10] Turchi C. S, Ollis D. F. *J. Catal.*, 122 1 (1990) 178-192
- [11] Faisal M, Abu Tariq M. *Dyes and Pigments* 72 2 (2007) 233-239.
- [12] Hoffmann M. R, Martin S. T, Choi W. Bahnemann D. W. *Chem. Rev.*, 95 (1995) 69-96.
- [13] Sparks, D. L. *Environmental soil chemistry. Elsevier Science. USA.* (2003)
- [14] Beck J. S, Vartuli J. C, Roth W. J, Leonowicz M. E, Kreszege C. T, Schmitt K. D, Chu C. T. W, Olson D. H, Shepard E. W, Mc Cullen S. B, Higgins J. B, Schlenker J. L. *J Am Chem Soc.*, 114 (1992) 10834-10843.
- [15] Beck J. S, Vartuli J. C, Kennedy G. J, Kreszege C. T, Roth W. J, Schranm S. E. *Chem Mater.*, 6 (1994) 1861.
- [16] Vartuli J. C, Kreszege C. T, Leonowicz M. E, Chu A. S, McCullen S. B, Johnosn I. D, Shepard E. W, *Chem Mater.*, 6 (1994) 2070-2077.
- [17] Vartuli J. C, Schmitt K. D, Kreszege C. T, Roth W. J, Leonowicz M. E, McCullen S. B, Hellring S. D, Beck J. S, Schlenker J. L, Olson D. H, Shepard E. W, *Chem Mater.*, 6 (1994) 2317.
- [18] Kregse C. T, Leonowicz M. E, Roth W. J, Vartuli J. C, Beck J. S. *Nature* 359 (1992) 710-712.
- [19] Huo Q, Margolese D. I, Ciesla U, Demuth D. G, Feng P, Gier T. E, Sieger P, Firouzi A, Chmelka B. F, Schüth F, Stucky G.D. *Chem Mater.*, 6 1176 (1994).

[20] Huber C, Moller K, Bein T. *J Chem Soc, Chem Comm* 2619 (1994); Matsmeyer T, Rey F, Sankar G, Thomas J. M. *Nature* 378 (1995) 159.

[21] Brunel D, Cauvel A, Fajula F, DiRenzo F. Bonnevoit L, Kaliagine S, Eds. Elsevier, (1995) 173.

[22] Ramakrishna K.R, Viraragharan T, *Water Sci. Technol.*, 36 189 (1997).

[23] Netpradit S, Thiravetyan P, Towprayoon S, *Water Res.*, 38 (2004) 71.