

## 6 INTRODUCCIÓN.

La Reunión Cumbre sobre Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, realizada en Johannesburgo, en 2002, calificó como crucial el tema de la gestión racional del agua en todo el planeta. En regiones pobres del tercer Mundo, la contaminación del agua induce problemas sociales, económicos y de salud, tales como enfermedades endémicas fatales (hepatitis, fiebre tifoidea, cólera) (Litter & Mansilla, 2003).

La calidad del agua y la salud humana se consideran esenciales en la prevención de este tipo de enfermedades y en el mejoramiento de la calidad de vida. Especialmente en las áreas subtropicales, las bacterias patógenas provocan daños severos a la población, por lo cual su efecto no debe ser subestimado (Dillert, 1998).

Deficiencias en los sistemas de distribución de agua asociadas con enfermedades adquiridas mediante la ingesta de agua contaminada son responsables de aproximadamente el 30% de los casos de muerte en América Latina; seis veces más el porcentaje presente en los países desarrollados (Garrido, 2000). Según datos de la Organización Mundial de la Salud, alrededor de 80,000 niños mueren cada año en América Latina por enfermedades asociadas a las diarreas que, generalmente, son originadas por las condiciones insalubres del agua.

Tecnologías convencionales como cloración se utilizan comúnmente para remover microorganismos de las aguas contaminadas. Aunque estos sistemas de control tienen importantes aplicaciones, se han desarrollado métodos alternativos de desinfección debido a crecientes preocupaciones acerca de la toxicidad de los derivados residuales clorados (Tosa & Hirata, 1999).

Las metodologías tradicionales de tratamiento de aguas son extraordinariamente caras, por lo que se hace necesario el desarrollo de tecnologías simples, eficientes y de bajo costo para la eliminación *in situ* de estas sustancias. Por otro lado, para los habitantes por debajo de la línea de pobreza, el tradicional método de hervir el agua para su potabilización puede no ser

una solución adecuada por la posibilidad de ocurrencia de incendios y la escasez de energía (Litter & Mansilla, 2003).

Por lo antes mencionado, los problemas relacionados con la gestión del agua en América latina son muy complejos y se acentúan por la falta de técnicas bien establecidas para desinfección y descontaminación. Por ello, es imprescindible contar con procedimientos innovadores, económicos y socialmente aceptados por la población (Litter & Mansilla, 2003).

Entre estos métodos, el uso de la radiación ultravioleta se ha convertido en una de las alternativas más importantes alrededor del mundo (Tosa & Hirata, 1999). Se ha reportado en investigaciones previas que la energía solar puede ser utilizada efectivamente en desinfección de agua, dado que la inactivación de los microorganismos se alcanza, ya sea calentando el agua a altas temperaturas (usualmente arriba de 70°C), o exponiéndola a radiación solar ultravioleta, especialmente cerca del rango UV (300-400nm). (Saito & El-Ghetany, 2002).

No obstante, debido a que solo el 5% del espectro solar está conformado por luz ultravioleta, una alternativa para incrementar la eficiencia del proceso consiste en utilizar un fotocatalizador excitable por la energía de los fotones provistos por el espectro solar visible (Rodríguez & Zioli, 2007).

Los métodos basados en la catálisis y fotoquímica se denominan Procesos Avanzados de Oxidación (PAO) (Malato, 1999). En años recientes ha existido un gran progreso en estas tecnologías, basadas en la generación (por cualquier medio) de intermediarios altamente reactivos (p.e., radicales hidroxilos), los cuales inician una secuencia de reacciones que provocan la destrucción de los contaminantes en agua, tierra y aire. Sin embargo, los Procesos Avanzados de Oxidación bien establecidos como el uso de Ozono o la Oxidación Fotoquímica mediante Peróxido de Hidrógeno, están limitados por sus altos costos, resultado de sus altos requerimientos de energía y reactivos.

Debido a esto, la fotocatalisis heterogénea, basada en la interacción de la luz con nanopartículas ha emergido como una técnica innovadora y prometedora para purificación

de agua y aguas residuales (Hagfeld & Gratzel, 1995) (Linsebigler, Lu, & Yates, 1995) (Burda, Narayanan, & El-Sayed, 2005).

Entre los diversos materiales que se han desarrollado para aplicaciones fotocatalíticas, el Dióxido de Titanio ha recibido gran atención por su alta reactividad y estabilidad química bajo irradiación de luz UV ( $\lambda < 390$  nm) (Hagfeld & Gratzel, 1995) (Linsebigler, Lu, & Yates, 1995) (Burda, Narayanan, & El-Sayed, 2005) (Mills & Hunte, 1997) (Fujishima & Honda, 1972).

Entre los PAO, la fotocatálisis heterogénea que utiliza semiconductores como catalizadores (UV/TiO<sub>2</sub>), emplea fotones del rango ultravioleta del espectro solar como la fuente de energía para la generación de radicales libres que conducen a la oxidación de compuestos orgánicos y desinfección. No obstante, debido a su amplia brecha de banda (3.2eV), el TiO<sub>2</sub> solo puede utilizarse en la región UV, que conforma menos del 5% del espectro solar, mientras que la región visible representa cerca del 45% de la energía solar.

Es interesante recalcar que muchos estudios de laboratorio han demostrado la viabilidad de la descontaminación fotocatalítica para casi todos los tipos de compuestos peligrosos. (Rodríguez & Zioli, 2007). Esto es de gran interés debido a que se puede utilizar luz UV natural (solar) y una fracción de luz visible si el semiconductor utilizado tiene una apropiada banda de separación entre sus bandas de valencia y conducción, que puede ser superada por la energía contenida en un fotón solar ( $\lambda < 300$ nm).

En años recientes ha crecido el interés en aumentar la respuesta óptica del TiO<sub>2</sub> del espectro UV al visible con el fin de incrementar la eficiencia de la fotocatálisis por TiO<sub>2</sub>, y dopar selectivamente el catalizador es una de las estrategias más efectivas para cambiar la estructura intrínseca de la banda de TiO<sub>2</sub>, lo cual puede promover la actividad fotocatalítica incrementando la sensibilidad a la luz solar (Yu, Ho, Yu, Yip, & Zhao, 2005) (Asahi, Ohwaki, & Taga, 2001) (Buera, Lou, Stout, & Gole, 2003) (Khan, Al-Shahry, & Ingler, 2002) (Park, Zhang, & Wei, 2002).

## 6.1 RADIACIÓN SOLAR.

El aprovechamiento de la radiación solar en general, y del espectro UV en particular, se considera de interés, siendo la existencia de una fuente de radiación UV la clave de cualquier proceso fotocatalítico mediado por  $\text{TiO}_2$ . De toda la energía proveniente del Sol, la Tierra recibe  $1.5 \times 10^{18}$  kWh, por año, aproximadamente 28,000 veces el consumo mundial energético. La radiación en el exterior de la atmósfera tiene una longitud de onda entre los 0.2 y 50  $\mu\text{m}$ , la cual se reduce a un intervalo entre 0.3 y 3  $\mu\text{m}$ , cuando alcanza la superficie, debido a la absorción por diversos componentes atmosféricos (ozono, oxígeno,  $\text{CO}_2$ , aerosoles, vapor de agua, nubes).

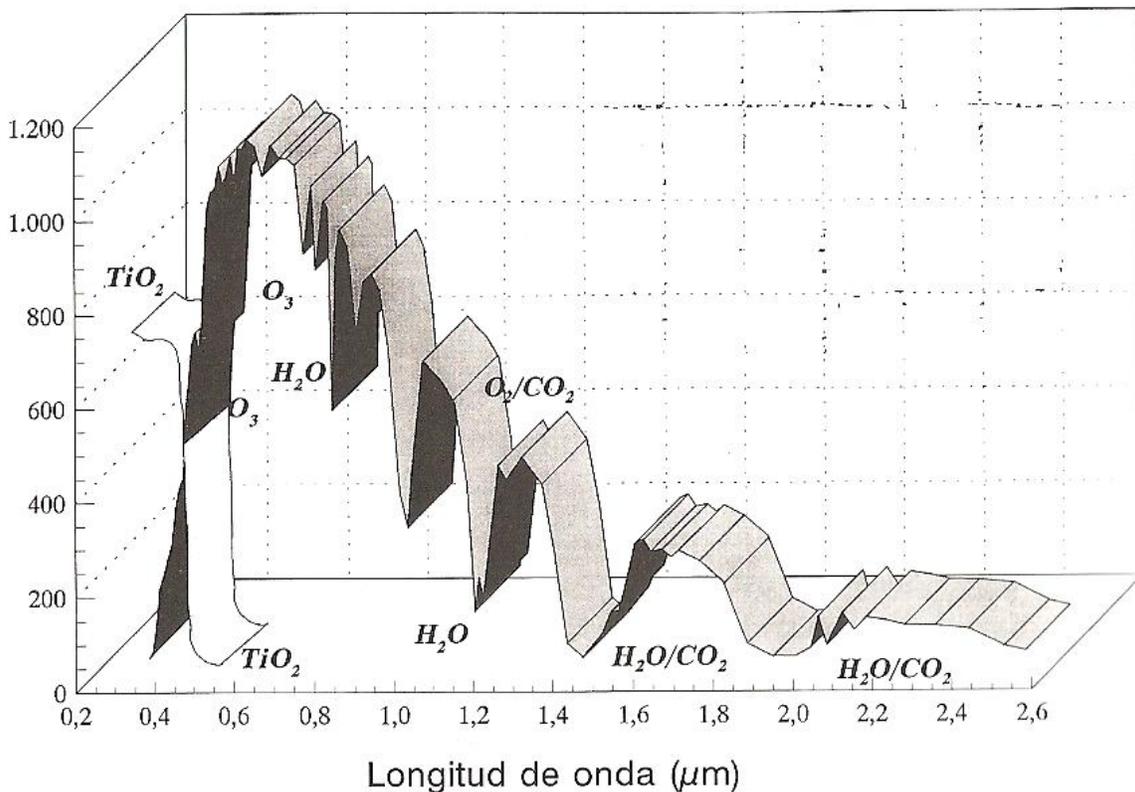


Figura 1. Irradiancia solar ( $\text{W/nm.m}^2$ ). Espectro de Irradiancia Solar sobre la superficie terrestre y absortividad del  $\text{TiO}_2$  (franja aprovechable por el catalizador).

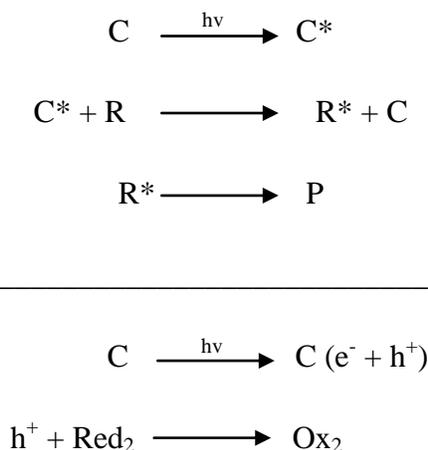
La Figura 1 muestra claramente la parte reducida del espectro solar que puede ser utilizada en procesos fotocatalíticos con TiO<sub>2</sub> que posee una gran absorptividad en la franja UV del espectro solar; pero, como fuente de energía es barata y abundante; por lo que, aún bajo estas limitantes, es interesante utilizarla.

## 6.2 MECANISMO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA.

Se han llevado a cabo muchos estudios utilizando TiO<sub>2</sub> irradiado con luz UV para la inactivación de microorganismos, principalmente virus y bacterias, en reactores fotocatalíticos y solares (Rodríguez & Ziolli, 2007)

La fotocatalisis se define como la “aceleración de una fotorreacción mediante la presencia de un catalizador”. En donde el catalizador activado por la absorción de luz acelera el proceso mediante la aparición de pares hueco/electrón si el catalizador es un semiconductor (Pelizzetti, 1986a).

En este proceso, los electrones excitados son transferidos al espécimen reducible, al mismo tiempo que el catalizador acepta electrones de la especie oxidable, la cual ocupa los huecos. De esta forma, el flujo de electrones es nulo y el catalizador permanece inalterado (Fox M. , 1983)





En donde:

C= Catalizador (TiO<sub>2</sub>).

R= Espécimen reducible (O<sub>2</sub>).

P= Productos.

\*= Estado Excitado.

Se espera que el proceso de fotocatalisis aplicado a la degradación de compuestos orgánicos comprenda alguno de los siguientes pasos (Rodríguez & Zioli, 2007):

1. Mediante un mecanismo directo en el cual la oxidación de los compuestos orgánicos ocurre directamente en los huecos de la banda de valencia del semiconductor (sitio de oxidación);
2. Mediante un mecanismo indirecto, cuando las moléculas de agua adsorbidas en los huecos de las bandas de valencia del semiconductor forman radicales hidroxilos  $\cdot\text{OH}$ , y subsecuentemente atacan los compuestos orgánicos adsorbidos por el catalizador o cerca de la interface.

Bahnemann y colaboradores han propuesto que una partícula semiconductor es un fotocatalizador ideal si

- a) Los productos formados son altamente específicos,
- b) El catalizador permanece inalterado durante el proceso,
- c) Se requiere la formación de los pares hueco/electrón (generada mediante la absorción de fotones con mayor energía que aquella necesaria para mover un electrón de la banda de valencia a la de conducción) y,
- d) La energía del fotón no se almacena en los productos finales, siendo una reacción exotérmica y solo cinéticamente atrasada (Bahnemann & al, 1991b).

Estas cuatro características son aceptadas como lo óptimo para considerar un proceso ideal (Pelizzetti, 1986a).

En general, en fotocatalisis el paso limitante para la degradación es la formación de las especies activas  $\cdot\text{OH}$ , a lo largo de las reacciones en la superficie del  $\text{TiO}_2$ . La formación fotoquímica de los peróxidos ocurre en presencia de Oxígeno, en un medio acuoso, y actúa como precursor de muchas especies reactivas en reacciones generadas por luz. (Rodríguez

& Ziolli, 2007). Debido a la naturaleza altamente oxidante de este compuesto, el radical hidroxilo es capaz de transformar completamente carbono orgánico a CO<sub>2</sub>.

En fotocatalisis heterogénea se usan óxidos semiconductores como catalizadores. La superficie de estos proporciona un entorno en el cual es posible iniciar, mediante irradiación, reacciones de óxido-reducción. Por definición (Fox & Dulay, 1993) los semiconductores poseen bandas asociadas con niveles de energía espaciados entre sí. La de menor energía presenta la mayor densidad electrónica y está asociada con los enlaces covalentes entre los átomos, recibiendo el nombre de la banda de valencia. Por otra parte, los niveles de más alta energía se encuentran vacíos y se denominan bandas de conducción, ya que están relacionados con esta propiedad en los materiales. La diferencia de energía entre la banda de valencia y la de conducción define, entre otros aspectos, la sensibilidad del semiconductor a la radiación con una cierta longitud de onda (Fajardo, Sánchis, & Thomas).

### 6.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MECANISMO.

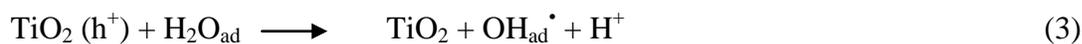
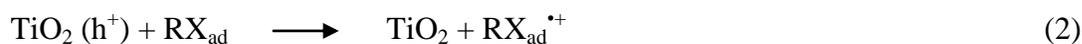
Las características de absorción espectrales del TiO<sub>2</sub> permiten su excitación en las regiones de UV. El radical hidroxilo (<sup>•</sup>OH) es el principal espécimen oxidante para la fotooxidación de la mayoría de los compuestos estudiados. El primer efecto, después de la absorción de la radiación (cerca del UV,  $\lambda \leq 387$  nm), es la generación de los pares hueco/electrón, los cuales están separados entre las bandas de valencia y conducción, y se mantienen por los donadores y aceptores de electrones.

En la ecuación 1 se presenta el proceso de formación del par hueco-electrón.

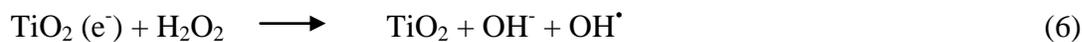


Para evitar la recombinación de los pares generados, los compuestos Red<sub>2</sub> y Ox<sub>1</sub> deben ser absorbidos en la superficie, antes de que el catalizador sea excitado por la luz. Los huecos mantienen radicales <sup>•</sup>OH ligados a la superficie.

Durante la fotocatalisis ocurren dos reacciones de oxidación: la transferencia de un electrón del substrato adsorbido RX representada en la ecuación 2 (Fox & Dulay, 1993) y la transferencia de electrones de las moléculas del solvente (H<sub>2</sub>O y OH<sup>-</sup>) (ecuaciones 3 y 4), las cuales inician la reacción en cadena por radicales libres (Malato, 1999).



El oxígeno molecular que debe estar presente en todos los procesos de degradaciones oxidativas, es la especie que captura los electrones en estas reacciones desde la banda de conducción del catalizador (ecuación 5). El anión superóxido y su forma protonada generan peróxido de hidrógeno (Braun, Viriot, & André, 1990). También se ha demostrado (Ollis, Pelizzett, & Achiavelo, 1991) que el peróxido de hidrógeno favorece la velocidad de la fotodegradación, a través de la reacción 6. Los contaminantes orgánicos adsorbidos en la superficie de las partículas del TiO<sub>2</sub> se oxidan por los radicales OH<sup>•</sup>.



La fotoexcitación con una energía igual o mayor que la del espacio entre las bandas promueve un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, creando un hueco deficiente de electrones (h<sup>+</sup>). Si un hueco foto-generado alcanza la superficie del semiconductor, puede reaccionar con un substrato adsorbido a través de la transferencia electrónica interfacial, asumiendo que el adsorbato posee un potencial redox apropiado para que se lleve a cabo una reacción termodinámicamente permitida. Por lo tanto, un agente reductor puede oxidarse al transferir un electrón al hueco foto-generado en la superficie, y

un oxidante adsorbido puede reducirse al aceptar un electrón de la superficie (Fajardo, Sánchis, & Thomas) (Véanse Figura 2, 3 y 4).

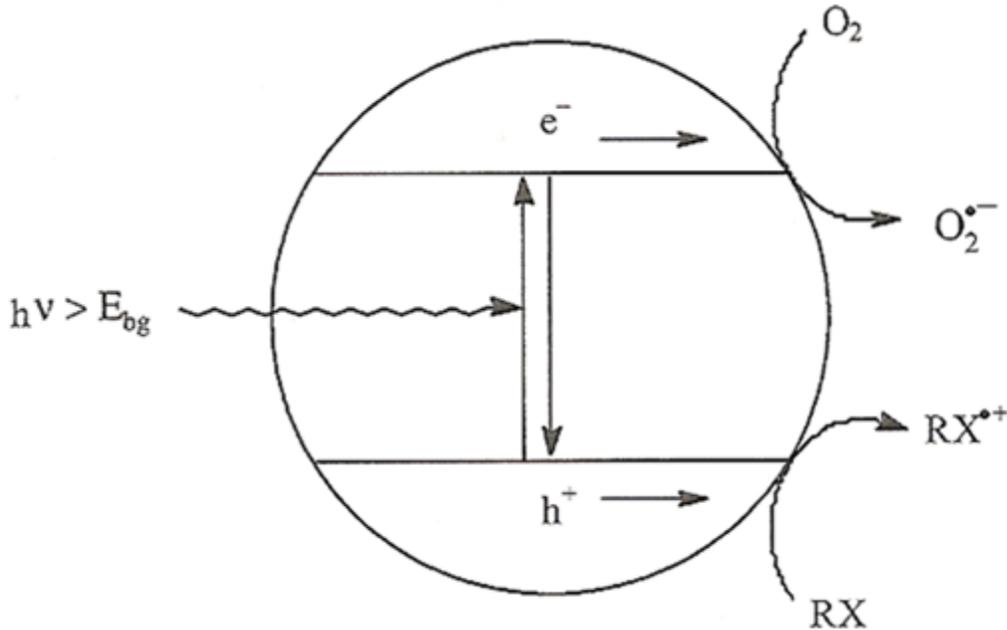


Figura 2. Fotoexcitación y reacciones de transferencia de electrones en una partícula de semiconductor (Srinivasan & Somasundaram, 2003).

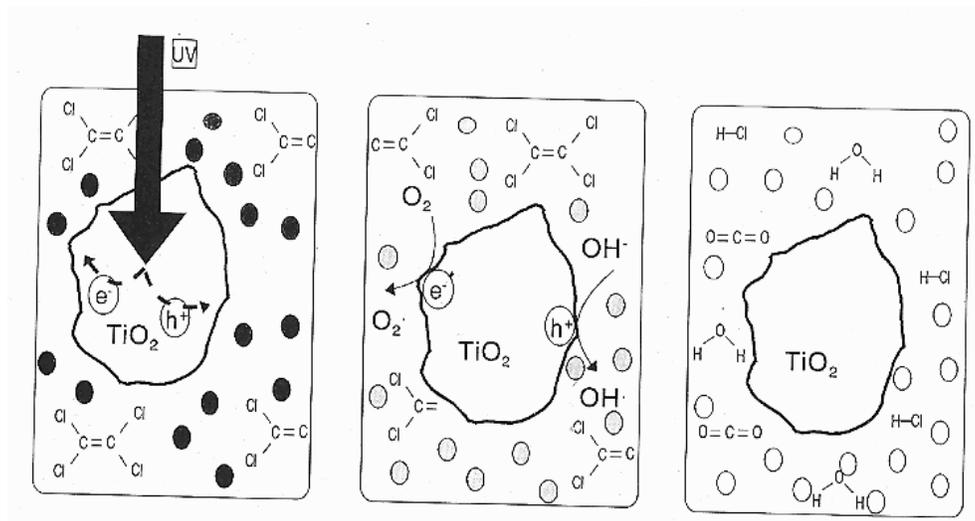


Figura 3. La radiación ultravioleta actúa sobre el catalizador formando pares electrón/hueco. Después, los electrones y huecos migran a la superficie causando la formación de radicales OH. Estos radicales oxidan las moléculas orgánicas (Blanco & Malato, 1996).

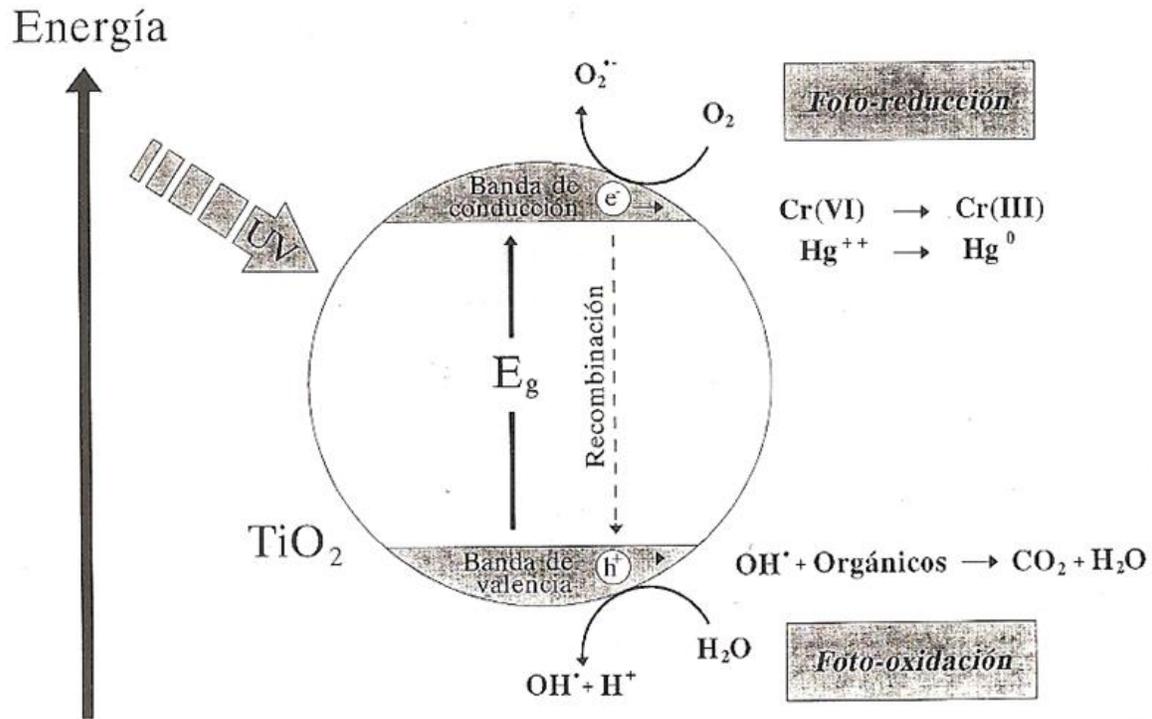


Figura 4. Representación esquemática de la formación del par electrón/hueco en una partícula semiconductor (Blanco & Malato, 1996).

Se ha comprobado (Augustinski, 1998) que el modelo planteado proporciona una explicación aceptable para el mecanismo de la degradación oxidativa de material orgánico catalizada por un semiconductor.

La fotocatalisis con semiconductores irradiados provee un método que permite la oxidación y reducción efectiva de compuestos orgánicos e inorgánicos (Malato, 1999). Entre los semiconductores utilizados en fotocatalisis heterogénea, el dióxido de titanio (anatasa) se considera particularmente práctico debido a la formación del par hueco-electrón bajo la incidencia de luz UV cercana, la cual proporciona una energía mayor que la diferencia de energía entre bandas.

La presencia de O<sub>2</sub> y agua son esenciales para la fotooxidación con TiO<sub>2</sub>. No se presenta ningún proceso de degradación en ausencia de ellos. Las especies oxidantes formadas (en

especial los radicales hidroxilos) interactúan con la mayoría de las sustancias orgánicas. Por lo anteriormente mencionado se puede decir que los componentes necesarios para que la reacción de fotocatalisis tenga lugar son los siguientes (Blanco & Malato, 1996):

- Un elemento a degradar,
- Un elemento oxidante. Este elemento puede ser oxígeno, peróxido de hidrógeno o aire,
- Un medio en el que tenga lugar todo el proceso,
- El catalizador (que como se ha indicado el más comúnmente utilizado es el  $\text{TiO}_2$ ),
- Y, finalmente, es necesaria la fuente de luz UV que es la que da lugar a todo el proceso. Esta luz puede provenir tanto del Sol como de lámparas que produzcan esta radiación efectiva.

### **6.2.2 DIÓXIDO DE TITANIO DOPADO.**

A finales de la década 1980 comenzaron a desarrollarse estudios acerca de la siguiente generación de Dióxido de Titanio, el objetivo era producir un fotocatalizador activo bajo luz visible y UV, un semiconductor que pudiera absorber y hacer utilizable ambos espectros UV (290-400nm) y visible (400-700nm), de tal manera que la luz solar pudiera utilizarse en fotocatalisis con mayor eficiencia (Emeline, Kuznetsov, Rybchuck, & Serpone, 2008).

Se ha desarrollado investigación intensa en preparación y caracterización de materiales de Dióxido de Titanio dopado con impurezas no metálicas. Uno de los sistemas más prometedores y ampliamente investigados a este respecto es el Dióxido de Titanio dopado con Nitrógeno,  $\text{N-TiO}_2$ , que muestra una actividad catalítica significativa en varias reacciones bajo radiación de luz visible (Livraghi, Paganini, Giamello, Selloni, & Valenti, 2006).

Los primeros reportes de  $\text{N-TiO}_2$  comenzaron a aparecer en los años 90's, aunque Sato (Sato, 1986) ya había evaluado el dopaje con Nitrógeno con anterioridad. Posteriormente se

realizaron más estudios con Nitrógeno, Carbono y Azufre y, finalmente en el 2001, Asahi y colaboradores realizaron estudios de dopaje con diferentes aniones (Asahi, Morikawa, Ohwaki, Aoki, & Taga, 2001) (Morikawa, Asahi, Ohwaki, Aoki, & Taga, 2001) y reportaron que el N-TiO<sub>2</sub> era el catalizador necesario para producir materiales de TiO<sub>2</sub> de segunda generación fotoactivos en espectros mayores al ultravioleta.

Los reportes de Asahi y colaboradores (2001) han conducido a un debate sobre las causas que generan la actividad bajo el espectro visible y proponen que el dopaje con Nitrógeno incrementa la fotoactividad reduciendo la brecha de banda (Emeline, Kuznetsov, Rybchuck, & Serpone, 2008).

Existen diferentes estrategias para incorporar el Nitrógeno al Dióxido de Titanio que generan materiales con propiedades diferentes. Algunos sufren de inestabilidad térmica y centros de recombinación; sin embargo, independientemente del método de preparación, aún el punto clave del debate concierne en la naturaleza y la localización en el sólido de las especies responsables de la fotoactividad bajo luz visible. Muchas especies que contienen Nitrógeno se producen durante los tratamientos químicos conduciendo al material final de N-TiO<sub>2</sub>, véase Figura 5, y el problema principal es caracterizar las especies presentes en el sistema y racionalizar el papel de cada una de ellas (Livraghi, Paganini, Giamello, Selloni, & Valenti, 2006).

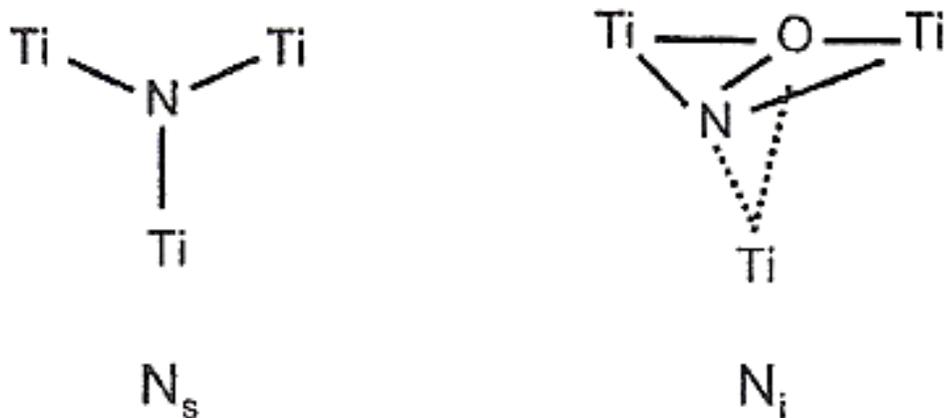


Figura 5. Estructuras del Nitrógeno sustitucional y del Nitrógeno intersticial (Livraghi, Paganini, Giamello, Selloni, & Valenti, 2006).

Otro tema importante concierne la estructura electrónica del material dopado y su modificación por radiación. Por un lado, algunos autores argumentan que la brecha de banda es reducida debido a al desplazamiento de la banda de valencia; esto es que la brecha de banda intrínseca del  $\text{TiO}_2$  disminuye en la presencia del dopante. El término estrechamiento de banda utilizado por Asahi y colaboradores se refiere a un desplazamiento de la banda de valencia hacia la banda de conducción, véase Figura 6 (Asahi, Morikawa, Ohwaki, Aoki, & Taga, 2001) (Asahi, Taga, Mannstadt, & Freeman, 2000). Se ha comprobado que el Nitrógeno dopado en sitios sustitucionales del  $\text{TiO}_2$ , véase Figura 5, es indispensable para el estrechamiento de la brecha de banda y de la actividad fotocatalítica (Asahi, Ohwaki, & Taga, 2001)

Otros autores atribuyen la absorción observada de la luz visible por el  $\text{N-TiO}_2$ , a la excitación de los electrones de estados de impurezas localizados en la brecha de banda (Livraghi, Paganini, Giamello, Selloni, & Valenti, 2006).

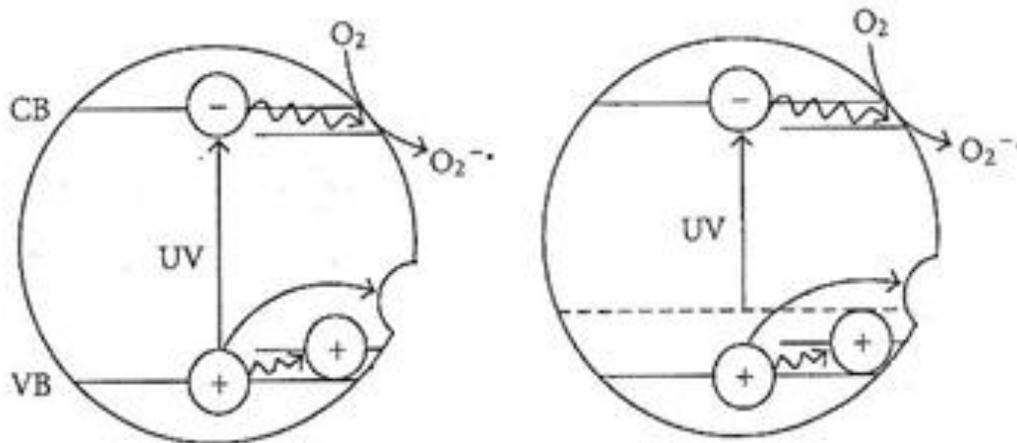


Figura 6. Posibles procesos fotoasistidos de un sustrato adsorbido en las superficies de  $\text{TiO}_2$  puro y  $\text{N/S/C-TiO}_2$  (American, 2007).

Como ya se ha mencionado, en el caso del  $\text{TiO}_2$ , la energía de banda prohibida es  $\text{EBP} = 3.2$  eV, y solo la radiación UV con una  $\lambda \leq 387\text{nm}$  posee una energía igual o superior a este valor (Blanco & Malato, 1996). El dopaje del Dióxido de Titanio modifica la energía de banda prohibida y el proceso de recombinación hueco/electrón. Esta modificación tiene como objetivo la obtención de un catalizador capaz de usar una banda espectral mayor que la UV, que restringe la utilización a sólo un 5% de la energía total disponible.

Como se muestra en la Figura 6 el  $\text{TiO}_2$  absorbe la energía a los 3.2 eV contenida en fotones por debajo de los 390 nm de longitud de onda, mientras que el N- $\text{TiO}_2$  absorbe por encima de esta longitud de onda reduciendo la energía necesaria para superar la brecha de banda.

La Figura 7 compara la reflectancia de los espectros Vis-UV del  $\text{TiO}_2$  puro y del N- $\text{TiO}_2$ . Los espectros difieren esencialmente en la adsorción en la región visible cercana a los 450 nm, lo cual caracteriza el material dopado.

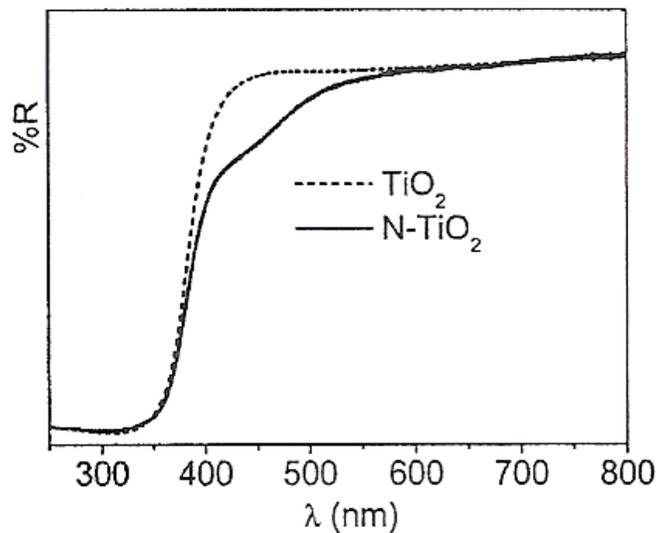


Figura 7. Espectro de reflectancia UV-Vis del  $\text{TiO}_2$  y del N- $\text{TiO}_2$  (Livraghi, Paganini, Giamello, Selloni, & Valenti, 2006).

Aunque el hecho de que la banda de absorción del N- $\text{TiO}_2$  se desplaza hacia el espectro infrarrojo se utiliza consistentemente como evidencia de estrechamiento de la banda de

brecha con referencia al  $\text{TiO}_2$  sin modificar; la influencia exacta del dopaje con nitrógeno en la estructura de la banda no ha sido elucidada totalmente (Liu, Li, Qui, & Burda, 2007).

### **6.2.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO.**

Existen un gran número de parámetros que influyen tanto cualitativa como cuantitativamente en el proceso redox fotocatalizado y que pueden ser determinantes para que sea realmente efectivo o no. A continuación se señalan algunos de los más importantes (Blanco & Malato, 1996):

- a) Adsorción competitiva: Además del reactivo o reactivos que se están tratando, existe la posibilidad de que otras moléculas sean adsorbidas sobre la superficie del catalizador.
- b) Cinética del oxidante: Es absolutamente necesario en la completa mineralización y no es competitivo con el reactivo durante la adsorción.
- c) pH: El pH de la solución puede afectar tanto a las propiedades superficiales del fotocatalizador como a la forma química del compuesto a degradar. El  $\text{TiO}_2$  tiene un carácter anfótero con un punto de carga cero alrededor del pH6, y el contaminante puede ser afectado por una variación del equilibrio ácido-base. Consecuentemente la adsorción del sustrato puede alterarse, afectando entonces fuertemente al proceso.
- d) Características del catalizador: Estructura amorfa (rutilo) o cristalina (anatasa), Diámetro de partícula, pre-tratamiento, dopaje.
- e) Temperatura: Las investigaciones no han mostrado influencia alguna con las variaciones normales de temperatura a lo largo del año.
- f) Intensidad de la radiación: Parece ser que a flujos pequeños de iluminación las velocidades de reacción que se obtienen dependen directamente de la radiación. La absorción de fotones es directamente proporcional a la intensidad y por lo tanto, en el caso de baja irradiancia, domina el proceso de reacción superficial y la eficiencia fotoquímica (número de moléculas transformadas por fotón incidente) es constante.

- g) Grado de concentración de radiación.
- h) Reactor.

#### **6.2.4 APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE DESCONTAMINACIÓN DE AGUA.**

La oxidación fotocatalítica presenta numerosas ventajas en el tratamiento de aguas residuales porque se ha comprobado que produce la degradación de una gran variedad de contaminantes orgánicos tóxicos, (Fajardo, Sánchis, & Thomas) y además es posible utilizar luz solar como fuente eficiente de irradiación (Feitz & Waite, 2000).

Es importante recalcar que la purificación de agua contaminada a bajas concentraciones (mg/L) es de extrema dificultad, en biodegradación, la cual aún siendo un mecanismo primordial en tratamiento de agua, resulta ineficiente a bajos niveles de sustrato (Muzkat & al, 1995) Algo similar ocurre cuando los compuestos son tóxicos y los microorganismos necesitan un periodo de adaptación extendido, cuando no resultan completamente inviables.

En años recientes, investigaciones sobre métodos no biológicos de purificación de agua han conducido al uso de procesos que actualmente destruyen los contaminantes en vez de simplemente cambiar su fase. Por lo tanto, la degradación de contaminantes orgánicos y microorganismos presentes en aguas residuales, utilizando suspensiones de TiO<sub>2</sub> irradiadas, resulta un proceso muy prometedor (Blanco & Malato, 1996).

Muchos investigadores en el campo de la fotocatalisis ya han demostrado que esta reacción puede destruir completamente compuestos disueltos en agua; en principio en baja concentración, y actualmente con éxito al ensayar la degradación de aguas residuales industriales con alto contenido de carbono orgánico. Este efecto, ha sido extensamente estudiado a nivel de laboratorio despertando un gran interés debido, por un lado, a los prometedores resultados obtenidos, y por otro, a que presenta en su aplicación práctica una serie de ventajas que lo hacen realmente atractivo y único (Blanco & Malato, 1996).

Cuando el Dióxido de Titanio se activa mediante luz UV ( $\lambda \leq 400\text{nm}$ ) el semiconductor exhibe una fuerte actividad bactericida. Se ha reportado que los procesos fotocatalizados por Dióxido de Titanio destruyen diversas variedades de *E. coli* desde una concentración inicial de  $10^9$  hasta  $10^{12}$  UFC/ml en periodos que van desde minutos hasta horas, dependiendo de las condiciones experimentales utilizadas (Gumy, y otros, 2006).

Las propiedades bactericidas del  $\text{TiO}_2$  se atribuyen al alto potencial redox de las especies formadas en la superficie mediante fotoexcitación que atacan oxidativamente a la bacteria en forma no selectiva.

Las ventajas que hacen al proceso UV/ $\text{TiO}_2$  aplicable en el tratamiento de efluentes contaminados son las siguientes (Malato, 1999) (Legrini, Oliveros, & Braun, 1993):

- a) El proceso se desarrolla a temperatura ambiente,
- b) Una amplia variedad de compuestos orgánicos disueltos o dispersos en agua pueden ser completamente mineralizados,
- c) El oxígeno necesario para la reacción se obtiene de la atmósfera,
- d) La velocidad de reacción es relativamente alta si grandes superficies de fotocatalizador pueden ser empleadas;
- e) El  $\text{TiO}_2$  está disponible a un costo bastante moderado, es inocuo y puede ser reciclado en la escala práctica;
- f) El catalizador puede inmovilizarse en diferentes tipos de matrices inertes,
- g) Las lámparas UV que emiten en la región espectral requerida están disponibles en el mercado y,
- h) El método es operativo en la región UV-A lo cual implica usos potenciales de la radiación solar, que es una fuente sin costo, y renovable.