

# Remoción del colorante azoico amarantho de soluciones acuosas mediante electrocoagulación\*

Álvaro Arango Ruíz\*\*, Luis Fernando Garcés Giraldo\*\*\*

## Resumen

**Introducción.** Las aguas residuales de la industria de los colorantes, alimentos, textiles y medicamentos vertidos indiscriminadamente a los cuerpos de agua, son responsables de muchos de los efectos nocivos para el medio ambiente, la flora y la fauna acuática. Entre los efectos más importantes provocados por esta causa están la disminución del oxígeno disuelto, la eutricación, la formación de compuestos recalcitrantes y tóxicos para las células, la obstaculización del paso de la luz a los cuerpos de agua y su deterioro estético. La electrocoagulación es una tecnología que se viene desarrollando en los últimos años y que se presenta como alternativa de tratamiento para las aguas residuales de estas industrias, ofrece múltiples ventajas sobre las tecnologías tradicionales. **Objetivo.** Estudiar la remoción del colorante azoico amarantho de soluciones acuosas usando electrocoagulación. **Materiales y métodos.** Se trataron aguas residuales sintéticas por electrocoagulación empleando un diseño experimental factorial 3x2x3 que obedece a variaciones de pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento. Las variables de respuesta medidas fueron porcentajes de remoción de demanda química de oxígeno y color. **Resultados.** Las remociones de demanda química de oxígeno fueron del orden del 98.3 % y las de color del 99.3% a pH de 4, densidad de corriente de 40.86 A/m<sup>2</sup>y a 15 minutos de tratamiento. **Conclusión.** Los resultados permiten establecer que desde el punto de vista de los aspectos técnicos, la electrocoagulación es una tecnología que puede utilizarse en soluciones acuosas de rojo amarantho para la remoción de color.

**Palabras clave:** electrocoagulación, colorante azoico, electrodo de hierro, electroquímica. Amarantho.

Artículo recibido 12-02 de 2009, última revisión 01-09 de 2009

## Removal of Azo Amaranth dye from aqueous solution by the use of electro coagulation

### Abstract

**Introduction.** Residual water from the dye, food, textile and pharmaceutical industries, indiscriminately dumped into water bodies, are responsible of many harmful effects for the environment, the flora and the fauna that live in those waters. Among those effects, some very important ones are the reduction of the dissolved oxygen, eutrophication, recalcitrant compounds, which are harmful for cells, the obstruction of the light that should come into the water and an aesthetic deterioration. Electro coagulation is a technology that has been being developed recently, and can be seen as an alternative for the treatment of residual waters from the industries mentioned above. It offers many advantages if compared to traditional technologies. **Objective.** To study the removal of the amaranth azo dye from aqueous solutions by the use of electro coagulation. **Materials and methods.** Synthetic residual waters were treated with electro coagulation, by using a factorial experimental model 3X2X3 which obeys to pH variations, stream density and time of treatment. The response variables measured were the percentages of chemical demand of oxygen and color. **Results.** The removals of chemical demand of oxygen were 98.3% and those of the color, 99.3% at a pH of 4. The stream density was 40.86 A/m<sup>2</sup>y in a 15 minutes treatment. **Conclusion:** The results allow establishing that, from a technical point of view, electro coagulation can be used in aqueous solutions with amaranth red dye, for removing the color.

**Key words:** Electro coagulation. Azo dye. Iron electrode. Electro chemistry. Amaranth.

\* Artículo derivado de la investigación "Evaluación de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales coloreadas" Financiación: Fondo para el Desarrollo de la Investigación Corporación Universitaria Lasallista. Realizada entre febrero y agosto de 2007.

\*\* Ingeniero Químico, Magíster en Ingeniería Ambiental, Especialista en Ingeniería Ambiental. Docente Coordinador del Programa de Ingeniería Ambiental, Corporación Universitaria Lasallista. Director Grupo de Investigación GAMA.

\*\*\* Ingeniero Sanitario, Magíster en Ingeniería Ambiental, Especialista en Ingeniería Ambiental. Decano Facultad de Ingenierías, Corporación Universitaria Lasallista. Investigador Grupo de Investigación GAMA.

## Remoção do corante Azóico Amaranço de soluções aquosas mediante electro-coagulação

### Resumo

**Introdução.** As águas residuais da indústria dos corantes, alimentos, têxteis e medicamentos vertidos indiscriminadamente aos corpos de água, são responsáveis de muitos dos efeitos nocivos para o médio ambiente, a flora e a fauna aquática. Entre os efeitos mais importantes provocados por esta causa estão a diminuição do oxigênio dissolvido, a eutroficação, a formação de compostos recalcitrantes e tóxicos para as células, a obstaculização do passo da luz aos corpos de água e sua deterioração estética. A electrocoagulação é uma tecnologia que se vem desenvolvendo nos últimos anos e que se apresenta como alternativa de tratamento para as águas residuais destas indústrias, oferece múltiplas vantagens sobre as tecnologias tradicionais. **Objeto.**

**Objeto.** Estudar a remoção do corante azóico amaranço de soluções aquosas usando electrocoagulação. **Materiais e métodos.** Trataramse águas residuais sintéticas por electrocoagulação empregando um desenho experimental fatorial 3x2x3 que obedece a variações de PH densidade de corrente e tempo de tratamento. As variáveis de resposta medidas foram percentagens de remoção de Demanda química de oxigênio e cor. Resultados. As remoções de Demanda química de oxigênio foram do ordem do 98.3 % e as de cor do 99.3 % a PH de 4, densidade de corrente de 40.86 A m<sup>2</sup>e/a 15 minutos de tratamento. **Conclusão.** Os resultados permitem estabelecer que desde o ponto de vista dos aspectos técnicos, a electro-coagulação é uma tecnologia que pode utilizar-se em soluções aquosas de vermelho amaranço para a remoção de cor.

**Palavras chaves:** electrocoagulação, corante Azóico, eletrodo de ferro, eletroquímica, Amaranço.

## Introducción

Las aguas residuales producidas por la industria de los colorantes, alimentos, textiles y medicamentos, se caracterizan por sus contenidos en sólidos suspendidos, sales disueltas y materia orgánica, en la que, a menudo, una fracción corresponde a colorantes<sup>1-7</sup>. Alrededor del mundo muchas de estas empresas descargan sus aguas residuales a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento o con tratamientos inadecuados, acción que obedece a problemas económicos, falta de responsabilidad ambiental o por falencias en los sistemas legislativos ambientales, y que genera daños e impactos ambientales<sup>8</sup>.

Los colorantes, en especial los de origen sintético que se encuentran presentes en las aguas residuales, son responsables de muchos de los efectos nocivos para el medio ambiente, la flora y la fauna acuática<sup>9,10</sup>. Entre los efectos más importantes están la disminución del oxígeno disuelto, la eutroficación, la formación de compuestos recalcitrantes y tóxicos para las células y la obstaculización del paso de la luz a los cuerpos de agua y su deterioro estético<sup>11</sup>.

Los colorantes azoicos son colorantes sintéticos que constituyen el grupo más extenso de colorantes orgánicos disponibles en el mercado y adicionalmente, el más contaminante para el ambiente. Se estima que durante su producción

y uso son descargados al ambiente entre el 10 y 15% de estos<sup>12</sup>.

Los colorantes azoicos se caracterizan por tener uno o varios grupos azo -N=N- que pueden estar unidos a otros grupos de fenilo o naftaleno, y contener iones como cloruro (-Cl), nitro (-NO<sub>2</sub>), metilo (CH<sub>3</sub>), amino (NH<sub>2</sub>), hidroxilo (-OH) y carboxilo (-COOH). Con frecuencia, se encuentra el grupo sulfónico (-SO<sub>3</sub>H) caso en el cual los colorantes son llamados colorantes azo sulfonatados<sup>12</sup>.

El uso de colorantes sintéticos es recurrente y amplio en la industria, tal es el caso del amaranço, color rojo de tipo azoico también conocido como E-123, según la lista E adoptada por la Comunidad Económica Europea (CEE) para distinguir los aditivos alimentarios<sup>13</sup>. Para la Unión Internacional Química Pura y Aplicada (IUPAC), el rojo amaranço es el trisodio 2- hidroxí -1- (4-sulfonato-1-naftilazo) naftaleno -3-6- disulfonato, cuya fórmula es C<sub>20</sub>H<sub>11</sub>N<sub>2</sub>O<sub>10</sub>S<sub>3</sub>Na<sub>3</sub> y su peso molecular es de 604. Este colorante se utiliza para teñir textiles, cueros, papel y madera; en la industria de los alimentos está restringido por sus efectos tóxicos y carcinogénicos, no obstante, se aplica para dar coloración a jamones, gelatinas, mermeladas, salsas de tomate y productos de pastelería.<sup>12,14,15</sup>. Por su alta solubilidad en agua, se encuentra en grandes concentraciones en las aguas residuales generadas en sus procesos de producción y uso.

Son muchos los tratamientos físicos, químicos y biológicos estudiados y desarrollados para la remoción de los colorantes de las aguas residuales, entre los más conocidos están los tratamientos biológicos aerobios y anaerobios, precipitación química, adsorción sobre carbón activado, fotocátalisis, ozonización, reacciones con fenton y ósmosis inversa. En muchos de estos procesos se generan compuestos resultantes de la degradación que son más tóxicos que los colorantes mismos, mientras que otros procesos pueden ser demasiado costosos o inadecuados<sup>16,17</sup>.

Hoy en día, existe una serie de tecnologías basadas en la electroquímica, que se presentan como alternativas al tratamiento de las aguas residuales y que ofrecen ventajas competitivas frente a las tecnologías tradicionales. La electrocoagulación, electroflotación y electrodecantación son algunas de ellas<sup>18</sup>.

La electrocoagulación consiste en un proceso que desestabiliza las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, en los que el hierro y el aluminio son los más utilizados<sup>19</sup>.

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes y partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman elementos hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados<sup>19-21</sup>.

Estudios demuestran que la aplicación de la electrocoagulación en aguas residuales coloreadas, tiene una alta eficiencia en la remoción de materia orgánica y color, eficiencia que alcanza valores por encima del 98%<sup>2,4,22,23</sup>. Adicionalmente, esta tecnología trae beneficios como:

- Los costos de operación son menores, comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros<sup>24</sup>.
- Requiere de equipos simples y de fácil operación<sup>25</sup>.
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos<sup>24</sup>.
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos<sup>24</sup>.
- Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada<sup>25</sup>.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes<sup>24</sup>.
- Purifica el agua y permite su reciclaje.
- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas pequeñas de contaminante, incrementando la coagulación<sup>25</sup>.
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos, que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados<sup>25</sup>.
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras<sup>25</sup>.
- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad<sup>25</sup>.

Las desventajas más importantes de esta tecnología son<sup>25</sup>:

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica es alto.

- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

El fácil manejo, infraestructura simple y ventajas económicas y ambientales, hacen de la electrocoagulación una tecnología atractiva y con un gran potencial de aplicación.

## Materiales y métodos

Se utilizó agua residual sintética con una concentración de 100 p.p.m de rojo amaranto grado comercial para alimentos, el pH de las soluciones se ajustó con ácido sulfúrico e hidróxido de sodio ambos grado reactivo. La conductividad se mantuvo alrededor de 1025  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con la adición de cloruro de sodio.

El porcentaje de remoción para la DQO se determinó midiendo este parámetro antes y después de cada tratamiento por el método de micro-DQO calorimétrico. De igual forma, se determinó el porcentaje de remoción de color, midiendo la absorbancia a 525 nm en un espectrofotómetro UV visible, previo establecimiento de la curva de calibración para la concentración de colorante.

Durante el proceso se hicieron mediciones de pH y conductividad del medio acuoso y se registró la temperatura. Todos los análisis se realizaron de acuerdo con los procedimientos establecidos por Standard Methods<sup>26</sup>.

La electrocoagulación se hizo por lotes en una celda con capacidad para dos litros, provista de seis electrodos, tres de hierro, usados como electrodos de sacrificio y tres de aluminio con separaciones de un centímetro, dispuestos alternadamente y en forma paralela conectados a una fuente de voltaje con control para la corriente en el rango de 0 a 25 A.

Para establecer el diseño experimental se realizó una prueba de tamizaje, consistente en la observación del comportamiento de diferentes variables fisicoquímicas en el medio acuoso, se recogió información a priori que

permitió determinar los valores de corriente eléctrica, distancia entre electrodos, tiempo de tratamiento, pH y tratamientos de electrocoagulación más eficientes. De este modo se diseñó un experimento al azar con estructura factorial con los factores, pH con niveles de 4, 6 y 8, densidad de corriente (J) con niveles 32.26 y 40.86  $\text{A}/\text{m}^2$ , y tiempo (t) con observaciones a 5, 10 y 15 minutos.

Para cada uno de los experimentos se realizaron tres repeticiones. Las variables de respuesta fueron el porcentaje de remoción de DQO y color.

El modelo estadístico utilizado para el análisis de la información fue:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde,

- $\mu$  es el porcentaje medio de remoción de DQO del modelo.
- $\alpha_i$  es el efecto del i-ésimo nivel del factor pH.  $i = 5, 7$  y  $8$ .
- $\beta_j$  es el efecto del j-ésimo nivel del factor Densidad de Corriente.  $j = 32.43$  y  $43.23$ .
- $\gamma_k$  es el efecto del k-ésimo nivel del factor Tiempo.  $k = 5, 10$  y  $15$ .
- $(\alpha\beta)_{ij}$  es el efecto de interacción entre los niveles  $i$  y  $j$  de los factores pH y Densidad de Corriente.  $\forall i, j$
- $(\alpha\gamma)_{ik}$  es el efecto de interacción entre los niveles  $i$  y  $k$  de los factores pH y Tiempo.  $\forall i, k$
- $(\beta\gamma)_{jk}$  es el efecto de interacción entre los niveles  $j$  y  $k$  de los factores Densidad de Corriente y Tiempo.  $\forall j, k$
- $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$  es el efecto de interacción entre los niveles  $i, j$  y  $k$  de los factores pH, Densidad de Corriente y Tiempo.  $\forall i, j, k$
- $y_{ijkl}$  es la l-ésima observación del porcentaje de remoción de DQO observado en los niveles  $i, j$  y  $k$  de los factores pH, Densidad de Corriente y Tiempo.
- $\varepsilon_{ijkl}$  es el l-ésimo término de error aleatorio.

## Resultados y discusión

El gráfico 1 muestra el porcentaje de remoción de DQO para las diferentes combinaciones de tratamientos considerados en el diseño experimental. Se observa que la remoción de DQO aumenta a medida que se disminuye el

pH y se aumenta la densidad de corriente y el tiempo. La mejor combinación de tratamientos es a un pH inicial, del medio acuoso, de 4, densidad de corriente (J) de 40.86 A/m<sup>2</sup> y un tiempo de proceso de 15 minutos, que produce una remoción de DQO de 98.3%, considerada como alta.

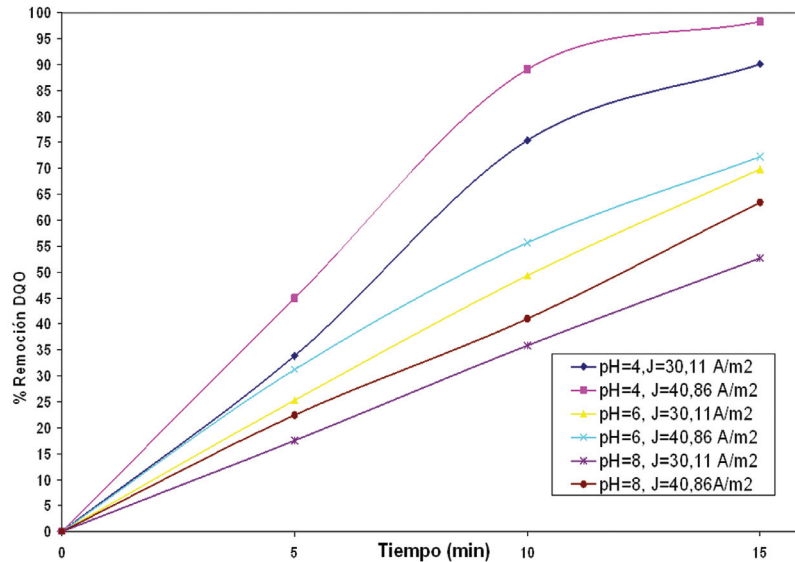


Gráfico 1. Porcentajes de remoción de DQO a diferentes combinaciones de tratamientos

El gráfico 2 muestra los porcentajes de remoción de color, que siguen el mismo comportamiento de la remoción de DQO. En todo tiempo para las diferentes condiciones de densidad de corriente y pH, la remoción de color es ligeramente superior a la remoción de DQO, por cuanto el color, como sustancia orgánica, hace parte de la DQO total presente en el medio acuoso. Al igual que con la remoción de DQO (de 98.33%), la mayor remoción de color, 99.30%, se dio a 40.86A/m<sup>2</sup> a un pH de 4 y con 15 minutos de tratamiento.

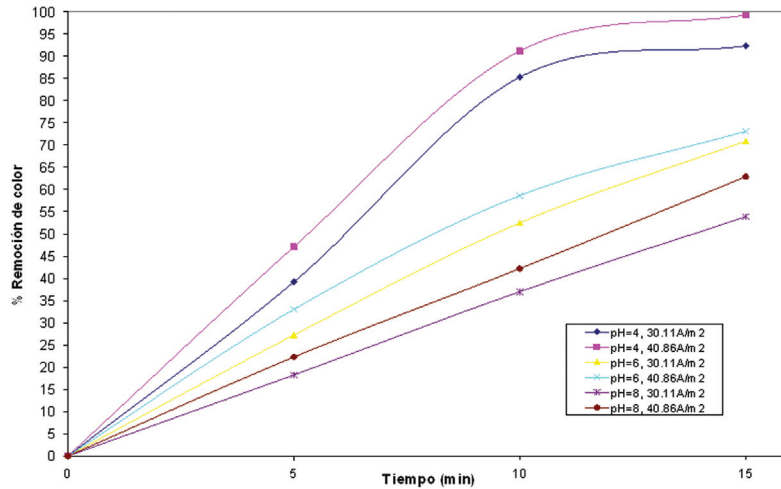
Durante la electrocoagulación se observó la producción de lodos poco compactos que flotan al inicio del proceso, pero que luego de un reposo se sedimentan.

Mediante el análisis de los datos realizado con el paquete estadístico SAS, se encontró un coeficiente de correlación  $r^2$  de 0.9511, lo que significa que el modelo estadístico propuesto explica el 95.11% de la variabilidad de la proporción de remoción de DQO, y el ajuste del modelo a los datos recolectados.

Respecto a las pruebas de significancia de los efectos principales y de interacción (de dos y tres factores), se obtuvieron valores para  $p < 0.01$ , lo que indica que todos los efectos son significativos en la remoción del colorante.

En las fotos 1 y 2, se puede observar la apariencia del agua antes de la electrocoagulación y después de 15 minutos de la electrocoagulación a 40,86 A y pH 4 respectivamente.

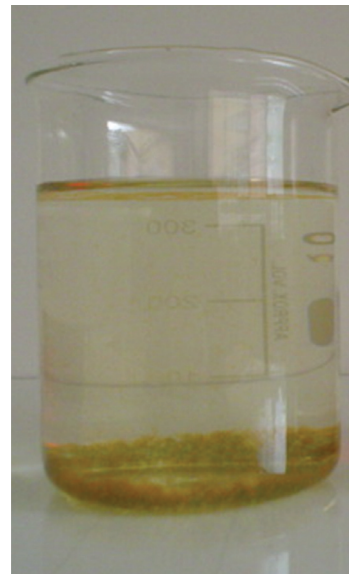




**Gráfico 2. Porcentajes de remoción de color a diferentes combinaciones de tratamientos.**



**Foto 1. Agua antes de la electrocoagulación**



**Foto 2. Agua después de la electrocoagulación. Tiempo 15 minutos, 40.83A/m² y pH de 4**

### Conclusiones

La remoción de DQO y color está afectada de manera significativa por los tres factores en estudio (pH, densidad de corriente y tiempo). El diseño de tres factores es bastante ajustado a los datos ( $R\text{-Square} = 0.9511$ ). En particular, se considera como nivel óptimo del estudio un

pH de 4, la densidad de corriente de  $40.86 \text{ A/m}^2$  y el tiempo de 15 minutos, caso en el cual se obtienen remociones de DQO de 98.33% y de color de 99.30%.

En este estudio, se observa que los lodos producidos son poco compactos, situación que puede ocasionar la redisolución del colorante

en el caso de realizar una manipulación brusca de los lodos.

Los resultados permiten establecer, desde el punto de vista de los aspectos técnicos, que la electrocoagulación es una tecnología que puede utilizarse en soluciones acuosas de rojo amaranto para la remoción de color.

## Referencias

1. BAYRAMOGLU, Mahmut; KOBYA, Mehmet and CAN, Orhan Taner. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. En: Separation and Purification Technology. 2004. vol. 37, no. 2, p.117–125
2. JIANTUAN, Ge, *et al.* New bipolar electrocoagulation – electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. En: Separation and Purification Technology. 2004. vol.36, no 1, p.33–39
3. KIM, Tak-Hyun, *et al.* Pilot scale treatment of textile wastewater by combined process: fluidized biofilm process–chemical coagulation–electrochemical oxidation. En: Water Research. September, 2002. vol. 36, no. 16, p.3979–3988
4. KOBYA, Mehmet; CAN, Orhan Taner and BAYRAMOGLU, Mahmut. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. En: Journal of Hazardous Materials. June, 2003. vol. 100, no 1, p.163–178
5. KIM, Op. Cit., p.3979–3988
6. XIONG, Ya, *et al.* Treatment of dye wastewater containing acid orange II using a cell whit tree-phase three-dimensional electrode. En: Water. Research. December, 2001. vol. 35, no. 17, p.4226-4230
7. BRILLAS, Enric and CASADO, Juan. Aniline degradation by Electro- Fenton-and peroxi-coagulation processes using a flow reactor for wastewater reactor for wastewater treatment. En: Chemosphere. April, 2002. vol. 47, no. 3, p. 241–248
8. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. Water a shared responsibility: The United Nations World Water Development Report 2. México: UNESCO, 2006. 601p.
9. DOS SANTOS, André B; CERVANTES, Francisco J and VANLIER, Jules B. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: perspectives for anaerobic biotechnology. En: Bioresource Technology. September, 2007. vol. 98, no. 12, p. 2369-2385
10. SOMASIRII, Wijetunga, *et al.* Decolourization of textile wastewater containing acid dyes in UASB reactor system under mixed anaerobic granular sludge. En: Electronical Journal of Environmental and Agricultural and Food Chemistry. [en línea]. 2006. vol.5, no. 1, [citado 12 de marzo de 2007]. Disponible en: <http://www.agri.ruh.ac.lk/Engineering/staff/academic/wijethunga/publications/EJEAFChe-2006.pdf>
11. PEARCE, CI; LLOYD, JR. and GUTHRIE, JT. The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cells: a review. En: Dyes and Pigments. September, 2003. vol. 53, no. 3, p.179-196
12. CG TAN, Nico. Integrated and sequential anaerobic/aerobic biodegradation of azo dyes. Wageningen. PhD Thesis. Wageningen University Research Center, Wageningen the Netherlands 2001.104 p.
13. DIRECTIVA 94/36/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO, DEL CONSEJO DEL 30 DE JUNIO DE 1994. Relativo a los colorantes de uso alimenticios.[en línea]. El parlamento, 2006. [citado 29 enero 2008]. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31994L0036:ES:NOT>
14. MITAL, ALOK. Removal of the dye, amaranth from waste water using hen feathers as potential adsorbent. En: Electronical Journal of Environmental and Agricultural and Food Chemistry. [en línea]. 2006. vol. 5, no. 2, [citado 15 de abril de 2007]. Disponible en: [http://ejeafche.uvigo.es/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=114&Itemid=33](http://ejeafche.uvigo.es/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=114&Itemid=33)
15. ZHANG, Ruobing, *et al.* Kinetics of decolorization of azo dye by bipolar pulsed barrier discharge in a three-phase discharge plasma reactor. En: Journal of Hazardous Materials. April, 2007. vol. 142, no. 1-2, p.105-110
16. FAN, Li. Electrochemical degradation of aqueous solution of Amaranth azo dye on ACF under potentiostatic model. En: Dyes and Pigments. 2008. vol. 76, no. 2, p.440-446 buscar el mes
17. NOVAK CHAIR, John T; HOEHN, Robert C. and RANDALL, Clifford W. Biological treatment of a synthetic: dye water and an industrial textile wastewater containing azo dye compounds Trevor Haig Wallace Blacksburg. Thesis of Magister of Sciences in Environmental Engineering. Virginia: State University. Faculty of Virginia Polytechnic Institute, 2001. 79 p

18. RAJESHWAR, Krishnan and IBANEZ, Jorge G. Environmental electrochemistry, fundamentals and applications in pollution abatement. San Diego California: Academic Press limited, 1997. 776 p
19. HOLT, Peter K.; BARTON, Geoffrey W. and MITCHELL, Cynthia A. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. En: Chemosphere. April, 2005. vol. 59, no. 3, p.355–367.
20. SONG, Shuang, *et al.* Ozone assisted electrocoagulation for decolorization of C.I. reactive black 5 in aqueous solution: an investigation of the effect of operational parameters. En: Separation and Purification Technology June, 2007. vol. 55, no. 2, p. 238-245
21. STEPHENSON, Rob and TENNANT, Bruce. New electrocoagulation process treats emulsified oily wastewater at Vancouver Shipyards. [en línea]. Vancouver: Environmental Science & Engineering, 2003. [citado 11 abril 2006] Disponible en: <http://www.esemag.com/0103/electro.html>
22. YANG, Chen-Lu and MCGARRAHAN, Jared. Electrochemical coagulation for textile effluent decolorization. En: Journal of Hazardous Materials. December, 2005. vol. 127, p. 40-47
23. Chen, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. En: Separation and Purification Technology. July, 2004. vol. 38, no. 1, p. 11–41.
24. POWELL WATER SYSTEMS INC. Powell electrocoagulation: sustentable technology for the future. [en línea]. Colorado: Powell Water Systems, 2001. [citado 16 marzo 2006]. Disponible en: [www.powellwater.com/data/technical%20manual.pdf](http://www.powellwater.com/data/technical%20manual.pdf)
25. MOLLAH, M. Yousuf A., *et al.* Electrocoagulation (EC) science and applications. En: . Journal of Hazardous Materials. June, 2001. vol. 84, no. 1, p. 29–41
26. GREENBERG, Arnold; CLESCERI, Leonore S. and EATON, Andrew. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18 ed. Washington: APHA-AWWA-WPCF, 1992. 3-115p.