

## TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE IRRADIACIÓN GAMMA

Eduardo Campos Medina<sup>1</sup>  
Ana Marcela Gómez Hinojos<sup>2</sup>

### Resumen

Esta investigación tiene por objetivo principal mostrar el efecto que tiene la aplicación de radiación gamma sobre los contaminantes orgánicos disueltos en aguas residuales industriales. En el proceso de investigación se emplearon porciones de agua residual de la empresa tratadora Reciclagua, estas muestras de agua mostraron elevados valores en cuanto a la Demanda Química de Oxígeno (DQO), posteriormente se aplicaron diferentes dosis de radiación gamma, buscando con ello la fragmentación de las moléculas de las sustancias contaminantes orgánicas presentes. Al final del experimento se detectó una dosis de radiación que mostró que es la ideal para provocar su división y por ende que los valores de DQO sufran una disminución.

Palabras Clave: radiación gamma, agua residual, demanda química de oxígeno

### Abstract

This research aims to show the main effect of application of gamma radiation on dissolved organic pollutants in industrial wastewater. In the research process used portions of the sewage treaters Reciclagua, these water samples showed high values in terms of Chemical Oxygen Demand (COD), then applied different doses of gamma radiation, thereby seeking the fragmentation of the molecules of organic pollutants present. At the end of the experiment is found that a radiation dose showed that the ideal is to cause division and hence the values of COD suffer a decline.

Key words: gamma irradiation, wastewater, chemical oxygen demand

---

<sup>1</sup> Profesor Investigador de la Facultad de Planeación Urbana y Regional de la UAEM. email. [eduardocmx@gmail.com](mailto:eduardocmx@gmail.com)

<sup>2</sup> Profesora de la Facultad de Planeación Urbana y Regional de la UAEM. email. [anmarcegodeos@yahoo.com](mailto:anmarcegodeos@yahoo.com)

## I. Introducción

Se han desarrollado una gran variedad de sistemas para el tratamiento del agua residual, siendo el más común el tren físico-químico que comprende los siguientes pasos: 1) Mezcla rápida, 2) Coagulación /Floculación, 3) Sedimentación, 4) Filtración, 5) Proceso avanzado (columna de carbón activado) y 6) Desinfección. En muchos casos se combinan varios procesos dependiendo de la calidad del agua residual que se va a tratar y de las características que deba tener al final del tratamiento. Los contaminantes del agua residual pueden ser eliminados, por medio físicos, químicos o biológicos. (Terbutt, 1994: 19-31)

Buscando incrementar la eficiencia de remoción de contaminantes presentes en aguas residuales, se han desarrollado tratamientos avanzados de oxidación, entre las cuales la técnica electroquímica ha contribuido de manera notable a este propósito, su función ha sido remover las impurezas depositadas en gases, líquidos y sólidos, con ello se ha prevenido o minimizado la contaminación ambiental. ( Janssen y Koene, 2002: 137-146)

La remoción antes mencionada abarca tanto a los compuestos inorgánicos como orgánicos, presentándose reacciones de reducción y oxidación respectivamente. Las industrias han mostrado interés en técnicas que combinen estas opciones, especialmente la manufactura textil, ya que esta tiene grandes problemas con sus aguas residuales, las cuales presentan una gran coloración debido a compuestos que están disueltos en dichas aguas. (Campos, 2003: 7)

En base a lo anterior se siguen realizando investigaciones en las cuales se busca incrementar la eficiencia de remoción de contaminantes, una opción que se esta aplicando como método de pulimento en el tratamiento de aguas residuales, es la utilización de la radiación gamma. La cual tiene propiedades y ventajas especiales, ya que mediante ésta se pueden tratar soluciones con contaminantes orgánicos, los cuales son difíciles de degradar biológicamente, además que no causa una contaminación secundaria. (Getoff, 1999: 377-384)

Aunado a lo anterior la técnica de irradiación es específicamente efectiva para la esterilización y eliminación de bacterias, es por eso que dicho tratamiento ha llamado la atención alrededor del mundo y aún más en el tratamiento de aguas residuales. (Huaying y otros. 2002: 633)

## II. Metodología

### *II.1.-Caracterización Físicoquímica del Agua Residual*

El agua residual con la cual se realizo la investigación fue de la planta tratadora RECICLAGUA, de la cual se recolectaron muestras cuyo origen fue de los tanques de sedimentación, ya que el agua esta libre de contaminantes que se han sedimentado y facilitaron el desarrollo de los análisis y tratamientos posteriores.

#### *11.1.1.-Demanda Química de Oxígeno (DQO)*

Esta prueba se considero como variable de control, ya que se utilizo para llevar a cabo la comparación de resultados y permitió discernir la eficiencia que alcanza el tratamiento de radiación gamma.

Se trabajaron dos soluciones de  $\text{Ag}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$  ,  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ . Se agregaron en un tubo de ensayo 3.5 mL de cada solución, posteriormente se agregaron 0.1 mL del agua residual y por último 2.4 mL de agua destilada. Este procedimiento se realizo para 2 referencias y los tipos de agua cruda y tratada. Los tubos se colocaron en un equipo HACH BOX 389 P/N 45600-02, para el respectivo tratamiento térmico durante un lapso de dos horas, por último se determinaron las concentraciones de estas muestras en un equipo Linderbg/blue-M, modelo 601350 A-1, ubicado en la planta tratadora RECICLAGUA.

#### *11.1.2.-Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)*

Para determinar la DBO se diluyo la muestra del agua residual y se mezcla con una población mixta de microorganismos. Se midió la concentración de oxígeno disuelto, posteriormente se incubo la muestra a una temperatura ya determinada a un cierto tiempo y nuevamente se calculó la concentración del oxígeno disuelto. La condiciones de incubación fueron de 5 días a 20°C.

#### *11.1.3.-Turbidez*

Esta se determino mediante un equipo Nefelómetro previamente calibrado con una suspensión de polímero de formacina.

#### *11.1.4.-Color*

Se tomo un volumen de agua residual a la cual se realizaron diluciones con agua demonizada y se compararon visualmente con estándares ya preestablecidos, de manera que el color de la muestra concuerde con el color de un estándar. Para finalmente determinar los valores de cobalto-platino (Co-Pt).(Romero, 1999:63-66)

#### *11.1.5.-Microbiológico*

De esta prueba se determinaron las cantidades de coliformes fecales y totales, para lo cual se tomo una muestra del agua residual y se trasfirió a un recipiente de cristal estéril, de esta muestra se prepararon diluciones con un medio de cultivo y se incubaron durante 24 horas, para finalmente realizar el conteo de microorganismos, expresando el resultado como número más probable de organismos coliformes (NMP/mL) (NMX-AA-42. NMX-AA-102)

### II.2.–Tratamiento de Radiación Gamma

Se tomaron varias muestras del agua residual cruda y se irradiaron en un gammacel AECL 200 ubicado en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Las dosis de radiación fueron 5, 10, 17.4, 20, 25, 30 y 35 kGy. Se enfatiza la dosis de 17.4, ya que esta es la dosis óptima reportada para la máxima remoción de contaminantes de una agua residual. (Huaying y otros. 2002: 636)

### III.3.–Caracterización Fisicoquímica del Agua Tratada

A las muestras de agua radiada se les realizaron las mismas determinaciones señaladas previamente, con la finalidad de valorar el grado de remoción de contaminantes.

## III.–Resultados

### III.1.–Caracterización Fisicoquímica.

Una vez que se tuvo el agua cruda (agua residual sin ningún tratamiento), se realizaron los análisis fisicoquímicos correspondientes para conocer de dicha agua sus características y establecer un parámetro de comparación. Los resultados de dichos análisis se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis Fisicoquímicos del Agua Cruda

Parámetros Fisicoquímicos	Agua Cruda
Color (U. Pt.-Co)	3750-2500
Turbidez (NTU)	140
DQO (mg/L)	3358.2
DBO (mg/L)	1697
Coliformes Fecales (NMP/mL)	$1,100 \times 10^2$
Coliformes Totales (NMP/mL)	$1,100 \times 10^2$

### III.2.–Radiación Gamma

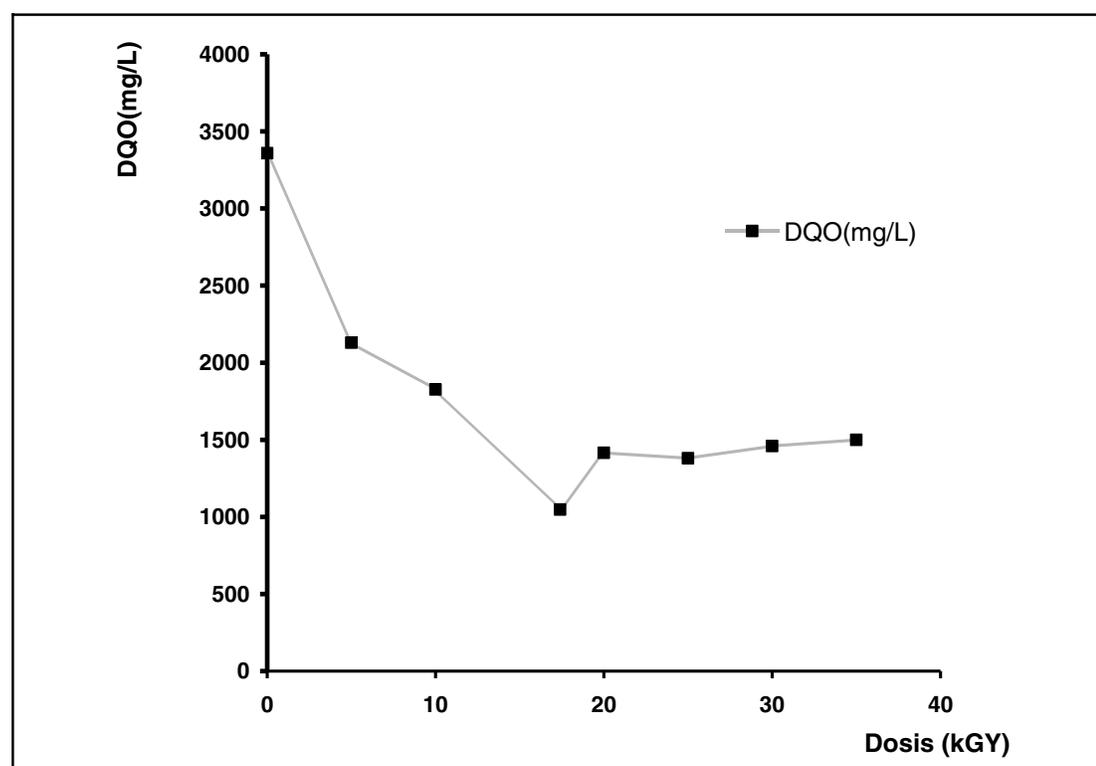
Como se menciona anteriormente, se irradiaron muestras del agua cruda a diferentes dosis de radiación kGy (Kilogreys), que fueron 5, 10, 17.4, 20, 25, 30 y 35 kGy, de cada una de las muestras radiadas se determinaron los valores de la Demanda Química de Oxígeno y los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de DQO de las muestras de aguas crudas irradiadas

Dosis (kGy)	DQO (mg/L)
5	2130
10	1826
17.4	1047
20	1415
25	1380
30	1468
35	1500

Como puede apreciarse la máxima remoción de contaminantes se ubica en la dosis de 17.4 kGy, para corroborar este resultado se realizó la respectiva grafica, donde se muestra como la Demanda Química de Oxígeno del agua cruda es comparada con los diferentes valores de las muestras tratadas, esto se aprecia en la Figura N°. 1.

Figura N° 1 Valores de DQO determinadas en el agua cruda y muestras tratadas.



Como puede apreciarse la tendencia de los valores de la DQO antes de los 17.4 kGy es decreciente y los valores después de este valor la tendencia es creciente. La pregunta aquí es la siguiente ¿A que se debe este comportamiento?.

Buscando explicación a este comportamiento, se calcularon los coeficientes de Pearson buscando una correlación antes y después de 17.4 kGy donde se presentó el tope de eficiencia de remoción de contaminantes, buscando con ello establecer si los valores de ambas variables están directamente relacionadas entre sí.

Para obtener el valor de los coeficientes se utilizó la ecuación No. 1

$$\left( r = \frac{\sum xy - nxy}{(n-1)(SxSy)} \right) \dots\dots\dots [1]$$

Los valores utilizados se muestran por triplicado, tomando posteriormente una media de los mismos, esto se exponen en la Tabla 3, para posteriormente mostrar los cálculos correspondientes.

Tabla 3. Valores de DQO por triplicado a diferentes dosis de radiación gamma

Dosis (kGy)	Lecturas de DQO (mg/L)	Media de Valores de DQO
5	2120, 2145, 2125	2130
10	1815, 1830, 1833	1826
17.4	1039, 1048, 1054	1047
20	1404, 1415, 1426	1415
25	1370, 1383, 1390	1380
30	1461, 1468, 1475	1468
35	1495, 1501, 1504	1500

Para la primera serie de datos se tomaron los resultados que presentan una tendencia decreciente es decir los tres primeros pares de datos (dosis, media de DQO), para los cuales los resultados son los siguientes:

De la ecuación antes señalada  $\left( r = \frac{\sum xy - nxy}{(n-1)(SxSy)} \right)$  tenemos:

$$\sum xy = 47127.8 \quad n = 6 \quad xy = 18010.8 \quad Sx = 6.238 \quad Sy = 558.59$$

Obteniéndose un valor de  $r = -0.996$ , esto significa que las dos variables están estrechamente relacionadas entre sí, el signo negativo indica la inclinación que tiene la recta de regresión que tiene dicha relación.

Para los siguientes pares ordenados, es decir las cuatro series de datos restantes tenemos que:

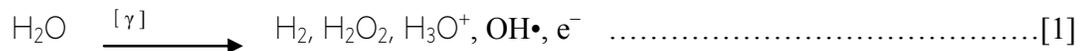
$$\sum xy = 159340 \quad n = 8 \quad \sum y = 39620.62 \quad Sx = 6.45 \quad Sy = 53.56$$

El valor obtenido de  $r = 0.82$ , que presenta una relación directa con tendencia creciente, acorde al signo del resultado.

Con estas deducciones establecemos que efectivamente las dos variables están relacionadas entre si, pero aún con ello, no se explica el comportamiento de este tratamiento con radiación gamma. Por lo cual hay que recordar que la radiación emite rayos **gamma** ( $\gamma$ ), los cuales van a interactuar tanto con la molécula del agua como con el contaminante disuelto en la misma.

Cuando se presenta la interacción de la radiación con el medio, esta pierde su energía, logrando desprender electrones de las moléculas del medio y como consecuencia se forman iones y electrones secundarios que a su vez interactúan con otras especies para producir ionizaciones posteriores.

Cuando el agua es irradiada se pueden generar varias especies como a continuación se señala en la reacción [1]



De esta ecuación se pone especial interés en el ión  $\text{OH}\cdot$ , el cual es un radical libre y tiene un enorme poder oxidante, este radical ataca las moléculas orgánicas, con lo cual remueve un electrón de la misma ocasionando una ionización de la molécula o puede provocar una ruptura de enlaces entre los átomos de carbono e hidrógeno que constituyen a las moléculas contaminantes, provocando con ello que la molécula se vaya fraccionado es decir de ser un molécula de gran tamaño se convierta en una pequeña.

También el radical  $\text{OH}\cdot$  puede generar otro radical libre el  $\text{ROO}\cdot$  (siendo R un radical orgánico), estos se muestra en las reacciones [2, 3, 4 y 5].



Debido a la gran cantidad de radicales libres que se formaron en la radiólisis de las muestras de agua residual, la dosis de 17.4 kGy es la energía idónea para promover el rompimiento de enlaces en los contaminantes orgánicos que están disueltos en las aguas residuales de la planta RECICLAGUA, provocando que el valor de la DQO sea el más bajo y por ende que los contaminantes orgánicos originales se hayan transformado en unos más pequeños y sencillos.

En lo que respecta a las dosis superiores a 17.4 kGy, estas provocaron una recombinación de especies de los contaminantes que fueron fragmentados, es decir los radicales libres que se generaron de los contaminantes se vuelven a unir formando nuevas estructuras diferentes de los contaminantes originales y ello genero un incremento en el valor de la DQO, esto se puede explicar en las reacciones [6, 7, 8 y 9]



Es importante señalar que las reacciones se manejaron con el radical R, el cual indica que es un compuesto orgánico, en las aguas residuales de la empresa RECICLAGUA no esta definido la estructura de los contaminantes orgánicos que están disueltos en las mismas, esto es debido a que el origen de dichas aguas abarca una infinidad de industrias de diferentes ramos de ahí que sea casi imposible hacer esta dilucidación de estructuras de las sustancias presentes.

### III.3.-Caracterización Físicoquímica del Agua Tratada

Una vez establecida que la dosis óptima fue de 17.4 kGy, se procedió a determinar los demás parámetros físicoquímicos de la muestra tratada, a fin de comparar el grado de remoción de los contaminantes presentes, esto se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros físicoquímicos y microbiológicos de la muestra de agua residual antes y después del tratamiento por irradiación a una dosis de 17.4 kGy.

Parámetros Físicoquímicos	Agua Cruda	Agua Tratada
pH	8	7.5
Color (U. Pt.-Co)	3750-2500	800
Turbidez (NTU)	140	46
DQO (mg/L)	3358.2	1047
DBO (mg/L)	1697	835
Coliformes Fecales (NMP/mL)	1,100×10 <sup>2</sup>	x<3
Coliformes Totales (NMP/mL)	1,100×10 <sup>2</sup>	x<3

Puede apreciarse que los valores de cada prueba fisicoquímica disminuyen dramáticamente, si analizamos la variable de control que fue la DQO, ésta presentó una disminución de casi el 70%, con lo cual establecemos que los contaminantes presentes han sido oxidados o degradados.

#### IV.-Conclusiones

En base a la investigación realizada y a los resultados mostrados, podemos concluir que la radiación gamma es una buena opción en el tratamiento de aguas residuales con la finalidad de remover contaminantes orgánicos disueltos en ellas.

En base al porcentaje de remoción obtenido podemos recomendar que este tratamiento de radiación gamma se aplique como un método de pulimento, es decir que se utilice en el tren físico de tratamiento señalado al final, esto se justifica de la siguiente manera el tren previamente explicado se remueven la mayor cantidad de contaminantes presentes en aguas residuales, pero su eficiencia no es del 100 % de remoción de los contaminantes, a la cantidad remanente que quedan en el agua tratada podría aplicarse el tratamiento de radiación gamma.

Es claro señalar que la inversión sería bastante alta, ya que los equipos que emiten este tipo de radiación son costosos, pero los resultados son prometedores.

#### Bibliografía

- Campos Medina Eduardo (2003) Tratamientos electroquímicos y radiación gamma, en la remoción de contaminantes de un agua residual. Tesis de Maestría. Facultad de Química de la UAEM.
- Huaying Bao, Yuannxia liu and Haishun Jia (2002) A study of irradiation in the treatment of wastewater. *Radiation Physics and Chemistry* (63) 633-639
- Getoff N. (1999) Radiation chemistry and environment. *Radiat. Phys. Chem.* (57) 377-384
- NMX-AA-42 Norma Mexicana. Determinación de Coliformes Determinación del número más probable de coliformes totales y fecales. – Método de tubos múltiples de fermentación, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de junio de 1987.
- Norma Mexicana NMX-AA-102-1987 Calidad del Agua– Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva.-Método de filtración en membrana, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de agosto de 1987

*Quivera 2009-1*

- Janssen L. J. and L. Koene, (2002) The role of electrochemistry and electrochemical technology in environmental protection. *Chemical Engineering Journal*. 85, 137-146
- Romero Jairo Alberto (1999) *Calidad del Agua*. 2ª Ed. Alfaomega. México D.F. 63-66
- Terbutt T. H. Y. (1999) *Fundamentos de la Calidad del Agua*. Ed. Limusa, México D.F. 19-31