

TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL POR UN SISTEMA FÍSICOQUÍMICO Y OXIDACIÓN QUÍMICA EN FLUJO CONTINUO

MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT BY PHYSICO-CHEMICAL AND CHEMICAL OXIDATION SYSTEM IN CONTINUOUS FLOW

**Lina A. Bernal-Martínez^{1*}, Carlos Solís-Morelos², Ivonne Linares-Hernández²,
Carlos Barrera-Díaz¹ y Arturo Colín-Cruz³**

(1) Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, UAEM-UNAM, Carretera Toluca-Atlacomulco, Km 14.5, Unidad El Rosedal, C.P 50200, Toluca, Estado de México - México

(2) Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Carretera. Toluca-Atlacomulco, Km.14.5, Unidad San Cayetano, C.P 50200, Toluca, Estado de México - México

(3) Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Química. Paseo Colón intersección Paseo Tollocan S/N. C.P. 50120, Toluca, Estado de México - México

*autor de contacto (e-mail: liaberma@yahoo.com.mx)

Recibido: 06/10/2010 - Evaluado: 04/11/2010 - Aceptado: 18/11/2010

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue la remoción de contaminantes de un efluente de aguas residuales municipales, mediante tratamientos fisicoquímicos de coagulación-floculación, sedimentación, filtración, oxidación química y desinfección en un tren de tratamiento en flujo continuo a 1.65 mL/s. Para el proceso de coagulación-floculación se utilizó una dosis de 1mL/L de $Al_2(SO_4)_3$ 0.01 M, los filtros fueron empacados de arena sílice natural y carbón activado proveniente de concha de coco, en el proceso de oxidación química se aplicó una concentración de 3 mg/L de ozono con un tiempo de contacto de 10 a 15 min, la desinfección se realizó mediante radiación ultravioleta a una longitud de onda de 253-260 nm. La remoción obtenida fue del 98% de color, 94% de turbiedad, 93% de DQO, 93% de DBO₅, el 84 de SAAMS, el 63% de NH₃, el 98% de coliformes totales y fecales.

ABSTRACT

The objective of this work was the removal of pollutants of an effluent of municipal wastewater, through physicochemical of coagulation-flocculation, sedimentation, filtration, chemical oxidation treatments and disinfection in a train of treatment in continuous flow at 1.65 mL/s. For the process coagulation-flocculation used a dose of 1mL/L $Al_2(SO_4)_3$ 0.01 M, the filters were packed with silica sand and activated carbon from coconut shell, in the process of chemical oxidation it was applied a concentration of 3 mg/L ozone with a time of contact of 10 to 15 min, the disinfection was realized by means of ultraviolet radiation to a wave length of 253-260 nm. The removal obtained was 98% of color, 94% of turbidity, 93% of COD, 93% of BOD₅, 84% of MBAS, 63% of NH₃, 98% of total fecal and coliforms.

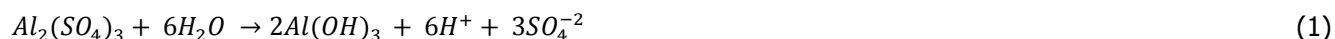
Palabras clave: agua residual; filtración; ozono; desinfección
Keywords: wastewater; filtration; ozone; disinfection

INTRODUCCIÓN

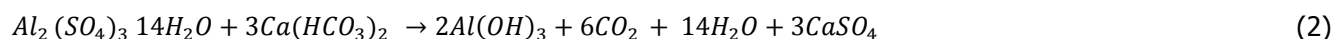
Hoy en día la humanidad enfrenta la problemática de satisfacer las demandas de agua potable, de aguas de riego y de agua para la industria. Se estima que 1,1 billones de personas, el equivalente a una sexta parte de la población mundial, no tienen garantizado el acceso al agua potable, entre el 1 y 2.2 billones no cuentan con servicios básicos de saneamiento. La demanda de agua va en aumento en relación con el agua disponible y existe una sobreexplotación de las fuentes, además de contaminación, mal uso y desperdicio por la utilización de sistemas de distribución inadecuados e ineficientes (Holt et al., 2005).

El uso del agua a nivel mundial se distribuye entre doméstico, industrial y agrícola, en el caso de países desarrollados el 11% se utiliza para fines domésticos, el 59% para la industria y 30% para la agricultura, mientras que para los países en vía de desarrollo sólo el 8% tiene uso doméstico, el 10% para la industria y el 82% para la agricultura. A nivel global el 70% del agua dulce es demandada por la agricultura y el 22% por la industria (Libhaber, 2004; FAO, 2008). Frente a esta problemática, surge la necesidad de tratar aguas residuales para evitar o controlar la contaminación del recurso hídrico y garantizar su disponibilidad para los diferentes usos, mediante el desarrollo de una serie de estrategias que coadyuven al manejo sustentable del agua (Sonune y Ghate, 2004; Rivas et al., 2009).

El reuso y recirculación son operaciones que forman parte de las estrategias de manejo del agua. Para ello es necesario implementar sistemas de tratamiento de los efluentes que sean adecuados para este propósito, que proporcionen una alta eficiencia, bajos costos y adicionalmente traiga ventajas ambientales. Dentro de las tecnologías para el tratamiento de aguas residuales se encuentran los procesos biológicos (Bejankiwar et al., 2003; Nugroho et al., 2010), procesos fisicoquímicos (Devi et al., 2008), y de oxidación avanzada (Rivas et al., 2009). Entre los procesos fisicoquímicos se encuentra la coagulación-floculación, en el que utiliza sustancias químicas como el sulfato de aluminio, cloruro férrico, clohidróxido de polialuminio, policloruro de aluminio entre otros, este proceso es empleado para la remoción de color y la demanda química de oxígeno, las sustancias empleadas como coagulantes alteran el estado físico de los sólidos disueltos y suspendidos con la finalidad de eliminarse mediante el proceso de sedimentación (Zayas et al., 2007; Ahmad et al., 2005; Lee y Lim, 2005). En la ec. (1), representa la interacción del sulfato de aluminio con el agua:



Si el agua contiene bicarbonatos y el valor de pH se mantiene relativamente constante, la reacción se comporta como en la ec. (2):



De acuerdo a lo mostrado por Zgajnar et al. (2009), el uso del $Al_2(SO_4)_3$ con una concentración de 1000 mg/L reduce el 25% de la DQO disminuyendo el valor de pH de 8.2 a 6.9. Guigui et al. (2002), mencionaron que la elección del tipo de coagulante y la dosis del coagulante a utilizar dependerá del tipo de la materia orgánica a remover. Los sistemas de filtración que emplean arenas sílicas comerciales, carbón activado y membranas de filtración con la finalidad de remover la DBO₅, DQO entre otros contaminantes orgánicos (Saad 2009; Tensel 2008; Thiel et al., 2006), han sido ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales municipales con la finalidad de mejorar la calidad del agua y su biodegradabilidad.

Los procesos de oxidación avanzada, implican la generación de oxidantes químicos, como los radicales hidroxilo, estos son importantes para acelerar la oxidación no selectiva (Beteta et al., 2009), entre estas técnicas se encuentran la ozonización (Kusvuran et al., 2010), Fenton (Urriaga et al., 2009), el peróxido de hidrógeno, la oxidación fotoquímica asistida UV (UV/H₂O₂) (Nienow et al., 2008), la oxidación fotocatalítica de TiO₂ (Li et al., 2003) y el tratamiento con electrodos de diamante dopado con boro (Deligiorgis et al., 2008), son ampliamente

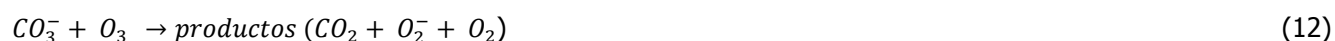
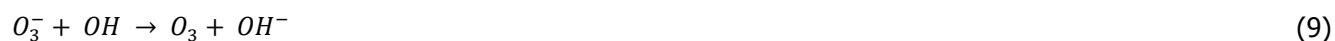
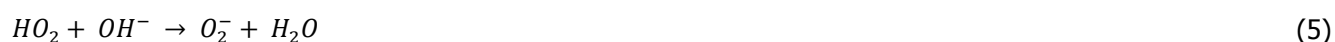
utilizados para la destrucción de una amplia gama de contaminantes orgánicos recalcitrantes en aguas residuales que no pueden ser eliminados biológicamente.

Tomiyasu et al. (1995), explicaron los mecanismos de reacción del proceso de ozonización, indicando que se lleva a cabo una reacción de iniciación, propagación y terminación, como se muestran en las siguientes reacciones (ec. 3-13):

Iniciación



Propagación-Terminación



El presente estudio fue diseñado para evaluar la remoción de contaminantes presentes de un efluente de aguas residuales municipales mediante un proceso fisicoquímico y oxidación química a flujo continuo y al mismo tiempo obtener una calidad de agua permisible a las normas oficiales mexicanas (NOM-SSA-NMX) y poder darle una aplicabilidad.

METODOLOGÍA

Muestreo

El agua residual se recolectó de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales ubicada en la carretera a Villa Cuauhtémoc, Toluca, Estado de México, se realizó un muestreo simple después de la cloración, dicha muestra se almacenó en recipientes de polietileno, para su transporte, una vez realizado el muestreo se procedió a caracterizar el efluente bajo las normas establecidas (APHA, AWWA, 1995).

Tren de tratamiento

En la Fig. 1, se muestra el diagrama de flujo del tren de tratamiento, consta de procesos físicos-químicos y de oxidación química, está conformado de; un mezclador de propelas de capacidad de 200 L (coagulación-floculación), un sedimentador, un filtro empacado de arena sílice natural de malla de 10x20-BIOSTAT-CARBOTECNIA S.A. de C.V., filtro de carbón activado empacado de carbón granular de concha de coco de malla de 12x40-BIOSTAT-CARBOTECNIA S.A. de C.V., generador de ozono de marca CARBARS y columna de ozonización con burbujeo, la concentración de ozono es de 1-4 mg/L y el ozono residual se captura en una trampa de vidrio que contiene una solución de yoduro de potasio a una concentración de 0.01M, filtro de carbón

activado, proveniente de concha de coco de 12x40-BIOSTAT-CARBOTECNIA S.A. de C.V., y lámpara de UV de 200-300 nm, eligiendo una longitud de onda de 253 nm, donde se encuentra el efecto germicida, finalmente el efluente se almacena en un tanque de 200 L, este tren de tratamiento fue operado a un flujo continuo de 1.65 mL/s por 6 meses, en la Tabla 1, se presentan las propiedades hidrodinámicas del sedimentador y de los filtros (arena y carbón activado).

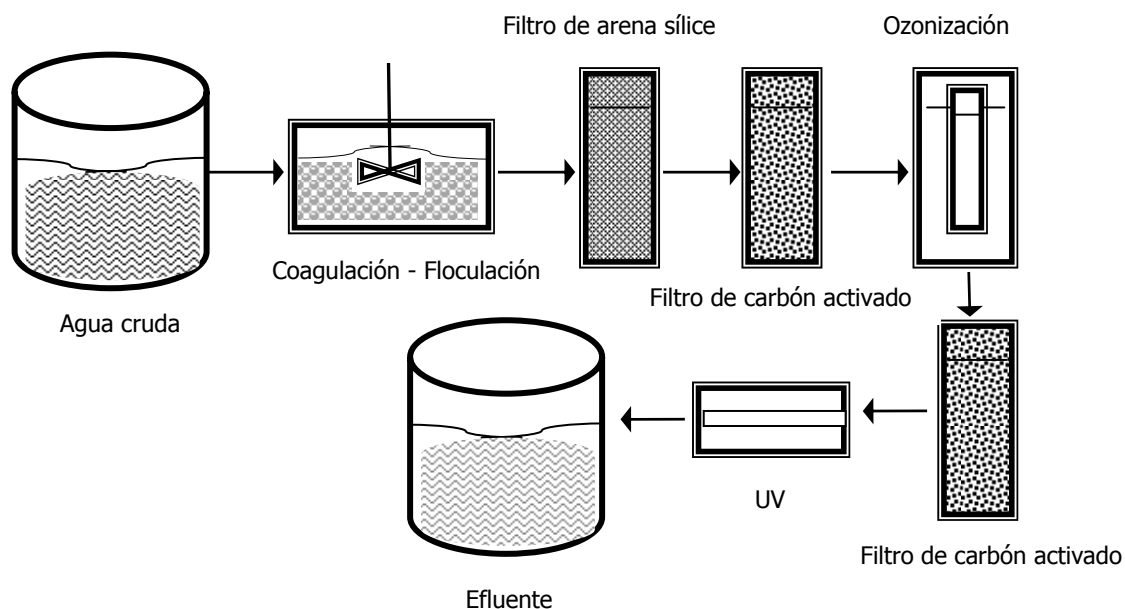


Fig. 1: Diagrama de flujo del tren de tratamiento.

Tabla 1: Propiedades hidrodinámicas del sedimentador y filtros.

Tratamiento	Área (m ²)	Volumen (L)	Flujo (m ³ /m ² /día)	Tiempo (min)
Sedimentador	0.00283	4.7	90	47
Filtro de arena	0.00283	4.7	90	47
Filtro de carbón activado	0.00159	2.2	90	23
Filtro de carbón activado	0.00159	2.0	90	21

Con base en el tren de tratamiento mencionado se realiza una descripción de cada uno de los procesos fisicoquímicos y de oxidación química aplicados.

Coagulación-Floculación

La coagulación es el proceso que desestabiliza las partículas suspendidas para la reducción de las fuerzas de separación entre ellas y la floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico "flóculos" (Restrepo, 2009), los experimentos se llevaron a cabo a pH de 7.5±0.5 a temperatura ambiente (18±0.5°C), con el equipo de jarras (TEMSA JTR-1010), el cual consta de 6 recipientes con paletas de propelas con una capacidad de 1 L, en cada uno se colocaron diferentes volúmenes de 1 mL de sulfato de aluminio Al₂(SO₄)₃ 0.01 M, las condiciones de funcionamiento son las siguientes: la velocidad en la que se lleva

a cabo el proceso de coagulación es a 115 rpm por 1 min, y el tiempo de floculación es de 15 min a 30 rpm, para la sedimentación se dejó reposar de 30 min a 1 h (Zgajnar et al., 2009) y una vez que todas las partículas se sedimentaron por gravedad, se realizó el muestreo para el análisis de color, turbiedad, pH y DQO, posteriormente, y una vez obtenida la dosis adecuada del sulfato de aluminio y la calidad del efluente, se hizo pasar el efluente por el sedimentador con la finalidad de retirar la materia sólida.

Filtración de arena sílice y carbón activado

Por gravedad el agua fluye a través de estos dos medios filtrantes, el valor de pH del agua se mantuvo entre 7.0 ± 0.5 , las propiedades de estos materiales son; el tamaño, la distribución de tamaño y densidad, si se tiene una menor apertura de poros la eficiencia aumenta pero se incrementa la pérdida de carga disminuyendo el flujo, por lo contrario los poros grandes disminuye la caída de carga y aumenta el flujo pero la eficiencia disminuye (Thiel et al., 2006). Estos medios filtrantes tiene la finalidad de que los sólidos en el agua son retenidos, lográndose la remoción de pequeños flóculos o partículas precipitantes que no son removidas por coagulación. A si mismo las sustancias orgánicas pueden ser removidas por adsorción mediante la columna de carbón activado. Una vez monitoreado este proceso y teniendo la calidad del efluente, se hace pasar por el tratamiento con ozono.

Oxidación química (ozono)

Este proceso se basó en lograr el tiempo de contacto en el agua, con la concentración adecuada, para este estudio se aplicó 3 mg/L de ozono durante 10-15 min, este sistema se realizó en un depósito con un caudal de recirculación, en donde se inyectó la producción de ozono, por otra parte la concentración de ozono residual se depositó en una trampa que contiene una solución de yoduro de potasio 0.01 M (Kusvuran et al., 2010; Lan et al., 2008). La ventaja de este proceso incluye la eliminación de compuestos de amonio y la oxidación de sustancias inorgánicas (hierro, manganeso, metales pesados ligados orgánicamente, cianuros y sulfuros), la oxidación de compuestos orgánicos como detergentes, pesticidas, herbicidas, fenoles, sabor y olor. La aplicación de ozono es utilizado principalmente para desinfectar.

Radiación ultravioleta (UV)

La radiación ultravioleta se caracteriza por longitudes de onda muy cercanas a las de la luz del sol, los parámetros más importantes de la radiación UV relacionados con la desinfección del agua son; la longitud de onda, el rango germicida que se encuentra entre 240 y 300 nm y se obtiene la máxima eficiencia desinfectante cerca de los 253-260 nm (Zhou y Smith, 2002). Se diseñó un sistema de desinfección por radiación ultravioleta, el cual consiste en una cámara de exposición de material anticorrosivo, una lámpara ultravioleta, limpiadores ultrasónicos, sensores conectados a sistemas de alarma para el monitoreo de la intensidad de la luz ultravioleta, un interruptor de velocidad, un interruptor de lámpara apagada y balastos eléctricos. El proceso de radiación ultravioleta tiene como ventajas que no altera el olor, color, o el pH, no requiere la adición de productos químicos y no confiere subproductos tóxicos en el agua. Una vez que el efluente se hizo pasar por este sistema de desinfección, se monitoreó la calidad del agua y finalmente se almacenó para su posterior disposición.

Métodos de análisis

La evaluación de la calidad del agua se llevó a cabo en cada etapa del tren de tratamiento, los análisis determinados fueron; el valor de pH, la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), color, turbiedad, sustancias activas al azul de metileno (SAAMS), sulfatos (SO_4^{2-}), nitrógeno amoniacal (NH_3), sólidos suspendidos totales (SST) y sedimentables (SS), coliformes fecales y totales. Estos análisis se llevaron a cabo según las normas establecidas para la calidad del agua en tratamientos fisicoquímicos (APHA, AWWA, 1995).

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos en cada etapa del tren de tratamiento fueron evaluados mediante un análisis matemático-estadístico empleando el programa Sigma Stat 3.5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización inicial del agua residual

En la Tabla 2, se presenta la caracterización fisicoquímica del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales, estos datos fueron obtenidos durante el monitoreo de 6 muestreos, con su respectivo análisis estadístico; media (\bar{x}), desviación estándar (σ) y el error con respecto a la desviación estándar.

Tabla 2: Caracterización fisicoquímica del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales.

Parámetro	\bar{x}	σ	Error
pH	7.40	-	-
DQO (mg/L)	53.47	6.54	(\pm) 1.69
DBO ₅ (mg/L)	24.83	3.43	(\pm) 0.88
Color (Pt-Co)	27.46	11.58	(\pm) 2.99
Turbiedad (NTU)	14.66	3.39	(\pm) 0.87
SAAMS (mg/L)	00.95	0.19	(\pm) 0.05
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	63.20	6.46	(\pm) 1.66
NH ₃ (mg/L)	11.37	1.10	(\pm) 0.28
SST (mg/L)	30.00	4.71	(\pm) 1.92
SS (mg/L)	00.77	0.21	(\pm) 0.05
Coliformes F. (NMP/100mL)	69.00	-	-
Coliformes T. (NMP/100mL)	84.00	-	-

Tabla 3: Coagulación química, empleando una solución de Al₂(SO₄)₃ 0.01M a diferentes dosis y la evaluación de la DQO, color, turbiedad y pH.

Al ₂ (SO ₄) ₃ 0.01M dosis (mL/L)	DQO (mg/L)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (NTU)	pH
1	54.00	27.00	14.00	7.4
2	50.60	24.90	9.00	7.4
3	49.30	23.40	6.00	7.2
4	46.10	21.70	5.00	6.9
5	41.60	19.80	5.00	6.8
6	38.70	17.70	5.00	6.6
7	32.30	15.60	4.00	6.6
8	32.60	15.50	4.00	6.6
9	31.50	15.60	4.00	6.6
10	32.80	15.40	4.00	6.6

Tratamiento fisicoquímico coagulación-floculación

En la Tabla 3, se presentan los resultados de la evaluación de la DQO, color, turbiedad y el valor de pH con respecto a la dosis de 1 a 10 mL de coagulante, la dosis apropiada es de 7 mL de la solución de $Al_2(SO_4)_3$ 0.01 M, este proceso condujo a una remoción del 39% de la carga orgánica medida como la demanda química de oxígeno (DQO).

Con base a la dosis elegida del $Al_2(SO_4)_3$ 0.01 M, en la Tabla 4, se presentan los parámetros fisicoquímicos de 6 muestreos en el tratamiento coagulación-floculación, este proceso tiene las siguientes eficiencias; el 41% de color, 54% de turbiedad, el 44% de la DQO, el 50% de la DBO_5 , el 7.3% de SAAMS y el 2.3% de SO_4^{2-} , mientras que para el NH_3 se tiene un aumento del 0.62%, y el 49% de remoción de los SST y el 5% de los SS.

Tabla 4: Caracterización fisicoquímica de la etapa de coagulación-floculación.

Parámetro	Numero de muestreos						X	σ	Error
	1	2	3	4	5	6			
pH	6.5	6.4	6.4	6.3	6.3	6.5	6.4	0.08	(±)0.04
Color (Pt-Co)	45.00	17.00	12.00	9.00	6.00	8.00	16.17	14.63	(±)5.97
Turbiedad (NTU)	11.00	9.00	7.00	3.00	6.00	5.00	6.80	2.87	(±)1.17
DQO (mg/L)	36.00	35.00	27.00	31.00	26.00	24.00	29.78	0.09	(±)0.04
DBO_5 (mg/L)	14.00	16.00	11.00	11.00	11.00	10.00	12.25	2.06	(±)0.08
SAAMS (mg/L)	0.93	0.97	0.76	0.81	0.83	0.98	0.88	0.09	(±)0.04
SO_4^{2-} (mg/L)	72.00	64.00	56.00	51.00	58.00	68.00	61.75	7.37	(±)3.11
NH_3 (mg/L)	10.90	10.10	13.50	12.01	11.20	10.90	11.44	1.18	(±)0.48
SST (mg/L)	28.00	9.90	12.50	17.00	12.00	12.00	15.23	6.68	(±)2.73
SS (mg/L)	0.96	0.43	0.81	0.52	0.93	0.75	0.73	0.21	(±)0.08

Proceso de filtración y adsorción

En la Tabla 5, se presentan los parámetros fisicoquímicos, del filtro de arena. El filtro de arena tiene una remoción del 60% de color, 74% de turbiedad, el 69% de la DQO, el 71% de la DBO_5 , el 39% de SAAMS, el 14% de SO_4^{2-} , mientras que para el NH_3 se tiene una remoción del 20%, el 72% de los SST y el 29% de los SS. Healy et al. (2006), estudiaron el comportamiento de la DQO, sólidos suspendidos y el nitrógeno amoniacal con filtros de arena sílice tratando agua residual, donde obtuvo el 99% de remoción de la DQO y de los sólidos suspendidos, ellos tuvieron eficiencias de remoción mayores del 30% y el 79% comparada con nuestros resultados con respecto a la DQO y los sólidos suspendidos, mientras Saad (2009), estudió la reducción de la DQO y la DBO_5 en una agua municipal usando filtros de arena sílice obteniendo el 92.17% de remoción de la DQO y el 97.66% de la DBO_5 , el obtuvo remociones mayores del 23% y 27% con respecto a la DQO y la DBO_5 .

En la Tabla 6, se observan los parámetros fisicoquímicos del filtro de carbón activado, en este tratamiento se tiene las siguientes remociones; el 84% de color, 81% de turbiedad, el 81% de la DQO, el 81% de la DBO_5 , el 69% de SAAMS, el 21% de SO_4^{2-} , mientras que para el NH_3 se tiene una remoción del 27%, el 74% de los SST y el 36% de los SS, con respecto a los resultados obtenidos del proceso de la coagulación-floculación y el filtro de arena, el filtro de carbón activado tiene los porcentajes de remoción más altos, este comportamiento es debido a que el filtro de carbón activado es un adsorbente que reduce la materia orgánica por su área superficial, según lo citado por Tensel (2008), Devi y Dahiya (2008) quienes estudiaron la reducción de la DQO y

la DBO₅ usando una mezcla de adsorbentes utilizando diferentes tipos de carbón activado comerciales teniendo el 95.87% de remoción de la DQO y el 97.45% de remoción de la DBO₅. Saad (2009), obtuvo una remoción del 97.66% de la DBO₅ y Devi et al. (2008), hacen mención que la remoción de la demanda química de oxígeno y la demanda bioquímica de oxígeno de aguas residuales son eficientes utilizando los filtros de carbón activado.

Tabla 5: Caracterización fisicoquímica del filtro de arena.

Parámetro	Numero de muestreo						X	σ	Error
	1	2	3	4	5	6			
pH	7,8	7,8	7,7	7,7	6,9	7,3	7.53	0.36	(±)0.15
Color (Pt-Co)	36.00	5.00	5.40	5.00	4.00	10.00	10.90	12.48	(±)0.61
Turbiedad (NTU)	6.10	5.00	3.00	2.00	3.00	4.00	3.85	1.50	(±)0.61
DQO (mg/L)	25.60	15.00	17.30	10.00	16.00	14.00	16.32	5.18	(±)2.12
DBO ₅ (mg/L)	11.70	6.30	7.30	5.10	6.80	5.30	7.08	2.42	(±)0.99
SAAMS (mg/L)	0.64	0.74	0.23	0.73	0.51	0.64	0.58	0.19	(±)0.08
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	64.90	60.20	35.10	48.9	53.10	61.90	54.02	10.98	(±)4.49
NH ₃ (mg/L)	8.43	7.30	11.90	11.00	8.90	9.50	9.02	1.37	(±)0.61
SST (mg/L)	9.50	7.10	7.30	9.80	7.30	10.00	8.50	1.39	(±)0.57
SS (mg/L)	0,63	0,40	0,67	0,31	0,63	0,61	0.54	0.15	(±)0.06

Tabla 6: Caracterización fisicoquímica del filtro de carbón activado.

Parámetro	Numero de muestreo						X	σ	Error
	1	2	3	4	5	6			
pH	7.79	7.73	7.60	7.50	6.60	6.90	7.35	0.48	(±)0.19
Color (Pt-Co)	9.00	0.75	3.20	4.50	3.25	5.00	4.28	2.74	(±)1.12
Turbiedad (NTU)	4.70	4.00	2.00	1.00	2.00	3.00	2.78	1.39	(±)0.57
DQO (mg/L)	8.90	10.00	12.40	8.00	12.00	10.00	10.22	0.44	(±)0.18
DBO ₅ (mg/L)	4.50	4.60	5.20	4.30	5.10	4.10	4.63	0.44	(±)0.18
SAAMS (mg/L)	0.14	0.50	0.19	0.61	0.20	0.14	0.29	0.21	(±)0.08
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	61.00	53.00	31.30	45.7	49.10	58.90	49.83	10.75	(±)4.39
NH ₃ (mg/L)	8.57	9.07	8.85	7.32	8.01	8.91	8.21	0.77	(±)0.27
SST (mg/L)	7.97	8.10	8.27	7.65	6.98	7.89	7.81	0.45	(±)0.18
SS (mg/L)	0.56	0.39	0.61	0.27	0.52	0.59	0.49	0.13	(±)0.05

Tratamiento mediante oxidación química (ozono)

En la Tabla 7, se observan los parámetros fisicoquímicos del proceso de oxidación química, en este tratamiento se tiene las siguientes remociones: el 96% de color, 89% de turbiedad, el 85% de la DQO, el 87% de la DBO₅, el 82% de SAAMS, el 28% de SO₄²⁻, mientras que para el NH₃ se tiene una remoción del 54%, el 88% de los SST y el 45% de los SS, cabe mencionar que en este tratamiento se tuvo un aumento en el valor del pH de 7.5 a 8.04, con base a estos resultados la descomposición del ozono a un pH básico, se puede explicar con los mecanismos de Tomiyasu et al. (1995). Rivas et al. (2009), mencionan que el tratamiento del agua residual con ozono a una concentración de 10-35 mg/L, tiene un 50% de remoción de la DBO₅ y observó la ausencia de

coliformes fecales, por otro lado Azbar et al. (2004) obtuvieron el 99% de remoción de la DQO y el 96% de remoción de color, Zhou y Smith (1997) mencionan que obtienen el 70% de remoción del color con una concentración de 40 mg/L de ozono, Fontanier et al. (2006), utilizaron el proceso de ozonización como un tratamiento terciario de aguas residuales obteniendo del 36 al 76% de remoción de la DQO, Kreetachat et al. (2007) mencionan que el efecto del proceso de ozonización es muy eficiente en la remoción de color y mejora la biodegradabilidad de las aguas residuales, por otro lado Hoigne y Bader (1978) y Hoigne et al., (1985) hacen mención que el NH_4/NH_3 a pH 8 no se oxida durante los tratamientos de agua convencionales donde las concentraciones de ozono son limitadas y donde los oxidantes secundarios (OH^\cdot) se consumen por las reacciones de competencia, sin embargo el ozono puede ser consumido por el amoníaco, lo que explica que en este trabajo de investigación se obtuvo el 54% de remoción de NH_3 .

Tabla 7: Caracterización fisicoquímica del tratamiento de oxidación química (ozono).

Parámetro	Numero de muestreo						X	σ	Error
	1	2	3	4	5	6			
pH	8.01	8.01	8.40	8.03	8.01	7.80	8.04	0.19	(±)0.08
Color (Pt-Co)	2.00	0.74	1.00	0.75	1.01	1.00	1.08	0.46	(±)0.19
Turbiedad (NTU)	4.00	1.00	1.50	0.93	1.00	1.00	1.57	1.20	(±)0.49
DQO (mg/L)	12.00	7.00	8.10	7.00	8.00	5.00	7.85	2.31	(±)0.94
DBO ₅ (mg/L)	3.70	3.10	3.10	4.00	3.40	2.10	3.23	0.65	(±)0.26
SAAMS (mg/L)	0.14	0.16	0.11	0.33	0.14	0.14	0.17	0.08	(±)0.03
SO_4^{2-} (mg/L)	54.00	50.10	26.10	41.00	43.20	57.00	45.23	11.19	(±)4.57
NH_3 (mg/L)	6.10	5.34	5.80	4.10	5.30	4.10	5.12	0.84	(±)0.34
SST (mg/L)	5.60	5.00	1.16	1.30	2.00	6.40	3.57	2.34	(±)0.95
SS (mg/L)	0.49	0.36	0.54	0.13	0.45	0.56	0.42	0.16	(±)0.06
Coliformes F.(NMP/100mL)	< 1.1	< 3	< 1.1	< 3	< 1.1	< 1.1	-	-	-
Coliformes T.(NMP/100mL)	< 1.1	< 3	< 1.1	< 3	< 1.1	< 1.1	-	-	-

Desinfección por Radiación ultravioleta

Es importante mencionar que el efluente del tratamiento de ozonización, se hizo pasar por otro filtro de carbón activado, como es mencionado en la metodología y finalmente fue desinfectado con la radiación ultravioleta. En la Tabla 8, se muestran los parámetros fisicoquímicos del efluente tratado con el filtro de carbón activado y la desinfección con UV, donde se observa que no hay cambios en los parámetros fisicoquímicos entre el efluente de la columna de carbón activado y la desinfección con UV, sin embargo en el análisis microbiológico después de la radiación ultravioleta se obtuvo el 98% de remoción de los coliformes totales y fecales. Zhou y Smith (1997), mencionan que el mecanismo de desinfección se basa en un fenómeno físico por el cual las ondas cortas de la radiación ultravioleta inciden sobre el material genético (ADN) de los microorganismos y los virus, y los destruye en corto tiempo debido a que provoca daños en la molécula del ADN, que impiden la división celular y causa su muerte, sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada, es decir no altera la composición química, ni el sabor, ni el olor y ni el pH del agua, White (1986), recomendó que el agua a desinfectar con radiación ultravioleta debe contener menos de 20 mg/L de sólidos suspendidos, por otro lado Kuo et al. (1997), hacen referencia que para desinfectar el agua residual es necesario aplicar el 53% de transmitancia a una dosis de 300 mJ/cm² de UV para reducir las concentraciones de coliformes totales a menos de 2.2 NMP/100mL.

Tabla 8: Caracterización fisicoquímica de la columna de carbón activado y desinfección con UV.

Parámetro	Numero de muestreo						X	σ	Error
	1	2	3	4	5	6			
pH	7.6	7.7	7.6	7.8	7.4	7.7	7.63	0.13	(±)0.05
Color (Pt-Co)	0.50	0.50	0.68	0.50	0.45	0.60	0.53	0.08	(±)0.03
Turbiedad (NTU)	0.89	1.00	0.76	0.91	0.98	0.99	0.92	0.091	(±)0.03
DQO (mg/L)	3.10	5.00	2.90	3.00	3.30	3.20	3.41	0.78	(±)0.32
DBO ₅ (mg/L)	1.40	2.10	1.60	1.70	1.60	1.50	1.65	0.24	(±)0.09
SAAMS (mg/L)	0.50	0.10	0.04	0.17	0.04	0.05	0.15	0.17	(±)0.07
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	24.00	48.42	37.00	31.00	39.80	51.00	38.53	10.24	(±)4.18
NH ₃ (mg/L)	3.60	4.70	4.20	4.20	4.40	3.900	4.16	0.38	(±)0.15
SST (mg/L)	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	1.15	0.41	(±)0.17
SS (mg/L)	0.80	0.22	0.50	0.10	0.31	0.51	0.40	0.25	(±)0.10
Coliformes F.(NMP/100mL)	< 1.1	< 3	< 1.1	< 1.1	< 1.1	< 1.1	-	-	-
Coliformes T.(NMP/100mL)	< 1.1	< 3	< 1.1	< 1.1	< 1.1	< 1.1	-	-	-

Comparación de los parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 9, se presenta la comparación de algunos de los parámetros fisicoquímicos de pH, color, turbiedad, DQO, DBO₅, SAAMS, SO₄²⁻, NH₃, SST, SS, coliformes fecales y totales de la etapa de desinfección con la NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Tabla 9: Comparación de algunos parámetros fisicoquímicos.

Parámetro	Agua tratada del tren de tratamiento	Límites máximos permisibles
pH	7.63	6.5-8.5
Color (Pt-Co)	0.53	20
Turbiedad (NTU)	0.92	5
DQO (mg/L)	3.41	N/A
DBO ₅ (mg/L)	1.65	N/A
SAAMS (mg/L)	0.15	0.5
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	38.53	400
NH ₃ (mg/L)	4.16	0.5
SST (mg/L)	1.15	N/A
SS (mg/L)	0.40	N/A
Coliformes F.(NMP/100mL)	< 1.1	Ausencia
Coliformes T.(NMP/100mL)	< 1.1	Ausencia

N/A: no aplica

CONCLUSIONES

El estudio mostró que la aplicación de los procesos fisicoquímicos, oxidación química y desinfección removió los contaminantes de el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales, mejorando la calidad del agua en la mayoría de los parámetros evaluados, sin embargo el valor de NH_3 se encuentra fuera del límite permisible, por lo que se propone adicionar otro tipo de tratamiento antes de la oxidación química para remover el NH_3 .

AGRADECIMIENTOS

Al Centro Interamericano de Recursos del Agua, al Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM y a CONACYT por el apoyo otorgado.

REFERENCIAS

- Ahmad B.J.; Cheng, W.H.; Low, W.M.; Ali, N.; Megat, M.N.M.J. (2005); *Study on the removal of iron and manganese in groundwater by granular activated carbón*, Desalination: 182, 347-353.
- APHA, AWWA (1995); Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed., American Public Health Association, Washington, DC.
- Azbar, N.; Yonar, T.; Kestioglu, K. (2004); *Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent*. Chemosphere: 55, 35-43.
- Bejankiwar, R.S.; Lokesh, K.S.; Gowda, T.P. (2003); *Colour and organic removal of biologically treated coffee curing wastewater by electrochemical oxidation method*. Journal Environmental Science: 15(3), 323-327.
- Beteta, A.; Cañizares, P.; Rodrigo, M.A.; Rodríguez, L.; Sáez, C. (2009); *Treatment of door-manufacturing factories wastewaters using CDEO and other AOPs, A comparison*. Journal Hazardous Materials: 168, 358-363.
- Deligiorgis, A.; Xekoukoulotakis, N.P.; Diamadopoulos, E.; Mantzavinos, D. (2008); *Electrochemical oxidation of table olive processing wastewater over boron-doped diamond electrodes: Treatment optimization by factorial design*. Water Research: 42, 1229-1237.
- Devi, R.; Dahiya R.P. (2008); *COD and BOD removal from domestic wastewater generated in decentralized sectors*. Bioresour. Technology: 99, 1853-1860.
- Devi, R.; Singh, V.; Kumar A. (2008); *COD and BOD reduction from coffee processing wastewater using Avacado peel carbon*. Bioresour. Technology: 99, 344-349.
- FAO (2008); Water Quality and Environment Programme. www.fao.org/nr/water/aquastat/countries.stm.
- Fontanier, V.; Farines, V.; Albet, J.; Baig, S.; Molinier, J. (2006); *Study of catalyzed ozonation for advanced treatment of pulp and paper mill effluents*. Water Research: 40, 303-310.
- Guigui, C.; Roucha, J.C.; Durand-Bourlierb, L.; Bonnelyeb, V.; Aptel P. (2002); *Impact of coagulation conditions on the in-line coagulation/UF process for drinking water production*. Desalination: 147, 95-100.
- Healy, M.G.; Rodgers, M.; Mulqueen, J. (2006); *Performance of a stratified sand filter in removal of chemical oxygen demand, total suspended solids and ammonia nitrogen from high-strength wastewater*. Journal Environment Management: 83, 409-415.

Hoigne, J.; Bader, H. (1978); *Ozonation of water: kinetics of the oxidation of ammonia by ozone and hydroxyl radicals*. Environment Science Technology: 12, 79-84.

Hoigne, J.; Bader, H.; Haag, W.R.; Staehelin, J. (1985); *Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water-III*. Water Research: 19(8), 993-1004.

Holt, P.K.; Barton, G.W.; Mitchell, C.A. (2005); *The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology*. Chemosphere: 59(3), 355-367.

Kuo, J.F.; Dodd, K.M.; Chen, C.L.; Horvath, R.W.; Stahl, J.F. (1997); *Evaluation of tertiary filtration and disinfection systems for upgrading high-purity oxygen-activated sludge plant effluent*. Water Environment Research: 69, 34-43.

Kusvuran, E.; Gulnaz, O.; Samil, Ali; Erbil, M.; (2010). *Detection of double bond-ozone stoichiometry by an iodimetric method during ozonation processes*. Journal of Hazardous Materials: 175, 410-416.

Kreetachat, T.; Damrongsri, M.; Punsuwon, V.; Vaithanomsat, P.; Chiemchaisri, C.; Chomsurin, C. (2007); *Effects of ozonation process on lignin-derived compounds in pulp and paper mill effluents*, Journal of Hazardous Materials: 142, 250-257.

Lan, B.Y.; Nigmatullin, R.; Puma, G.L. (2008); *Ozonation kinetics of cork-processing water in a bubble column reactor*. Water Research: 42, 2473-2482.

Lee, K.M.; Lim, P.E. (2005); *Bioregeneration of Powdered Activated Carbon in the Treatment of Alkyl-Substituted Phenolic Compounds in Simultaneous Adsorption and Biodegradation Processes*, Chemosphere: 58, 407-416.

Libhaber, M. (2004); *Manejo sostenible de las aguas residuales urbanas en países en vía de desarrollo*. Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS, San Juan, Puerto Rico, p. 24.

Li, L.; Zhu, W.; Zhang, P.; Chen, Z.; Han, W. (2003); *Photocatalytic oxidation and ozonation of catechol over carbon-black-modified nano-TiO₂ thin films supported on Al sheet*. Water Research: 37, 3646-3651.

Nienow, A.M.; Bezares-Cruz, J.C.; Poyer, I.C.; Hua, I.; Jafvert, C.T. (2008); *Hydrogen peroxide-assisted UV photodegradation of lindano*. Chemosphere: 72, 1700-1705.

NOM-127-SSA1-1994, Norma Oficial Mexicana, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización (modificada).

Nugroho, W.A.; Reungoat, J.; Keller, J. (2010); *The performance of biological activated carbon in removing pharmaceuticals in drinking water treatment*. Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation: 123-133.

Restrepo, O.H.A. (2009); *Evaluación del proceso de coagulación-floculación de una planta de tratamiento de agua potable*. Tesis de grado, Ing. Civil, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Minas. www.bdigital.unal.edu.co/877/1/15372239_2009.pdf

Rivas, J.; Gimeno, O.; Beltrán, F. (2009); *Wastewater recycling: Application of ozone based treatments to secondary effluents*. Chemosphere: 74, 854-859.

Saad A. All Jill. (2009); *COD and BOD reduction of domestic wastewater using activated sludge, sand filters and activated carbon in Saudi Arabia*. Biotechnology: 8(4), 473-477.

- Sonune, A.; Ghate, R. (2004); *Developments in wastewater treatment methods*. Desalination: 167, 55-63.
- Tensel B. (2008); *New Technologies for water and wastewater treatment: A survey of recent patents*. Recent Patents on Chemical Engineering: 1, 17-26.
- Thiel, P.; Zappia, L.; Warton, B.; Nolan, P.; Scott, D.; Alessandrino, M.; Franzmann, P.; Hiller, B.; Heitz, A.; Masters, D. (2006); *Activated carbon VS Anthracite primary dual filters- a pilot plant study*, 60th Annual Water Industry Engineers and Operators Conference, pp. 8-14.
- Tomiyasu, H.; Fukutomi, H.; Gordon, G. (1985); *Kinetics and Mechanism of Ozone Decomposition in Basic Aqueous Solution*, Inorganic Chemistry: 24, 2962-2966.
- White, G.C. (1986); Handbook of chlorination. Van Nostrand Reinhold Company, Inc., New York.
- Urriaga, A.; Rueda, A.; Anglada, A.; Ortiz, I. (2009); *Integrated treatment of landfill leachates including electrooxidation at pilot plant scale*. Journal Hazardous Materials: 166, 1530-1534.
- Zayas, P.T.; Geissler, G.; Hernandez, F. (2007); *Chemical oxygen demand reduction in coffee wastewater through chemical flocculation and advanced oxidation processes*. Journal of Environmental Sciences: 19, 300-305.
- Zgajnar, G.A.; Tisler, T.; Zagorc, K.J. (2009); *Comparison of different treatment strategies for industrial landfill leachate*. Journal of Hazardous Materials: 162, 1446-1456.
- Zhou, H.; Smith D.W. (2002); *Advanced technologies in water and wastewater treatment*. Journal Environmental Engineering Science: 1, 247-264.

