

SISTEMA ELECTROQUÍMICO MODULAR PARA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS

CAMPO TÉCNICO

[0001] La presente invención se relaciona con un sistema para descontaminación de aguas residuales por medio de un dispositivo que permite la eliminación de contaminantes emergentes por medio de métodos electroquímicos, y que puede ser alimentado por energías renovables.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

[0002] En la actualidad los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales como la filtración, coagulación o tratamientos biológicos están perdiendo efectividad debido al incremento en la complejidad de las matrices a tratar, las cuales ahora incluyen cargas considerablemente altas de materia orgánica, así como contaminantes emergentes provenientes de efluentes domésticos, hospitalarios, farmacéuticos e industriales, lo cual los proyecta incluso como un problema de salud pública.

[0003] Por lo anterior, la utilización y desarrollo de métodos alternativos para el tratamiento y eliminación de estos contaminantes emergentes se ha convertido en prioridad, siendo particularmente relevantes los procesos de oxidación avanzada (POA), los cuales se caracterizan por emplear el alto poder oxidante (2,8 eV) y la poca selectividad del radical hidroxilo ($\cdot\text{OH}$). A pesar de que los POA han demostrado tener una gran versatilidad a la hora de generar la degradación de contaminantes emergentes, su implementación a nivel industrial se ve limitada por sus elevados costos de funcionamiento.

[0004] Por lo tanto, se hace necesario el desarrollo de métodos que permitan el tratamiento de aguas residuales que contengan una alta concentración de materia orgánica sin afectar su funcionamiento óptimo, y que además sea adecuado para el tratamiento de contaminantes como fármacos, hormonas, sustancias de abuso, residuos agroindustriales, así como productos destinados al cuidado y la higiene personal, por medio de métodos que permitan su implementación industrial de manera económica, sencilla y versátil.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

[0005] Considerando lo anterior, la presente invención proporciona una solución a este problema por medio de un sistema autónomo dual que permite el tratamiento de aguas residuales por medio de dos módulos acoplados: un módulo de electrocoagulación (I) y un módulo de oxidación avanzada (II). Gracias a la purificación inicial del agua residual en el módulo de electrocoagulación (I), la cual permite una disminución de la carga orgánica de la misma, es posible la implementación secuencial de un módulo de oxidación avanzada (II), obteniendo una purificación mejorada sin afectar el desempeño de ninguno de los dos procesos. Adicionalmente, considerando la gran diversidad de contaminantes presentes en aguas residuales, el sistema de acuerdo con la presente invención se constituye como una opción versátil para el tratamiento de una gran variedad de estos, ya que es posible la utilización del sistema empleando

ambos módulos, o solo uno de ellos, considerando tanto las condiciones iniciales del líquido a tratar, como los requerimientos finales del líquido tratado.

[0006] Asimismo, la presente invención proporciona una solución viable, económica y conveniente para realizar la descontaminación de aguas residuales en lugares de difícil acceso, debido a que no se requiere el transporte o adición de reactivos para el proceso. La presente invención favorece la descontaminación de aguas residuales en lugares con poca o nula disponibilidad de redes eléctrica, ya que además es posible alimentar el sistema empleando fuentes renovables de energía.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

[0007] Figura 1: Esquema general del sistema de descontaminación de aguas residuales de acuerdo con una realización de la invención, en donde la sección (I) corresponde al módulo de electrocoagulación y la sección (II) corresponde al módulo de oxidación avanzada.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

[0008] Los aspectos específicos de la tecnología presentada se pueden entender mejor con referencia a la Figura. Los componentes en los dibujos no están necesariamente a escala, y tampoco representan todas las diversas y posibles secuencias o permutaciones de los componentes tecnológicos. Por lo tanto, se hace especial referencia a los principios de la tecnología divulgada en la presente invención. Tampoco se hace énfasis ni se muestran en las figuras los sistemas de monitoreo como sensores, paquetes de sistemas de gestión lógica de datos o control de procesos que se pueden incorporar a la tecnología para facilitar la operación y rendimiento del sistema de tratamiento.

[0009] La posición, orden y secuenciación de los componentes y módulos propios del sistema, sus dimensiones, y la determinación de la capacidad general requieren estudios de tratabilidad y posibles ensayos de campo previos al tratamiento del fluido de manera que se puedan recopilar datos para definir el diseño final del sistema. Los componentes comercialmente disponibles, en contraste con aquellos que requieren fabricación o producción personalizada pueden poner límites en el tamaño y la configuración y pueden generar un subsistema paralelo o la necesidad de modificación del sistema completo para generar un sistema integral. La presente divulgación se centra en los componentes tecnológicos del tratamiento, pero también incluye variaciones de los mismos, que pueden proporcionarse para una instalación dada sin restar valor ni divergir de la técnica divulgada.

[0010] Las variables asociadas al desempeño de la tecnología tales como las corrientes empleadas, tamaños, materiales y configuración espacial de los electrodos, electrolito soporte, concentraciones, pH, caudal de aire de inyección, condiciones iniciales del líquido a tratar, entre otras, son factibles de optimización y deben ser evaluadas para obtener una purificación adecuada.

[0011] De manera general, tal como se muestra en la Figura 1, en una realización de la presente invención se presenta un sistema para descontaminación de aguas residuales constituido por un módulo de electrocoagulación (I) en el cual se realiza una purificación inicial del agua a tratar seguida de una decantación de lodos, y posteriormente un módulo de oxidación avanzada (II) en el que se realiza una remoción química de contaminantes por medio de un POA empleado un ánodo dimensionalmente estable (DSA) y un tanque de recirculación, que cuenta con una serie de lámparas UV. El sistema descrito puede funcionar sin la inclusión de ningún reactivo de proceso adicional debido a que los cationes Fe^{2+} requeridos para el POA son generados durante la electrocoagulación, y el peróxido de hidrógeno es electrogenerado por medio de la conversión de oxígeno proveniente de la inyección de aire atmosférico, o algún otro gas que lo contenga.

[0012] De acuerdo con una modalidad de la presente invención, el módulo de electrocoagulación (I) está constituido por un contenedor de almacenamiento (1), conectado a una bomba de flujo (2) encargada de llevar el líquido del contenedor de almacenamiento (1) a un electrocoagulador (4), el cual cuenta con una fuente para el electrocoagulador (3), que suministra la energía necesaria para llevar a cabo la electrocoagulación. Posterior al proceso de electrocoagulación, el agua pretratada es enviada a un sistema de remoción de sólidos (5), el cual permite la separación de los hidróxidos insolubles del metal seleccionado en el electrodo de sacrificio, siendo eliminados a través de la salida de sedimentos (6) y permitiendo el paso del agua pretratada ya sea como producto de la purificación o hacia el módulo de oxidación avanzada a través de la salida del sistema de remoción de sólidos (7). El tiempo de residencia dentro del módulo de electrocoagulación (I) dependerá tanto de las condiciones iniciales del agua a tratar como de las condiciones finales deseadas. En algunas modalidades, el tiempo de residencia dentro del módulo de electrocoagulación (I) puede variar de 5 a 60 minutos, preferiblemente de 5 a 40 minutos, más preferiblemente de 15 a 30 minutos.

[0013] De acuerdo con la presente invención, el sistema de remoción de sólidos (5) puede ser seleccionado de un decantador, una centrífuga o filtración. En una modalidad preferida de la invención, el sistema de remoción de sólidos (5) es un decantador.

[0014] En una modalidad de la invención, imanes de neodimio son adecuados a la salida del sistema de remoción de sólidos (7) para atrapar lodos no sedimentables, evitando así el paso de coágulos de hierro al módulo de oxidación avanzada (II).

[0015] Luego de realizar el primer paso de remoción física en el módulo de electrocoagulación (I), el agua a tratar puede pasar opcionalmente al módulo de oxidación avanzada (II), de forma que se aprovechan los iones residuales provenientes del electrodo de sacrificio del electrocoagulador (4) en el módulo de electrocoagulación (I), posterior a la decantación y eliminación de los lodos sedimentados. El líquido tratado es enviado a un tanque de recirculación (8) que cuenta con un arreglo de lámparas UV (9) para favorecer tanto la regeneración del Fe^{2+} como la fotodescomposición del peróxido de hidrógeno, así como

la eliminación de patógenos y degradación de contaminantes susceptibles a radiación de alta energía. El líquido tratado es enviado del tanque de recirculación (8) a una bomba de recirculación (10) la cual impulsa el líquido hacía una celda de oxidación (11), la cual está constituida por un cátodo de difusión de gas (12) y un ánodo dimensionalmente estable DSA (13), los cuales son alimentados por una fuente de la celda de oxidación (14). Antes de la llegada del líquido a la celda de oxidación (11), una bomba de inyección (15) agrega oxígeno al sistema de manera que se produzca la electrogeneración de peróxido de hidrógeno en el cátodo de difusión de gas (12) de la celda de oxidación (11). El agua residual se recircula por el sistema por un tiempo de residencia determinado, en el cual la materia orgánica se reduce a niveles aceptables o deseados, antes de disponer el líquido tratado a través de una salida (16). El tiempo de residencia dentro del módulo de oxidación avanzada (II) dependerá tanto de las condiciones iniciales del agua a tratar como de las condiciones finales deseadas. En algunas modalidades, el tiempo de residencia dentro del módulo de oxidación avanzada (II) puede variar de 5 a 60 minutos, preferiblemente de 5 a 40 minutos, más preferiblemente de 15 a 30 minutos.

[0016] Adicionalmente, en la Figura 1 se señalan los puntos de muestreo seleccionados para determinar la eficiencia del sistema de acuerdo con una modalidad de la invención. Se señalan particularmente tres zonas de muestreo: una antes del electrocoagulador -punto (A)-, una después del electrocoagulador -punto (B)- y una después de la celda de oxidación -punto (C)-. Las zonas de muestreo señaladas en la Figura 1 son tomadas como ejemplo en una realización de la presente invención.

[0017] El electrocoagulador (4) que hace parte del módulo de electrocoagulación (I), a diferencia de la coagulación física, no requiere la adición de sales metálicas para la precipitación de los contaminantes, ya que estos compuestos son producidos en el electrodo de sacrificio del electrocoagulador. La electrocoagulación emplea un electrodo de un metal seleccionado, el cual se sumerge en la solución a tratar, cerrando el circuito por medio de un contraelectrodo; el paso de corriente permite la generación de iones del metal, los cuales generan la precipitación de los contaminantes.

[0018] En realizaciones de la invención, electrodos de cobre, aluminio, hierro, o materiales que generen iones de estos metales son parte del electrocoagulador (4) del módulo de electrocoagulación (I). Los contraelectrodos presentes en dicho electrocoagulador (4) pueden ser de acero inoxidable, hierro o aluminio. De acuerdo con una modalidad, la utilización de electrodos de hierro, o que generen cationes Fe^{2+} y/o Fe^{3+} es preferida, debido a que los cationes Fe^{2+} residuales del módulo de electrocoagulación pueden ser utilizados en el módulo de oxidación avanzada. El acoplamiento de estos dos sistemas evita la inclusión de reactivos de proceso adicionales. En una modalidad preferida de la presente invención, el módulo de electrocoagulación tiene al menos un electrodo móvil.

[0019] De acuerdo con la presente invención, el módulo de oxidación avanzada (II) realiza una purificación adicional de los contaminantes del agua residual por medio de un proceso de remoción química utilizando diversos POA acoplados y complementarios. De manera preferida, entre estos

procesos se encuentran fotoelectro-Fenton, UV/H₂O₂, oxidación anódica con DSA y generación de especies activas de cloro, entre otros.

[0020] La celda de oxidación (11) del módulo de oxidación avanzada (II), cuenta con un DSA (13) el cual está construido sobre una base de titanio con un recubrimiento de una mezcla de diferentes óxidos de metales seleccionados de Pb, Ru, Ti, Sb, Ir y Sn en diferentes proporciones. De acuerdo con la presente invención, el DSA (13) puede ser seleccionado de las siguientes combinaciones: Sb₂O₅-dopado con Ti/RuO₂-ZrO₂, RuO₂-TiO₂, IrO₂-Ta₂O₅, Ti/Pt, Ti/PbO₂, Ti/SnO₂-Sb₂O₅. Eventualmente, el DSA (13) puede ser reemplazado por un electrodo de diamante dopado con boro (BDD). El cátodo de difusión de gas (12) se selecciona de un electrodo con un recubrimiento de fieltro de grafito u otro material generador de peróxido a partir de la reducción de oxígeno el cual permite la generación de H₂O₂ gracias al constante suministro de oxígeno a través de la bomba de inyección (15).

[0021] Gracias a los compuestos generados en la celda de oxidación (11) del módulo de oxidación avanzada (II), y la presencia de iones metálicos provenientes del módulo de electrocoagulación (I), es posible la generación de los radicales hidroxilo ([•]OH) por medio de la reacción de Fenton. Estos radicales son los responsables de la degradación química de la materia remanente luego del proceso de remoción inicial llevado a cabo en el módulo de electrocoagulación (I).

[0022] Así mismo, cuando se utilizan electrodos de hierro en el módulo de electrocoagulación (I), la configuración del sistema de descontaminación de aguas de acuerdo con la presente invención permite la disminución de la cantidad de subproductos indeseados como complejos de Fe²⁺ con iones hidroxilo o la oxidación del Fe²⁺. Particularmente, la ruptura de los enlaces de coordinación de los complejos de Fe²⁺ con hidroxilo es posible gracias a la acción de las lámparas UV (9) del tanque de recirculación (8) del módulo de oxidación avanzada (II). De la misma manera, el cátodo (12) es capaz de reducir los iones Fe³⁺ presentes en el medio, regenerando el Fe²⁺ requerido para el funcionamiento de los POA.

[0023] Adicionalmente, la presencia de radiación ultravioleta generada por las lámparas UV (9) del módulo de oxidación avanzada (II), permite la generación de radicales hidroxilo por medio de la ruptura homolítica del peróxido de hidrógeno presente en el medio. De manera similar, en aguas con alto contenido de cloruros, el DSA (13) del módulo de oxidación avanzada (II) puede generar especies de cloro activo en función del pH de la solución tales como ácido hipocloroso o ion hipoclorito.

[0024] En una modalidad preferida de la presente invención, el módulo de electrocoagulación (I) tiene al menos un electrodo móvil, de forma que el proceso convectivo obtenido por medio de la agitación del agua a tratar permita una reacción más completa, además de desfavorecer una potencial pasivación del electrodo por acumulación de material insoluble en su superficie.

[0025] En otra modalidad preferida de la presente invención, el sistema electroquímico puede ser alimentado tanto por la red eléctrica domiciliaria, como por medio de fuentes renovables como celdas solares fotovoltaicas, los cuales permiten que el sistema sea además independiente de la red eléctrica.

[0026] El tipo de voltaje y consumo de corriente de los módulos del sistema son características importantes para determinar el tipo de instalación eléctrica. El sistema de descontaminación de acuerdo con la presente invención puede funcionar conectado a una red domestica de alimentación de energía, o en modalidades preferidas por medio de un generador de energía renovable tal como, y sin limitación, luz solar, viento, agua y/o calor geotérmico. Más específicamente, el generador de energía renovable puede producir energía eléctrica con, por ejemplo, un generador fotovoltaico, un generador de energía eólica, o equivalentes del mismo. Así mismo, los sistemas de control, inversores de onda modificada, y/o baterías requeridos para la alimentación de energía del sistema por medio del generador de energía renovable, así como su tipo, cantidad y/o configuración no está limitado en la presente invención.

[0027] Como se ha mencionado previamente, las condiciones operacionales del sistema de acuerdo con la presente invención deben ser seleccionadas dependiendo tanto de las condiciones iniciales del agua a tratar como de los requerimientos finales de la misma. En modalidades preferidas la fuente para el electrocoagulador puede funcionar entre 0,1 V y 60 V y entre 0,01 A y 5 A. De la misma forma, la fuente de la celda de oxidación puede ajustarse a corrientes de entre 0,01 A y 5 A y voltajes de 0,1 V y 60 V.

[0028] Asimismo, los flujos tanto de contaminante en cada etapa del proceso como el caudal del gas que contiene oxígeno y los tiempos de residencia en cada uno de los módulos deben ser optimizados. En modalidades de acuerdo con la presente invención el flujo de contaminantes puede variarse de entre 80 mL/min y 160 mL/min y el caudal de gas de entre 0,1 L/min y 5,0 L/min.

EJEMPLOS

[0029] Para demostrar el funcionamiento del sistema en una configuración de acuerdo con la presente invención se realizaron ensayos de remoción de contaminantes tales como cristal violeta, glifosato y agua residual hospitalaria. Los compuestos requeridos para efectuar los ensayos fueron: cristal violeta (Sigma Aldrich); cloruro de sodio (Merck), sulfato de sodio (Merck), índigo carmín (Merck), ninhidrina (Merck), molibdato de sodio (Merck) y glifosato en presentación comercial con una concentración de 480 g/L (Yaser S.A.S). Todas las muestras fueron preparadas en agua destilada.

[0030] La concentración de cristal violeta y glifosato fueron monitoreadas por espectroscopía UV-Vis en un espectrofotómetro METTLER TOLEDO UV5 a 590 nm y 570 nm respectivamente. Dada la complejidad de las aguas residuales hospitalarias, el cromatograma de las aguas hospitalarias del municipio de Tumaco - Nariño se siguió a través de un HPLC Ultimate 3000 Diode array detector Thermo scientifics, Lichrospher RP-18 (5 µm), 50:50 ACN/H₂O, 0,5 mL/min. Se seleccionaron varias longitudes de onda en las cuales se

presentan señales de los contaminantes identificados en esta muestra (254 nm, 300 nm y 365 nm) y se determinó la reducción de las señales como indicativo de la remoción de los contaminantes mayoritarios.

[0031] Para el seguimiento de la concentración de glifosato en el reactor se empleó la metodología propuesta por Tzaskos *et al.* 2012¹, para lo cual se construyó una curva de calibración tomando volúmenes desde 20 hasta 140 µL de una solución previamente preparada con una concentración de 500 mg/L de glifosato, a estos volúmenes se le adicionó 500 µL de ninhidrina al 5% y 500 µL de molibdato de sodio al 5%, posteriormente se llevó a un baño María por 10 minutos, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se completó con agua destilada a un volumen de 5 mL. La lectura de estas muestras corresponde a concentraciones de 2 a 14 mg/L respectivamente. Para las muestras tomadas de los experimentos se utilizaron 100 µL y se repitió el mismo procedimiento usado para la construcción de la curva de calibración.

[0032] La cuantificación de la materia orgánica eliminada durante el proceso de electrocoagulación se determinó por medio de la espuma y los sedimentos producidos. Estos se llevaron a un horno a 95°C hasta peso constante, se registró el peso de los sólidos deshidratados, y posteriormente los sólidos fueron calcinados a 850°C durante 120 minutos en presencia de oxígeno, posteriormente se pesó y se restó la masa entre los dos sólidos, esta diferencia corresponde a la materia orgánica retenida por los hidróxidos de hierro formados. Por medio de este procedimiento es posible calcular los sólidos totales (ST), sólidos inorgánicos totales (SI), sólidos orgánicos (SO), sólidos inorgánicos normalizados a 1 gramo de ST (SIN) y los sólidos orgánicos normalizados a 1 gramo de ST (SON).

[0033] El carbón orgánico total de las aguas residuales se determinó mediante un equipo Shimadzu TOC-L. 10 mL de muestra se acidificó y desgacificó. 1,00 mL de muestra se inyectó en el reactor con catalizador de platino y se calentó a 650°C. Luego de la combustión, el CO₂ formado se cuantificó mediante detector IR, los valores de TOC son reportados en función de la curva de calibración.

[0034] Para evaluar la eficiencia del sistema, se seleccionaron una serie de puntos de muestreo para determinar la concentración de diversos contaminantes en esos puntos específicos. Estos puntos de muestreo fueron seleccionados para evaluar el efecto de cada una de las etapas y la flexibilidad que otorga la arquitectura del sistema de descontaminación de aguas residuales. Las zonas de muestreo se definen en la Figura 1 como (A), (B) y (C).

[0035] Ejemplo 1: Remoción de cristal violeta

Para evaluar la eficiencia del sistema reclamado por la presente invención, se realizaron ensayos de degradación del cristal violeta, el cual afecta la demanda química de oxígeno (DQO) y el carbono orgánico total (TOC), así como los sólidos disueltos y la penetración de luz en sistemas acuáticos, además de generar afectaciones a la salud humana.

¹ Danilla Fernanda Tzaskos et al., «Development of Sampling for Quantification of Glyphosate in Natural Waters», *Ciência e Agrotecnologia* 36 (2012): 399-405.

[0036] Los principales parámetros de operación para el proceso de electrocoagulación son la corriente aplicada a los electrodos y la concentración de contaminante presente en la muestra. En el presente ejemplo, se evaluó la degradación del cristal violeta a una concentración de 200 ppm empleando NaCl [0,15 M] como electrolito soporte. Se ajustó la fuente para el electrocoagulador (3) a 2,3 A y 8,31 V, y se empleó un arreglo de 4 cátodos de acero inoxidable (contraelectrodos) y 4 ánodos de sacrificio de hierro. En el módulo de oxidación avanzada, la fuente de la celda de oxidación (14) se ajustó a 190 mA y 3,3 V, el caudal de aire fue de 0,4 L/min. El flujo de contaminante a través del sistema se ajustó en 160 mL/min. Los tiempos de residencia fueron los siguientes:

- Electrocoagulador (4): 15,6 minutos;
- Sistema de remoción de sólidos (5): 17,5 minutos;
- Celda de oxidación (11): 2 minutos
- Tanque de recirculación (8): 18,75 minutos

[0037] Teniendo en cuenta que el sistema de descontaminación de aguas residuales de acuerdo con la presente invención consta de varios procesos o subsistemas, es necesario el seguimiento del cristal violeta en distintos puntos. Se realizaron determinaciones de pH, conductividad, % Remoción de color y carbono orgánico total (TOC) en las tres zonas referidas en la Figura 1 como (A), (B) y (C) con una variación en esta última, en la cual fue posible obtener dos muestras, una del módulo de oxidación avanzada (II) manteniendo las lámparas UV (9) activadas (denominado 3/ON) y otra en la misma zona con las lámparas UV (9) desactivadas (denominado 3/OFF). Los resultados se muestran en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1. Seguimiento pH y conductividad para la remoción de cristal violeta.

CARACTERISTICA	ZONA			
	1	2	3/ON	3/OFF
pH	7,058	11,789	11,970	11,654
Conductividad (mS/cm)	14,65	15,50	16,18	15,32

Tabla 2. Remoción de cristal violeta para cada fase de muestreo del sistema de descontaminación de aguas residuales. (*) Absorbancia de la muestra.

Zona	A*	Cristal Violeta [ppm]	Remoción color (%)	TOC (mg/L)	Remoción (TOC %)
1	1,02	12,492	0	52,640	0
2	0,02	0,077	99,96	4,678	91,11
3/ON	0,016	0,054	99,97	3,650	93,07
3/OFF	0,016	0,051	99,97	5,098	90,32
Blanco (NaCl)	0,015	0,042	99,97	-	-

[0038] Como se puede observar en los resultados anteriores, el pH de la solución varía después del electrocoagulador (4), incrementado su valor considerablemente, lo cual prueba la formación de los hidróxidos de hierro que se encuentran en equilibrio con los flóculos formados, los cuales precipitan los contaminantes del líquido tratado en el electrocoagulador (4). A su vez, dado que la conductividad en cada una de las etapas se mantiene prácticamente estable durante la remoción del cristal violeta, se

puede concluir que el electrolito soporte no está participando directamente en la formación de los flóculos, y además se evidencia que este no está coprecipitando con los mismos, ya que su concentración permanece prácticamente inalterada.

[0039] En cuanto a la remoción del color de la muestra tratada (Tabla 2), los datos obtenidos revelan que el módulo de electrocoagulación (I) es responsable de la remoción de más del 99% del cristal violeta adicionado. Lo anterior se comprueba gracias a la considerable disminución en el TOC que se obtiene luego de la electrocoagulación.

[0040] Como resultado de la etapa de electrocoagulación, se obtiene como residuo sedimento y espuma, estos fueron analizados por medio de métodos gravimétricos luego de una calcinación de cada una de las muestras. Estos resultados se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Cuantificación de sólidos resultantes del proceso de electrocoagulación.

	ST (g)	SI (g)	SO (g)	SIN (g)	SON (g)
Espuma	2,8639	2,311	0,5529	0,8069	0,1930
Sedimento	4,9338	4,0498	0,884	0,8208	0,1792

[0041] La Tabla 3 muestra que los sólidos generados (sedimento y espuma) están constituidos de 20% de materia orgánica y 80% aproximadamente de sólidos inorgánicos, estos últimos corresponden a los compuestos férricos desprendidos de los ánodos de sacrificio principalmente. El porcentaje de materia orgánica corrobora la remoción del cristal violeta por los hidróxidos de hierro.

[0042] Ejemplo 2: Remoción de glifosato

Se evaluó la efectividad del sistema de descontaminación frente a contaminantes en efluentes agroindustriales bajo los siguientes parámetros de operación: soluciones de prueba de glifosato [60 ppm] en agua destilada, con y sin electrolito (NaCl [0,15 M]), el caudal del fluido de prueba se ajustó a 100 mL/min y el de aire a 0,4 L/min. Los tiempos de residencia fueron los siguientes:

- Electrocoagulador (4): 25 minutos;
- Sistema de remoción de sólidos (5): 28 minutos;
- Celda de oxidación (11): 2 minutos;
- Tanque de recirculación (8): 30 minutos/

Las condiciones de operación dependieron de si el experimento contenía o no electrolito, estas condiciones se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones operativas del sistema de descontaminación de aguas residuales en presencia de glifosato con y sin electrolito soporte.

SIN ELECTROLITO		CON ELECTROLITO	
Caudal:	0,100 L/min	Caudal:	0,100 L/min
		Electrolito:	0,15 M (NaCl)
Electrocoagulador (4)		Electrocoagulador (4)	
Corriente:	0,287 A	Corriente:	2,186 A
Potencial:	61,35 V	Potencial:	7,35 V
Fuente de celda de oxidación (14)		Fuente de celda de oxidación (14)	
Corriente:	0,010 A	Corriente:	0,332 A
Potencial:	5,00 V	Potencial:	5,00 V

[0043] Se evaluó el pH y la conductividad de la solución en cada una de las zonas de muestreo. La Tabla 5 resume los resultados obtenidos en todas las zonas de muestreo en el ensayo sin la presencia de electrolito.

Tabla 5. Seguimiento del pH y conductividad de glifosato sin electrolito.

CARACTERISTICA	ZONA			
	1	2	3/ON	3/OFF
pH	5,6	6,6	6,8	6,6
Conductividad (µS/cm)	39,5	90,9	113,2	50,1

[0044] Se puede observar que el aporte a la conductividad por parte del glifosato es muy bajo, lo cual concuerda con lo esperado considerando que este compuesto no posee cargas formales. En cuanto al pH, es claro que no presenta cambios significativos durante ninguna etapa del proceso a estas condiciones.

[0045] La evolución del contaminante a través de las diferentes etapas de tratamiento se puede observar en la Tabla 6, la cual muestra una remoción de alrededor del 20% del glifosato y un 78% del TOC. Sin embargo, considerando que el método de cuantificación utilizado para determinar la concentración de glifosato implica la reacción de la ninhidrina con grupos amino de cualquier aminoácido, y teniendo en cuenta que los productos de degradación del glifosato pueden contener este tipo de grupos funcionales, no es posible garantizar que la cuantificación realizada corresponda efectivamente a un 100% de glifosato y no a una mezcla de glifosato remanente y productos de degradación del mismo. Sin embargo, los valores de TOC si son una evidencia importante que demuestran la degradación del contaminante presente en la muestra.

Tabla 6. Remoción de glifosato para cada fase de muestreo del sistema de descontaminación de aguas residuales sin electrolito. (*) Absorbancia de la muestra.

Zona	A*	Glifosato [ppm]	Remoción (%)	TOC (mg/L)	Remoción (TOC %)
1	1,062	18,56	0,00	17,42	0,00
2	0,941	16,35	11,89	4,998	71,31
3/OFF	0,912	15,83	14,72	3,690	78,82
3/ON	0,862	14,92	19,60	6,099	64,99

[0046] La presencia de electrolito en las aguas residuales hace viable la remoción de contaminantes vía electroquímica. Por esta razón se evaluó el comportamiento del sistema en presencia de NaCl [0,15 M]. La Tabla 7 relaciona el pH y la conductividad en cada zona a estas condiciones:

Tabla 7. Seguimiento del pH y conductividad de glifosato con electrolito.

CARACTERISTICA	ZONA			
	1	2	3/ON	3/OFF
pH	5,178	11,101	11,072	10,469
Conductividad (mS/cm)	15,62	15,24	13,92	14,76

[0047] El cambio de conductividad, debido a la presencia del electrolito soporte, en comparación con el ensayo anterior es evidente. Así mismo, el valor de pH luego del electrocoagulador (4) se eleva por la presencia de hidróxidos de hierro en el medio, mientras que la conductividad se mantiene relativamente constante.

[0048] Sin olvidar las limitaciones de la metodología empleando ninhidrina en la determinación de glifosato, la Tabla 8 condensa los valores de absorbancia, concentración y el porcentaje de remoción en cada una de las soluciones.

Tabla 8. Remoción de glifosato para cada fase de muestreo del sistema de descontaminación de aguas residuales con electrolito. (*) Absorbancia de la muestra.

Zona	A*	Glifosato [ppm]	Remoción (%)
1	0,890	15,42	0,00%
2	0,791	13,62	11,68%
3/OFF	0,682	11,64	24,53%
3/ON	0,642	10,91	29,27%

[0049] Al realizar una comparación entre los resultados obtenidos para la degradación del glifosato con y sin electrolito soporte, se aprecia una diferencia sustancial respecto a los procesos electroquímicos, y se observa una mejoría en presencia del electrolito soporte del 10% aproximadamente. A su vez, la arquitectura del sistema de descontaminación de aguas residuales en sus modos de funcionamiento ON/OFF son comparables en función del contaminante removido. En el proceso de electrocoagulación se puede notar que no hay variación ya que tanto en presencia como en ausencia de electrolito soporte se tiene una remoción del 11%.

[0050] De la misma manera que en el caso anterior, se evaluó la cantidad de sólidos orgánicos e inorgánicos tanto en la espuma como en los sedimentos obtenidos del proceso de decantación, los resultados se resumen en la Tabla 9.

Tabla 9: Cuantificación de sólidos resultantes del proceso de electrocoagulación en muestras de glifosato con y sin electrolito soporte.

		ST (g)	SI (g)	SO (g)	SIN (g)	SON (g)
SIN ELECTROLITO SOPORTE	Espuma	0,814	0,651	0,163	0,8	0,2
	Sedimento	0,136	0,116	0,0204	0,851	0,149
CON ELECTROLITO SOPORTE	Espuma	9,027	7,82	1,2063	0,866	0,134
	Sedimento	6,36	5,968	0,392	0,938	0,061

[0051] La comparación de estos dos experimentos permite concluir que, aunque en presencia del electrolito soporte se generan más sólidos, ya sea en forma de espuma o en forma de sedimentos (comportamiento atribuido al incremento del pH y a la poca solubilidad del hierro), es en la ausencia del electrolito en donde se remueve más materia orgánica por unidad de masa de material ferroso generado.

[0052] También se puede observar que a pesar de que la corriente aplicada en ausencia de electrolito es 87% menor a la aplicada con presencia de electrolito y que por esta razón se produce 94% menos material floculado y sedimentado, se obtuvo una remoción 44% superior de materia orgánica en los sólidos retirados del proceso en ausencia de electrolito.

[0053] *Ejemplo 3: Remoción de contaminantes en aguas hospitalarias*

Se tomaron muestras del Hospital San Andrés en el municipio de Tumaco (Nariño, Colombia), y se evaluó la remoción de contaminantes luego del paso por el sistema de descontaminación. De acuerdo con investigaciones previas, en estas aguas residuales se encuentran presentes en una concentración considerable acetaminofén, ciprofloxacina, claritromicina y clindamicina.

[0054] Dado que la matriz corresponde a una muestra de agua real hospitalaria, no se agregó electrolito soporte para evaluar el desempeño de la conductividad proveniente del efluente. En la Tabla 10 se pueden observar las condiciones de trabajo fijadas en el sistema de descontaminación de aguas.

Tabla 10. Condiciones operativas del sistema de descontaminación de aguas residuales empleadas para la remoción de contaminantes en aguas hospitalarias.

Condiciones operativas	
Caudal:	0,100 L/min
Caudal aire:	2 L/min
Electrocoagulador (4)	
Corriente:	2,185 A
Potencial:	58,35 V
Fuente de celda de oxidación (14)	
Corriente:	0,020 A
Potencial:	5,44 V

[0055] Se utilizó un caudal de 100 mL/min de agua residual hospitalaria, y se adecuaron los tiempos de residencia en los diferentes procesos que se llevan a cabo en el sistema de descontaminación de aguas de la siguiente manera:

- Electrocoagulador (4): 15,6 minutos;

- Sistema de remoción de sólidos (5): 17,5 minutos;
- Celda de oxidación (11): 2 minutos;
- Tanque de recirculación (8): 18,75 minutos.

[0056] La Tabla 11 muestra los resultados tanto de pH como de conductividad en los distintos puntos de muestreo seleccionados. Se puede observar la poca conductividad que posee la matriz; a pesar de la generación de hidróxidos de hierro, el pH no se incrementa a los valores que se registraron en los experimentos pasados.

Tabla 11. Seguimiento del pH y conductividad de la muestra de agua hospitalaria.

CARACTERISTICA	ZONA			
	1	2	3/ON	3/OFF
pH	6,4	9,1	8,5	7,3
Conductividad (µS/cm)	160,6	148,5	159,2	153,6

[0057] Se empleó HPLC para el seguimiento de la materia orgánica presente en los efluentes hospitalarios. Las longitudes de onda fueron seleccionadas debido a la gran absorbancia que poseen los compuestos orgánicos mayoritarios de la muestra (254 nm, 300 nm y 365 nm). Esto teniendo en cuenta que se hace un seguimiento general a los distintos compuestos orgánicos que posee la matriz; de igual manera estos análisis de degradación se vieron complementados por el seguimiento realizado al TOC.

Tabla 12. Disminución en unidades de área para cromatograma a 254nm de longitud de onda – aguas hospitalarias

Zona	Área (mAU*min)	% Degradación	Pico máximo (mAU*min)	% Degradación pico máximo
1	4,5381	0	3,029	0
2	2,826	38	2,1135	30
3/ON	2,7268	40	2,1008	31
3/OFF	2,7419	40	2,0436	33

Tabla 13. Disminución en unidades de área para cromatograma a 300nm de longitud de onda – aguas hospitalarias

Zona	Área (mAU*min)	% Degradación	Pico máximo (mAU*min)	% Degradación pico máximo
1	2,2926	0	1,9587	0
2	1,4066	39	1,1379	42
3/ON	1,4222	38	1,1828	40
3/OFF	1,3539	41	1,0734	45

Tabla 14. Disminución en unidades de área para cromatograma a 365nm de longitud de onda – aguas hospitalarias

Zona	Área (mAU*min)	Disminución (%)	Pico máximo (mAU*min)	Disminución pico máximo (%)	TOC (mg/L)	Remoción TOC (%)
1	0,73	0	0,4757	0	95,761	0
2	0,3161	57	0,242	49	30,478	68,17
3/ON	0,4005	45	0,2852	40	5,445	94,31
3/OFF	0,3232	56	0,2364	50	7,994	91,61

[0058] Los resultados mostrados en las Tablas 12 a 14, demuestra en gran aporte en la remoción de contaminantes que tiene la electrocoagulación, no obstante, y a pesar de la baja conductividad que posee

la matriz. Así mismo, se alcanzaron resultados favorables en la remoción del TOC de la matriz, donde se observa que ambos tratamientos (3/ON y 3/OFF) aumentan la disminución del TOC en 25% aproximadamente, a pesar de que en el análisis cromatográfico esta disminución no se vea reflejada.

[0059] Se realizó además una prueba de cuantificación de materia orgánica removida mediante la calcinación de los sedimentos y espuma generada en el proceso de electrocoagulación. Los datos obtenidos como resultado de la cuantificación se resumen en la Tabla 15, en la que se puede observar que la cantidad de materia orgánica corresponde a un 5% de los sólidos retirados.

Tabla 15. Materia orgánica e inorgánica removida en el proceso de electrocoagulación – Aguas hospitalarias

	ST (g)	SI (g)	SO (g)	SIN (g)	SON (g)
Espuma	4,665	4,424	0,241	0,948	0,052
Sedimento	1,399	1,337	0,063	0,955	0,045