

Experiencias de gestión ambiental para el manejo y disposición final de catalizadores gastados en refinerías de petróleo en América Latina

Environmental management experiences for the handling and final disposal of spent catalysts in oil refineries in Latin America

ROBLES, DARWIN¹

¹Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas. Esmeraldas, Ecuador..

RESUMEN

La producción de desechos vinculados con catalizadores gastados utilizados en diversas operaciones en la refinación del petróleo puede conformar un importante problema ambiental debido a la característica en los metales que lo componen, circunstancia que complica el estudio de estos en función de las diferentes normas o leyes ambientales que existen en el mundo, así como en toda Latinoamérica. En este sentido, el objetivo de esta investigación se centra en conocer y analizar las experiencias de gestión ambiental para el manejo y disposición final de catalizadores gastados en Refinerías de Petróleo en América Latina, además de interrelacionar las experiencias previas con los basamentos teóricos que sustentan la investigación, es importante realizar la interrelación entre las posturas para que se produzca una visión congruente sobre los aspectos más favorables para el adecuado manejo de los catalizadores gastados. A tal efecto, el diseño metodológico fue descriptivo permitiendo el análisis de documentos e investigaciones que apoyaron las diversas experiencias sobre la temática, así como fundamentos teóricos, técnicos, experiencias estudiadas, que permitieron establecer que las propiedades químicas presentes en los catalizadores gastados posibilitan la reutilización como insumo básico, sin embargo, representa un potencial alerta ecológico de riesgos ante la exposición directa.

Palabras clave: catalizadores gastados, petróleo, América Latina, Ecuador.

Autor de correspondencia

darwin.robles@
epetroecuador.ec

Citación:

Robles, D. (2022).
Experiencias de gestión
ambiental para el manejo
y disposición final de
catalizadores gastados en
refinerías de petróleo en
América Latina. *GICOS*,
7(4), 228-243

DOI

[https://doi.org/10.53766/
GICOS/2022.07.04.15](https://doi.org/10.53766/GICOS/2022.07.04.15)

Fecha de envío

04/10/2022

Fecha de aceptación

11/11/2022

Fecha de publicación

02/12/2022



ABSTRACT

The production of waste linked to spent catalysts used in various operations in oil refining can form an important environmental problem due to the characteristic of the metals that compose it, a circumstance that complicates the study of these based on the different environmental regulations or laws that exist in the world, as well as in all Latin America. In this sense, the objective of this research is focused on knowing and analyzing the experiences of environmental management for the handling and final disposal of spent catalysts in Oil Refineries in Latin America, in addition to interrelating previous experiences with the theoretical bases that support the research, it is important to make the interrelation between the positions so that a consistent vision is produced on the most favorable aspects for the adequate management of spent catalysts. To this end, the methodological design was descriptive, allowing the analysis of documents and research that supported the various experiences on the subject, as well as theoretical and technical foundations, studied experiences, which allowed establishing that the chemical properties present in spent catalysts enable their reuse as basic input, however, it represents a potential eco-toxic warning of risks in the face of direct explanation.

Keywords: spent catalysts, oil, Latin America, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

La refinación del petróleo, por sus procesos propios, maneja diversas fases de refinación y dentro de estos procesos existe la producción de desechos relacionados con catalizadores gastados utilizados en diversos procesos unitarios, lo cual representa una notable problemática ambiental motivada a la característica en los metales que conforman los catalizadores, factores que complican la valoración (Castells, 2012).

En el tiempo de operación de la unidad de craqueo catalítico fluidizado, el “catalizador zeolítico” experimenta envenenamiento por depósitos de metales alcalinos y pesados incluidos en el procesamiento de crudo. Como consecuencia, el catalizador reduce su área superficial, incrementa la densidad aparente y se transforma en lo que se conoce como catalizador gastado, que no puede ser regenerado; por lo tanto, es sustituido por un catalizador nuevo para proseguir el proceso (Aung y Ting, 2005). Los catalizadores de FCC son de uso frecuente para la conversión de gasóleo (VGO) en productos de mayor octanaje. En el planeta, se espera una generación de 840.000 toneladas de catalizador agotado (Castells, 2012) como residuo.

Históricamente, los catalizadores gastados se remiten a lugares de disposición final de desechos sólidos. Sin embargo, cada vez son más abundantes las tecnologías para la reutilización y/o valorización de catalizadores, con la finalidad de prevenir el depósito incontrolado en vertederos (Morales et al., 2014). No obstante, en Ecuador, los catalizadores agotados producto del proceso de refinación de petróleo y coque están catalogados como desechos peligrosos por su propiedad CRITIB de toxicidad ambiental conforme al Listado Nacional de Desechos Peligrosos por fuente específica del Acuerdo Ministerial N° 142 del Ministerio del Ambiente de Ecuador (MAE, 2012).

Sin embargo, las primordiales metodologías de valoración de catalizadores agotados de FCC, refieren su utilización como insumos básicos para cementeras y su incorporación como adición al cemento Portland, en conjunto con otros materiales para la fabricación de fritas cerámicas y como aditivo inorgánico en la

conformación de las suspensiones que se usan en la obtención de las cubiertas vidriadas de los elementos del pavimento gresificado (Al-Dhamri y Melghit, 2010).

Así mismo, puede usarse, en lugar de caolín, para la obtención de zeolitas.

En este orden de ideas, la problemática se centra en conocer las experiencias de gestión ambiental para el manejo y disposición final de catalizadores gastados en las refinerías de Petróleo en América Latina. En este sentido, estas experiencias se deben centrar en las acciones desarrolladas por las empresas del ramo en Latinoamérica entre las cuales destacan: Petrobras Brasil, PDVSA Venezuela, Pemex México, Ecopetrol Colombia, YPF en Argentina, Petroecuador en Ecuador, entre otras.

A tal efecto, se infiere que existen experiencias previas que fortalecen el manejo de estos desechos desde diversos aspectos entre estos para Suarez et al. (2017) llegan a la conclusión que los catalizadores gastados de la FCC fueron catalogados por el Ministerio del Ambiente como desecho peligroso por su característica de toxicidad ambiental. Sin embargo, se evidenció que la concentración de los metales en lixiviado (As, Ba, Cd, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Cr, V) del catalizador gastado estuvo por debajo de los límites permisibles de la norma (EPA, 1992) y de la (NOM-052-SEMARNAT, 2005), acogida por el Ministerio de Ambiente de Ecuador. En este ámbito se concluyó que el catalizador gastado de craqueo catalítico evaluado, no excede ningún límite máximo permisible de las propiedades de CRTIB, para tomarse en cuenta como un desecho peligroso. El catalizador gastado de la FCC no expone peligros eco tóxicos relacionados con la aspiración de partículas además de consumirlas en función de los rangos precisos de evaluación de peligros a la exposición establecido por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU (US EPA [Environmental Protection Agency], 1996).

Así mismo, Villa et al. (2018) evidencian en su estudio sobre la evaluación de catalizadores sólidos utilizados en refinería de petróleo y su potencial regeneración señalan que se caracterizaron y evaluaron catalizadores sólidos conteniendo metales usados en refinería de petróleo y su potencial regeneración. Señalando la presencia de metales soportados sobre $\text{-Al}_2\text{O}_3$: $\text{Pt/Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Pd-Rh/Al}_2\text{O}_3$, donde en la categorización fisicoquímica fue determinada el área superficial BET, análisis térmico ATG-DSC, FRX y dispersión metálica, llegando a concluir entre algunas consideraciones que, el método de regeneración para suprimir coque en el catalizador de referencia fue acertado, consiguiendo reponer la actividad catalítica del catalizador fresco. La baja dispersión de platino en los catalizadores CAT-IC y CAT-IR originada por el tratamiento previo realizado en la industria, y la alta proporción de azufre residual, pudo ser unas de las causas de la completa desactivación de estos catalizadores, sin embargo, al usar con H_2 a $600\text{ }^\circ\text{C}$ y 345 kPa (preciso para eliminar 95% de azufre), resultó efectivo para catalizadores desactivados que tengan un poco de contenido de azufre inicial en comparación con CAT-IS.

Por su parte, Perera y Medina (2008) en su estudio orientado a la Interacción: Cemento petrolero B / Catalizadores Gastados FCC de potencial utilización en la Cementación de Pozos de Hidrocarburos señalan que las refinerías nacionales generan altas cantidades de catalizadores gastados anualmente ($\gg 3650\text{ Tm./año}$), sin posibilidades actuales de ser rehusados en actividades corporativas de Petróleos de Venezuela.

En este contexto, señalaron que existen reacciones químicas entre la zeolita (catalizadores gastados) y las pastas de cemento Portland, dando pie a la tesis de que se pueda realizar la reutilización de los componentes provenientes de esos procesos catalíticos para mitigar el impacto al medio ambiente, y a su vez, los costos operativos posterior a la aplicación llegando a concluir que el catalizador gastado con su dimensión, morfología, y propiedades químicas tal y como los desechan las refinerías nacionales, evidencian una positiva activación química con el hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ originado a través de la hidratación de las pastas de cemento B. Además, se logró un aumento en las características físicas de los sistemas finales de las mezclas en estudio, lo cual se debe a la generación de una mayor cantidad de geles: C-S-H, C-A-H y C-S-A-H por la reacción química entre las zeolitas (catalizador gastado) y el hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento B, entregando así beneficios de propiedades de los sistemas cementantes finales.

En general, las características reológicas como mecánicas analizadas en los sistemas de estudio pueden considerarse de alto interés para múltiple utilización de estas lechadas formuladas con catalizadores gastados, para la cementación de pozos como probable reemplazo de algunas cantidades del cemento. Por tal motivo, el objeto investigativo está centrado en conocer y analizar las experiencias de gestión ambiental para el manejo y disposición final de catalizadores gastados en Refinerías de Petróleo en América Latina, además de interrelacionar las experiencias previas con los basamentos teóricos que sustentan la investigación, es importante realizar la interrelación entre las posturas para que se produzca una postura congruente sobre los aspectos más favorables para el adecuado manejo de los catalizadores.

Sin embargo, es importante sustentar los aspectos fundamentales de los catalizadores con el fin de poder visualizar las acciones o experiencias a considerar en el proceso de refinación donde se utilizan los catalizadores. En este orden de ideas, respecto a la postura, en este momento, sobre el proceso de catálisis, se puede decir, que está muy difuminada en las diversas áreas científicas y de ingeniería, como lo evidencia la cuantiosa cantidad de revistas que se centran en dicho tema cada año. Los catalizadores han sido primordiales en la elaboración industrial de insumos básicos químicos, poliolefinas y otros materiales poliméricos (Passamonti, 2008). En este sentido, un caso de utilización es el ámbito de producción de hidrógeno basado en varios catalizadores soportados como Pt, Pd, Ir, y otros que mostraron una mayor durabilidad a la deposición de coque y una alta actividad.

Se han publicado cuantiosos artículos referidos a la evolución de catalizadores activos y resistentes al coque para la reacción de reformado en seco del metano (DRM). La reacción de DRM se cataliza frecuentemente con catalizadores como Ru, Rh, Pt, Ni y Co (Villaquirán et al., 2015). Otra utilización de la catálisis es el mejoramiento de la síntesis de amoníaco de NTP, que es un sistema catalítico-promotor muy eficiente. Se refiere a un catalizador multifuncional heterogéneo conformado por una diversidad de lugares catalíticos de superficie sólida. El rutenio es uno de los catalizadores más activos para la síntesis de amoníaco (Viswanathan, 2002).

La catálisis tiene un rol resaltante en la degradación de compuestos organofosforados permitiendo que los procesos de hidrólisis sean aún más efectivos incrementando su velocidad, la cual puede ser por medio de la

organización de un grupo saliente en el que intervienen iones metálicos, estos pueden ser Cu^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} y Mg^{2+} ; o en sistemas homogéneos en los cuales se dan reacciones de Hidrólisis en la superficie de los óxidos metálicos y silicatos. El catión metálico que es absorbido ya sea en el óxido o en el silicato, interactúa con un compuesto orgánico para dar lugar a su hidrólisis. La degradación de contaminantes hidrosolubles se puede llevarse a cabo a través del carácter ácido de algunos silicatos laminares, cuyos puntos de carga cero son al extremo bajos, permitiendo que el proceso de hidrólisis sea ácido (Ramos, 2002).

Catálisis homogénea y heterogénea: ya que la catálisis homogénea es un procedimiento altamente selectivo, es de uso a nivel industrial en procesos exotérmicos en los que se prefiere la disposición calórica. Entre los mecanismos de reacción se reportan la hidrogenación de alquenos, la formación de compuestos de organización y las reacciones de inserción. En comparación, la catálisis heterogénea emplea un número limitado de catalizadores que deben aguantar temperaturas y presiones altas.

No necesitan un proceso separado de separación de catalizadores, como hace la catálisis homogénea; la catálisis se produce en una gran superficie de contacto entre las sustancias que reaccionan (que pueden ser líquidas o gaseosas e incluso estar suspendidas en un soporte electrónico) y el catalizador. Los llamados catalizadores uniformes presentan una amplia selectividad geométrica, ya que funcionan como tamices moleculares cuando las moléculas que intentan penetrar en su espacio intracristalino interactúan con ellos. Este es el parámetro subyacente de diversos pasos industriales de refinado y petroquímicos que necesitan la separación selectiva de isómeros; esta catálisis posee un fundamental impacto económico a nivel industrial (Brown, 2005).

Níquel: es capaz de catalizar la telomerización, difiriendo con la catálisis del paladio es que los catalizadores de níquel producen más subproductos. Algunos catalizadores de níquel importantes que son activos en la telomerización del butadieno son $[\text{NiCl}_2]$, difos, NaBH_4 ; $[\text{Ni}(\text{acac})_2]$ $\text{PPh}(\text{OPri})_2$, NaBH_4 ; $[\text{NiCl}_2]$, PR_3 , BuLi ; $[\text{NiBr}_2]$, PR_3 , NaOPh ; $[\text{NiL}_4]$, $[\text{NiCp}_2]$, PR_3 ; entre otros (Umile, 2015). En investigaciones de poca data, se analizaron los catalizadores Ni/SO_4 en metanol, etanol y para el reformado de alquitrán, obteniéndose una mejora en el rendimiento del gas de síntesis, así como en el reformado de vapor de tolueno (SRT) como compuesto modelo de alquitrán de biomasa sobre $\text{Ni}/\text{zeolita}$, $\text{Ni-Fe}/\text{zeolita}$ y $\text{Ni-Fe-Mg}/\text{zeolita}$ en términos de supresión de la deposición de coque y mejora de la estabilidad (Ahmed et al., 2018).

Platino: algunos catalizadores de metales nobles son capaces de mostrar una alta actividad catalítica a bajas temperaturas. Por ejemplo, el catalizador de Pt tiene un buen rendimiento en la hidroxidación del palmitato de metilo, pero su alto costo y la poca selectividad de los productos alcanos frenan su desarrollo (Chen et al., 2018). Para hacer fácil las reacciones en una pila de combustible y simultáneamente generar más energía eléctrica en una sola pila, se requiere un catalizador, el Pt se usa a menudo, siendo primordial en los catalizadores de varias pilas de combustible e insustituible para las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM). Sin embargo, el Pt es relativamente caro, lo que aumenta el coste de producción de las pilas de combustible (Villaquirán y Mejía, 2015).

Paladio: una investigación de un nuevo catalizador de nanofibra de carbono de Pd se conoció que era activo

en la reducción catalítica del bromato para la purificación del agua. Los resultados del ACV a su vez señalan las vías de optimización de la fabricación de catalizadores basados en CNF/SMF; en comparación con la falta de posibilidades de optimización en el caso del catalizador basado en alúmina Chorkendorff y Iemantsverdriet (2003). Por lo tanto, podría adoptarse el concepto de catalizadores jerárquicos (Passamonti, 2008).

Catálisis y cuestiones ambientales: la sociedad actual requiere que las nuevas tecnologías deben tener un impacto mínimo en el ambiente, siendo estos “limpios” en dirección a evitar la generación de subproductos o residuos peligrosos. El desempeño de los catalizadores en la reducción de emisiones nocivas provenientes de pilas de combustibles de hidrógeno, procesos de hidrodesulfuración, generación de energía y tráfico automotor; por ello es importante la limpieza catalítica, ya que se promueve la reducción de la contaminación ambiental (Chorkendorff y Iemantsverdriet, 2003).

Últimamente ha existido curiosidad en el desarrollo de catalizadores con menos afectación ambiental, por medio de la obtención de piensos y reactivos partiendo de materiales de desecho o incluso de fuentes renovables. Adicional, el reúso de los catalizadores para diversas reacciones, así como la utilización de catalizadores preparados a partir de escorias ricas en CaO, para fijar el CO₂ (Cerqueira et al., 2008).

En este sentido, una de las posibles acciones para la utilización de los catalizadores en tecnologías limpias es en la gasificación, ya que sus propiedades son esenciales para mejorar la calidad del gas sintético y le confiere una mayor vida útil en cuanto a selectividad, estabilidad y actividad (Chorkendorff y Iemantsverdriet, 2003). Los catalizadores de metales alcalinos evidencian ser más activos en el proceso de gasificación que los catalizadores de metales alcalino-térreos y de transición, debido a que tienen una mayor difusividad y más temperatura de descomposición; dentro de los resaltantes se registran el potasio (K) y el sodio (Na), ya que son usados en la depuración del alquitrán y para facilitar la calidad del gas de salida. Entre los catalizadores alcalino-térreos se encuentran el magnesio (Mg) y el calcio (Ca), el calcio se utiliza para atrapar el CO₂, esto va a apoyar al incremento de las concentraciones de hidrógeno y monóxido de carbono (CO) en el gas sintético (Acevedo et al., 2019).

Propuesta de uso del ACV en el proceso de catálisis; relatar todo el procedimiento. El ACV es señalado como uno de los mejores marcos para evaluar los diversos impactos ambientales, tiene que ser amplio con información actualizada de diversos ámbitos de la ciencia y aceptar una aplicación constante del análisis; asimismo, sus resultados pueden ser usados para el reconocimiento de un área específica en lugar de otro. Por lo tanto, el próximo enfoque de análisis de casos permite reflejar una metodología acertada (Bobba et al., 2016). La investigación registró el potencial de las cenizas de combustión producidas a partir del carbón, los neumáticos y los RSU poseen la particularidad de ser reutilizados como catalizadores a través del proceso de reformado de vapor pirolítico-catalítico, evidenciando una productividad significativamente más alta en el gas total y H₂ (Al-Rahbi, 2019). Para el conocimiento de la lixiviación de los metales se necesitan medidas que se encuentren entre 1 a 10 (partes por billón) ppb; debido a que en ciertos procedimientos se utilizan productos de mayor valor, las pérdidas en ppm son financieramente permisibles, pero es de notar que se deben conocer temas de salud, seguridad y ambiente. La selección de los catalizadores está conceptualizada por la

coordinación del ligando, esta permanece idéntica al análogo homogéneo, si son utilizados ligando bidentados quelantes; al usar ligando monodentados hay peligro de obtener especies coordinadas de monofosfinas, debido a que el aislamiento del sitio de los ligandos puede prevenir la biscoordinación (Cole-Hamilton et al., 2006).

En paralelo al aumento del interés por la elaboración de diversos productos, se ha generado una mayor investigación acerca de las diversas consideraciones medioambientales y sanitarias de su desarrollo y utilización; la duda existente está vinculada a los múltiples efectos toxicológicos que tienen que revisarse para establecer políticas de depuración específicas (Feijoo et al., 2017).

En la investigación “evaluación del ciclo de vida de dos catalizadores utilizados en el proceso de limpieza del gas de síntesis del biocombustible y análisis de la variabilidad en la gasificación” se incluyó el ACV para verificar la productividad de la sostenibilidad de la elaboración de un catalizador metálico frente a un catalizador de bicarbonato delicado. Entre los hallazgos, se concluyó que la generación de bicarbonato tiene una reducción significativa de las emisiones de GEI y de energía más que el catalizador metálico, pero la elaboración de bicarbonato posee altos riesgos potenciales en la calidad del ecosistema, en términos amplios, mostró menores impactos negativos en la salud humana que la producción del catalizador de fabricación (Jin, 2012).

Reciclaje de catalizador con líquidos iónicos: El cambio de los procesos catalíticos homogéneos existentes a la novedosa tecnología de líquidos iónicos, permite en diversos casos un mejor rendimiento de los procesos, con una velocidad de reacción mejorada y selectiva; motivado a que la reutilización del catalizador es más eficiente y le otorga una mejor compatibilidad ambiental.

Los estudios realizados referentes a líquidos iónicos se centran en: a) diseños de nuevos ligandos iónicos para la excelente inmovilización de catalizadores y alta regioselectividad, b) la aplicación exitosa de líquidos iónicos baratos libres de alógenos (Amaya, 2005).

En procesos de hidroformilación bifásica catalizada por rodio, c) el desarrollo de conceptos inusuales de reacciones multifásicas para hidroformilación, como catálisis en catalizadores SILP y CO₂ líquido / supercrítico iónico. Los líquidos iónicos son una opción para la inmovilización de catalizadores homogéneos dados en procesos de catálisis bifásica líquido-líquido como en catálisis líquida-iónica soportada (SILP); debido a que estos compuestos al ser no volátiles con un poder de solubilización sintonizable, amplios rangos de líquido, propiedades de coordinación / acidez, pueden ser un disolvente “inocente”, precursor de ligandos, cocatalizador o catalizador; esto va a depender de la combinación específica catión/anión y de la reacción a ser investigada (Cole-Hamilton et al., 2006).

Nanopartículas sustentadas para catálisis homogénea y heterogénea: La utilización de nanopartículas soportadas en procedimientos de catálisis otorga la obtención de compuestos químicos y combustibles elaborados a partir de biomasa con mayor valor añadido. Estos son derivados de biopolímeros, así como también de materias renovables, óxidos metálicos (Fe y Cu), estos se consiguen sustentándolos sobre materiales porosos y nano partículas metálicas; adicional dichos catalizadores pueden prepararse controlando sus características propias

como son: tamaño, forma, distribución de nanopartículas, grupos funcionales, entre otros. Estos modelos de catalizadores suelen ser mucho más eficientes a nivel industrial y sostenible con el ambiente. La exigencia energética en el área del transporte logra que los biocombustibles puedan formar un elemento primordial en la actual sociedad; a estos se les ha llamado combustibles de segunda generación, puesto que no rivalizan con el área alimentaria, reducen sus niveles de CO₂ y otros gases dañinos para la salud y el ambiente; ya que estos se producen a partir de biomasa y residuos “biorefinería” (Luque, 2010).

Diversos tipos de catalizadores intervienen cuando se diluyen en una fase líquida como son protones, iones hidroxilo, sales o complejos orgánicos metálicos (Zanella, 2014). Las nanopartículas son importantes en la utilización de catalizadores de oro manométrico soportado; son partículas que tienen una dimensión menor a 5 nm, al mismo se le es depositado encima un catalizador óxido metálico suficientemente activo, usado en procesos oxidación de CO y en la descontaminación del aire para la reducción de N₂O y NO_x, descomposición de ozono y en procesos de oxidación total de hidrocarburos. Para beneficiar su accionar catalítico se diseñan estructuras en forma de soportes que mejoran el anclaje de las partículas de oro, haciendo que estas se estabilicen, incrementando así la actividad catalítica de los catalizadores dopados con Cobalto; adicional a los ámbitos que inciden en el incremento de la actividad catalítica se encuentra el manejo térmico de los mismos, a temperaturas cercanas a los 300°C a 1 atm de presión (Alonso et al., 2008).

Tratamiento y disposición final de los catalizadores: La actividad catalítica de los catalizadores se genera debido a la presencia de un área superficial elevada y centros metálicos activos, estos van disminuyendo con el paso del tiempo motivado a la pérdida del área superficial y a las altas temperaturas a las que trabaja; desencadenando la aparición de coque o la disminución en la dispersión de los metales nobles presentes en este, motivado a fenómenos de sinterización. La desactivación catalítica es señalada por la pérdida de la actividad catalítica de los catalizadores, estas pueden ocurrir por procesos mecánicos, térmicos y químicos, logrando que estos catalizadores no cumplan con las emisiones de contaminantes requeridas por la legislación, haciendo que estos necesiten un tratamiento y disposición final (Asencio et al., 2008).

DISEÑO METODOLÓGICO

La investigación se rigió bajo el diseño descriptivo debido a que permite mostrar los fenómenos como aparecen realmente, caracterizándolo con el fin de establecer su comportamiento, describiendo y explicando el proceso a ejecutar (Arias, 2006). Así mismo, permite registrar los análisis e interpretaciones de la naturaleza actual y la composición o procesos de los fenómenos de estudio (Tamayo y Tamayo, 2006) contemplando el desarrollo de una investigación que propondrá la implementación de un modelo operativo viable orientado a la solución de un problema.

Es por ello que, al soportar los hechos reales será necesario ejecutar estrategias que permitan analizar la situación directamente, como es el caso de las experiencias de gestión ambiental para el manejo y disposición final de catalizadores gastados en Refinerías de Petróleo en América Latina, métodos característicos sistemáticos mediante la recolección de datos para describirlos e interpretarlos, entender su naturaleza y

factores constituyentes, explicar sus características particulares y efectos (Arias, 2006) y con un enfoque de proyecto factible, puesto que consistirá en la elaboración de modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones. Por lo que la muestra se encuentra formada por un número finito de elementos que poseen características en común, como lo son las experiencias de gestión ambiental para el manejo y disposición final de catalizadores gastados en Refinerías de Petróleo en América Latina zona de acción de la investigación.

En cuanto al procedimiento de muestreo, por tratarse de experiencias referidas a la disposición y manejo de los catalizadores gastados en las refinerías de América Latina, será necesario seleccionar una muestra en función de las investigaciones o artículos que den a conocer experiencias similares vinculando las dinámicas sociales. Para ello, se acudió a técnicas de recolección de datos necesarias para la resolución de los objetivos planteados en la investigación. Según Arias (2006), “Se entenderá por técnica, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información. Son ejemplos de técnica: la observación directa, la encuesta en sus dos modalidades (entrevista o cuestionario), el análisis documental, y el análisis de contenido” (p.67).

Así mismo, se usó el análisis documental y de contenido, aplicado como una técnica que consiste en visualizar o recaudar información de tipo documental y de contenido en función de una temática específica o definida, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetos de investigación preestablecidos (Arias 2006).

RESULTADOS

Partiendo de las bases teóricas y de las experiencias estudiadas se establecieron algunas propiedades entre ellas: la caracterización del catalizador gastado de la FCC.

La densidad volumétrica registrada del catalizador gastado fue de $\pm 0,81$ g/mL en contraposición con el catalizador fresco, donde su densidad volumétrica fue de $\pm 0,80$ g/mL. Según Sadeghbeigi (2000) el valor de densidad aparente está relacionado con la fluidización y circulación del catalizador. En este orden de ideas, si el contenido de zeolita es alto, el catalizador es menos denso. En este sentido, en la tabla 1 se muestran las características propias de los catalizadores estudiados, con la finalidad de evidenciar los parámetros que se analizan para establecer los criterios de acción.

En este mismo contexto, se muestra la tabla 2 donde se evidencian los valores del criterio de Mears y Weisz Prater en los catalizadores estudiados.

En referencia a la granulometría del catalizador gastado de FCC, se concluyó que el 76,23% de la cantidad del catalizador gastado fue retenido en el cedazo de 75 μ m (N° malla 200), en tanto que el 17,86 % se mantuvo en el tamiz de 45 μ m (N° malla 325).

Metales en peso seco. Se estableció que los esenciales contaminantes metálicos del catalizador gastado son Vanadio (382 mg/kg) y Níquel (75 mg/kg). Referente a lo expuesto por Mitchell et al. (2003) el Vanadio posee

una alta acción destructiva hacia la zeolita, mientras que el Níquel genera interacciones de deshidrogenación no deseadas que generan hidrógeno y coque.

Tabla 1.

Principales propiedades de los catalizadores estudiados.

	Catalizador	Azufre en polvo sólido (PPM)	Metal activo % peso	S bet (m ² /g)	Dispersión Me- tálica %
Catalizadores Originales	CAT-REF	0	Pt 0,5	131	89
	CAT-II	0	Pt 0,1	137	26
	CAT-IS	7420	Pd 0,1 y Rh	n,d	n,d
	CAT-IR***	300	0,03	168	4
Catalizadores Regenerados	CAT-REF	0	Pt 0,5	182	89
	CAT-IC	450	Pt 0,1	179	7
	CAT-IS1**	370	Pd 0,1 y Rh	96	3
	CAT-IS2**	860	0,03	n.d	n.d
	CAT-IS3**	2660	Pt 0,4	n.d	n.d
	CAT-IS4**	2150		n.d	n.d

Nota: n. d. = no determinado; * regenerado por el autor; ** regenerado por la empresa.

Fuente Villa et al., 2018

Tabla 2.

Valores del criterio de Mears y de Weisz Prater en los catalizadores estudiados.

Catalizador	dp (mm)	Xtolueno	Wcatalizador (g)	Criterio Mears, CM	Criterio Weisz Prater, CWP
CAT-REF	3,8	0,95	1,4	0,0955	0,1747
CAT-II	1,5	0,25	3,0	0,0022	0,0033
CAT-IC	1,6	0,01	3,0	0,0001	0,0002
CAT-IR	1,6	0,01	3,0	0,0001	0,0002
CAT-IS1	3,5	0,01	3,0	0,0003	0,0007

Fuente: Villa et al. (2018)

Hidrocarburos totales de petróleo. La cantidad de hidrocarburos totales del catalizador gastado de FCC fue menor al rango de detección del método analítico. Aun cuando los hidrocarburos totales no se usaban para valorar la toxicidad ambiental, su densidad facilita estimar la presencia o no de TPH's en el catalizador gastado de FCC. De este modo, se pudo mostrar que el catalizador gastado de la FCC no posee niveles de contaminado con Hidrocarburos Totales de Petróleo.

En este sentido, las propiedades de peligrosidad CRTIB; representarían Corrosividad: la medida del pH del catalizador gastado fue de $\pm 5,3$, estableciéndose dentro de los límites permisibles (2 a 12,5 unidades de pH) para tomar en cuenta un residuo sólido como peligroso según la norma (NOM-052-SEMARNAT/93);

descartándose así la propiedad de corrosividad (C) para el catalizador gastado de FCC.

La velocidad de corrosión: en relación a los hallazgos obtenidos, se usaron los cupones de corrosión de latón - estaño y acero. La velocidad de corrosión para el cupón 1 fue de 3,70 milímetros por año (mmy) y para el cupón 2 de 3,720 milímetros por año (mmy). Según la norma (NOM-052-SEMARNAT/93), se señala un desecho como corrosivo cuando tiene la capacidad de afectar (corroer) el acero, a una velocidad de corrosión de 6,35 milímetros o más por año. En los diversos casos no se superaron los rangos máximos aceptados para tomar a un desecho como peligroso.

Reactividad: se evidenció que el catalizador gastado no reacciona violentamente generando gases, vapores o humos, por consiguiente, no es capaz de originar una explosión violenta, bajo condiciones normales (25° C y 1 atm).

Definición de toxicidad ambiental; los niveles de concentración de los metales en lixiviado (As, Ba, Cd, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Cr, V) registraron valores por el límite inferior de los rangos permisibles de la norma EPA 1311 y NOM-052-SEMARNAT/93, cabe destacar que no se consiguieron límites para el Vanadio en lixiviado en las normas (NOM-052-SEMARNAT/93) y EPA 1311 (EEUU). Esto motivo a contrastar con los valores permisibles de lixiviados para la disposición final de lodos con impermeabilización en la base del Reglamento RAOHE-1215 para operaciones hidrocarburíferas en Ecuador, por ejemplo. Como un ejemplo referencial, la concentración de Vanadio en el lixiviado no debe superar 2 mg/L RAOHE, (2001). El valor del cálculo de concentración de Vanadio en el lixiviado del catalizador gastado de FCC, está en el rango menor, en los casos estudiados.

En relación a la concentración del Níquel en el lixiviado, su proporción es menor a los rangos límites máximos permitidos en función de la norma EPA 1311 para metales en lixiviado. La norma EPA 1311 registra el parámetro mayor límite permisible de 5 mg/L para Níquel. Sin embargo, en función de los rangos de descarga al sistema de alcantarillado público establecidos en el Texto Unificado de Legislación Ambiental (TULSMA) en relación al Níquel, el valor de concentración no debe ser superior a 2 mg/L, siendo este valor del TULSMA superior a la concentración de Níquel en el lixiviado del catalizador gastado de FCC.

DISCUSIÓN

En función de los resultados mostrados, la utilización de catalizador gastado como insumo básico en cementeras no mostraría un impacto ambiental significativo. Según Al-Jabri (2013) el catalizador gastado puede reemplazar hasta el 20% del cemento en morteros y diseños de mezclas de concreto. Sin embargo, la manipulación del catalizador gastado, deberá realizarse con el propósito de reducir la dispersión del material particulado, es decir, al mantenerlo húmedo. Así mismo, Suarez et al. (2017) exponen que a pesar de que el Ministerio de Ambiente de la nación catalogó los catalizadores gastados como material tóxico ambiental, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, caracterizó que la densidad volumétrica en relación con la granulometría en un 76,23% se retiene en el cedazo y un 17,86% en el tamiz, sin exponer ecos tóxicos (US EPA, 1996).

En cuanto a los hidrocarburos totales, Suarez et al. (2017) en la detección a través del método analítico permitió estimar la presencia de TPH's evidenciándose ser un material que no contamina con hidrocarburos totales de petróleo. De igual manera, Perera y Medina (2008) señalan que el potencial de utilización en la segmentación de pozos en Venezuela, no generan impacto al medio ambiente, destacando la reutilización de los componentes del catalizador gastado con su dimensión, morfología, y propiedades químicas con el hidróxido de calcio.

Con respecto a la Reactividad expuesta, Suarez et al. (2017) muestran que el catalizador gastado no reacciona violentamente formando gases, vapores o humos, por lo que no es capaz de provocar una detonación violenta, bajo condiciones normales (25° C y 1 atm). Por lo expuesto, se argumenta que el catalizador gastado de FCC evaluado, no excede ninguno de los límites máximos en los componentes químicos, para considerarse un residuo como tóxico y peligroso de impacto ambiental. En este mismo orden de ideas, Peng et al. (2017) manifiestan que el proceso de catálisis apoyado en las nuevas tecnologías está fabricado con la intención de preservar el ambiente, evitando la generación de subproductos o residuos peligrosos, por ello, Chorkendorff et al. (2003) recomiendan la limpieza catalítica, ya que se promueve la reducción de la contaminación ambiental.

Ahora bien, en cuanto a la corrosión igualmente los catalizadores desgastados se encuentran dentro de los parámetros evaluados como componentes no tóxicos, establecidos según la norma API 581 (Tabla 3), indicando que todos los equipos analizados son considerados para los módulos técnicos de adelgazamiento (Thinning) y agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC), cuyos parámetros en el caso de la tolva F-V2 son bajos (Suarez et al., 2017).

Tabla 3.

Parámetros evaluados en la metodología IBR

Tipo de Fluido	VGO (C17-C25)
Diámetro de apertura (mm/pulg)	101,6/4pulg
Tasa liberación (lb/seg)	417,05
Duraciones de fuga	20 minutos/4pulg
Frecuencia de fuga (anual)	3×10^{-6}
Agrietamiento por corrosión	Bajo:1
Probabilidad (falla/año)	$3,432 \times 10^{-4}$

Nota: obtenido de Risk Analysis-RISKWASE 5

De acuerdo a la caracterización del catalizador gastado de la FCC y según la jerarquización en la gestión integral de los desechos peligrosos y/o especiales, se plantearon estrategias, de las cuales se mencionan las de menor impacto ambiental, la reposición (make up) del catalizador permitiendo mantener el perfil térmico y un bajo contenido de metales durante la alimentación, y la estrategia de reutilización como materia prima en cementeras una vez que el catalizador sea desechado (Suarez et al., 2017). Todo bajo la normativa, que según USEPA (1996), el material particulado emitido no representa algún riesgo asociado a la inhalación e ingestión ante exposición del catalizador gastado.

Con los precedentes expuestos se muestra que los catalizadores gastados de la FCC no simbolizan una amenaza

para el medio ambiente. Aunque, fue etiquetado por el Ministerio de Ambiente del Ecuador como desecho de impacto ambiental, se evidenció que los metales condensados se encuentran por debajo de los límites permisibles en las normativas vigentes en el Ecuador.

CONCLUSIONES

El catalizador gastado de la FCC fue registrado por los organismos rectores del Ambiente como residuo peligroso por su propiedad de toxicidad ambiental. En este sentido, se mostró que la concentración de los metales en lixiviado (As, Ba, Cd, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Cr, V) del catalizador gastado se registró debajo de los rangos permisibles de la norma EPA 1311 y de la NOM-052-SEMARNAT/93 acogida por el Ministerio de Ambiente de Ecuador.

Se reveló que el catalizador gastado de craqueo catalítico evaluado, no supera ningún límite máximo aceptado de las propiedades CRTIB, para tomarse como un desecho peligroso.

En función al volumen generado de 2 ton/día, equivalente a 60 ton/mes, el catalizador gastado de la FCC puede ser considerado como un desperdicio especial, donde los rangos de fronteras de concentración CRTIB establecidos no sobrepasan la normativa ambiental.

El catalizador gastado de la FCC no evidencia una potencial alerta eco tóxicos vinculada a la aspiración o consumo de materia de partículas, según los niveles específicos de valoración potencial de riesgos ante la exposición.

RECOMENDACIONES

En función de la jerarquización en el manejo de residuos peligrosos y especiales, se establece la Estrategia 1. Reposición (make up) del catalizador como acción de prevención en la fuente, donde se busca mantener una baja cantidad de metales durante la alimentación. En relación al aprovechamiento óptimo del residuo en función de sus propiedades físico químicas se propone la Estrategia 3. Reutilización como insumo básico en empresas cementeras con el más bajo impacto ambiental (≤ 25 : Impacto Irrelevante) para los componentes de agua, aire, suelo y generación de residuos, tomándose el uso final en vertedero controlado como última medida alternativa para la gestión del catalizador gastado de la FCC.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es resultado de los procesos realizados dentro del proyecto de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas titulado “Impactos económicos, ambientales y sociales derivados de la utilización de los cultivos energéticos en la Provincia de Esmeraldas”.

CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declaró no tener ningún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- Al-Dhamri, H. & Melghit, K. (2010). Use of alumina spent catalyst and RFCC wastes from petroleum refinery to substitute bauxite in the preparation of Portland Clinker. *Journal of Hazardous Materials*, 179:852–859.
- Al-Jabri, K. (2013). Potential use of FCC spent catalyst as partial replacement of cement or sand incement mortars. *Constr. Build. Mater*, 39, 77–81.
- Al-Rahbi, A. S. & Williams, P. T. (2019). Waste ashes as catalysts for the pyrolysis-catalytic steam reforming of biomass for hydrogen-rich gas production. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(5), 1224-1231. doi: 10.1007/ s10163-019-00876-8.
- Alonso, F., Ramírez, S. & Ancheyta, J. (2008). Alternativas para la recuperación de metales a partir de catalizadores gastados del hidrottratamiento de hidrocarburos pesados: un caso de estudio. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 24, 55-69.
- Amaya, J. (2005). Employing fly ash and FCC catalyser waste in recovering Chrome (III) from liquid effluent emitted by tanneries. *Ingeniería e investigación*, 57, 39-48.
- Arias, F. (2006). *El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica*. 6ta Edición. Editorial Episteme.
- Asencio, I., Rincón, J., Camarillo R. y Martín A. (2008). *Reciclado de catalizadores de automóviles análisis de las técnicas actuales y propuestas de futuro*. Red Iberoamericana en gestión y aprovechamiento de residuos. <http://www.redisa.net/doc/artSim2008/tratamiento/A3.pdf>
- Bobba, S., Deorsola, F. Blengini, G. & Fino, D. (2016). *LCA of tungsten disulphide (WS₂) nano-particles synthesis: state of art and from-cradle-to-gate LCA*. *Journal of Cleaner Production*, (Supplement C), 1478-1484. doi: 10.1016 / j.jclepro.2016.07.091
- Brown, A. (2005). Consideraciones sobre el estudio de catálisis homogénea y heterogénea, ICIDCA. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 10-14. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659002.pdf>
- Castells, X. (2012). *Reciclaje de Residuos Industriales*. Madrid: Ediciones Diaz de Santos. Segunda edición.
- Cerqueira, H., Caeiro, G., Costa, L. & Ribeiro, F. (2008). *Deactivation of FCC catalysts*. Elsevier, 1-13.
- Chen, H., Tseng, Y. & Hsu, K. (2004). Spent FCC catalyst as a pozzolanic materialfor high-performance mortars. *Cement Concrete Comp*, 26, 657–664.
- Chorkendorff I. & Iemantsverdriet J. (2003). *Concepts of Modern Catalysis and Kinetics*, Weinheim, Alemania, WILEY- VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, (pp: 377).
- Cole-Hamilton D. J. y Tooze R. P., (2006). *CATALYST SEPARATION, RECOVERY AND RECYCLING Chemistry and Process Design*. Catalysis by Metal Complexes Volume 30.
- Dweck, J. (2008). Study of a Brazilian spent catalyst ascement aggregate by thermal and mechanical analysis. *J. Therm. Anal Cal*, 92, 121–127.
- EPA (1992). *METHOD 1311: Toxicity characteristic leaching procedure*. USA: Environmental Protection Agency.
- Feijoo, S., González- García, S., Moldes-Diz, Y., Vazquez-Vazquez, C., Feijoo, G. & Moreira, M. (2017). Comparative life cycle assessment of different synthesis routes of magnetic nanoparticles. *Journal of Cleaner Production*, 143, 528-538. doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.079
- INEN (2000). Norma Técnica Ecuatorina. NTE INEN 2288:2000. *Productos Químicos Industriales Peligrosos. Etiquetado de Precaución*. Quito-Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización. Registro Oficial No. 117 de Julio 11 del 2000.
- INEN (2013). Norma Técnica Ecuatoriana NTN INEN 2266:2013. *Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos*. Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Jin, E. (2012). *Life cycle assessment of two catalysts used in the biofuel syngas cleaning process and analysis of variability in gasification, Oklahoma, United State*. https://shareok.org/bitstream/handle/11244/14910/Jin_okstate_0664M_13506.pdf?sequence=1
- Luque, R. (2010). Catalizadores de diseño para la producción de compuestos químicos. *Dialnet*, 106(4), 296-303. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3347192>
- MAE (2004). Ley de Gestión Ambiental. Ecuador: Ministerio del Ambiente. Codificación 19. Registro Oficial Suplemento 418 de 10 de septiembre de 2004.
- MAE (2008). Acuerdo N° 026. Procedimiento para el Registro de Generadores de residuos Peligrosos. Ecuador: Ministerio del Ambiente. Publicado en el Registro Oficial No. 334 del 12 de mayo de 2008.

- MAE (2015). Acuerdo N° 061. Reforma del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria. Ecuador: Ministerio del Ambiente. Año II - N° 316 Quito, lunes 4 de mayo de 2015.
- MAE (2012). Acuerdo N° 142. Listados nacionales de sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos y especiales. Ecuador: Ministerio del Ambiente. Publicado en el Registro Oficial No N° 856 del 21 de diciembre de 2012.
- Mitchell, M., Hoffman, J. & Moore, H. (2003). Residual feed cracking catalyst. En J. Magee, y M. Mitchell, Fluid Catalytic Cracking: *Science and Technology*, 293-338.
- Morales, F., Strubinger, A., Aponte, K., (2014). *Riesgo ambiental y uso de catalizador gastado de fcc en mezclas de morteros*. Rev. Fac. Ing. UCV, 29(.4). https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652014000400009
- NMX-AA-15-1985 (1992). *Protección al Ambiente - Contaminación del suelo*. Muestreo. Método de cuarteo. México: 6 de Noviembre de 1992.
- NOM-052-SEMARNAT. (2005). *Características, procedimiento de identificación, clasificación y listados de los residuos peligrosos*. México: Norma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 2006.
- Passamonti, J. (2008). Laboratory Evaluation of FCC Commercial Catalysts. Analysis of products of industrial importance. *Catalysis Today*, 314-318.
- Peng, Y., Chen, Y., Hatzenbeller, R., Addy, M., Zhou, N., Schiappacasse, C., Chen, D. Zhang, Y., Anderson, E. Liu, Y., Chen, P. & Ruan, R. (2017). Ru-based multifunctional mesoporous catalyst for low-pressure and nonthermal plasma synthesis of ammonia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), 19056-19066. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.118
- Perera, Y. y Medina, U. (2008). *Interacción: Cemento petrolero B / Catalizadores gastados FCC de potencial uso en la Cementación de Pozos de Hidrocarburos*. <https://1library.co/document/zp1vw4z-interaccion-cemento-petrolero-b-catalizadores-gastados-fcc-de-potencial-uso-en-la-cementacion-de-pozos-de-hidrocarburos.html>
- Ramos, J. (2002). *Estudio de la contaminación por metales pesados y otros procesos de degradación química en los suelos de invernadero del poniente almeriense* [Tesis doctoral, Universidad de Almería].
- RAOHE (2001). Reglamento Sustitutivo al Reglamento Ambiental para Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador, Decreto Ejecutivo 1215. Ecuador: Registro Oficial 265 de 13 de Febrero del 2001.
- REE (2005). *Catalíticas I, Manual de Operación Unidad Cracking Catalítico y Fraccionamiento*. Esmeraldas: Refinería Estatal de Esmeraldas. Técnicas Reunidas S.A.
- Sánchez-Vilches, E. (1994). *Aprovechamiento del catalizador usado de FCC de refinerías* [Tesis de Doctorado, Universitat Jaume I de Castelló].
- Sedrán, U. (2006). *Curso FCC. Unidad de Capacitación de Petroecuador*. Esmeraldas: KeyContac. Bienes y Servicios Técnicos.
- Suarez, D., Coral, K. y Gallegos, W. (2017). *Estrategias de gestión ambiental para el manejo y disposición final del catalizador gastado de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) generado en una refinería estatal de Ecuador*. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5994746.pdf>.
- Tamayo, M. y Tamayo. (1997). *Metodología de la investigación científica*. Editorial Limusa
- US EPA (1996). *Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods*. US Environmental Protection Agency. www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/online/index.htm
- Villa, Chicaiza, Chicaiza, Salazar, Dieguez, Navarrete, Zhang (2018). *Aplicaciones de los Catalizadores y su evolución a través de análisis de ciclo de vida*. Revista Ciencia UNEMI. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-AplicacionesDeLosCatalizadoresYSuEvaluacionATraves-8377281.pdf
- Villaquirán, M., y Mejía, R. (2015). Aprovechamiento del catalizador gastado de FCC en la síntesis de zeolitas de bajo contenido de sílice. *Rev. LatinAm. Metal. Mat*, 2, 334-343.
- Viswanathan, B. (2002). *Catalysis: Principles and Applications*. New Delhi: Narosa Publishing House.
- Woltermann, G. (2003). *Commercial preparation and characterization of FCC catalysts*. En J. Magee, y M. Mitchell, Fluid Catalytic Cracking: *Science and Technology* (pp. 105-144). Elsevier.
- Zanella, R. (2014). Aplicación de los nanomateriales en catálisis, Mundo Nano. *Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 7(12), 66-82. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/57163>

Autor

Robles Sosa, Darwin

MSc. En Gestión Ambiental, actualmente cumpliendo funciones en EP PETROECUADOR, Gerencia de Refinación en la Refinería de Esmeraldas.

E-mail: darwin.robles@epetroecuador.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1567-8554>