



REVISTA POLITÉCNICA



Biomasa residual



Procesamiento de biomasa



Biomateriales (bioplásticos)



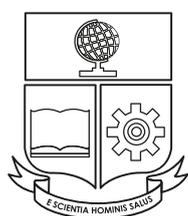
ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990

Volumen 48, No. 2, Noviembre 2021 · Enero 2022



REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990

Volumen 48, No. 2, Noviembre 2021 · Enero 2022

TEMÁTICA Y ALCANCE

La Revista Politécnica es una publicación periódica trimestral, editada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, cuyo objetivo es contribuir al conocimiento científico y tecnológico, mediante la publicación de estudios científicos relacionados a las áreas de ciencias básicas (Física, Química, Biología y Matemática) e ingenierías (Química y Agroindustria, Civil y Ambiental, Eléctrica y Electrónica, Geología y Petróleos, Mecánica, y Sistemas). La Revista Politécnica está dirigida a profesionales e investigadores que trabajan en estos campos del conocimiento.

EDITORIA

Jenny Gabriela Torres, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
editor.rp@epn.edu.ec

CO-EDITOR

Benjamin Bernard, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
coeditor.rp@epn.edu.ec

CONSEJO EDITORIAL

Ph.D. José Aguilar
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Víctor Hugo Hidalgo
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. José Luis Paz
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Ph.D. Hernán Alvarez
Universidad Nacional Colombia, Colombia

Ph.D. Majid Khorami (C)
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Nelson Pérez
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Santiago Arellano Chalmers
University of Technology, Suecia

Ph.D. Hugo Leiva
Yachay Tech University, Ecuador

Ph.D. Franklin Rivas
Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile

Ph.D. Carlos Ávila
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Francisco León
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Andrés Rosales
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Leonardo Basile
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Orestes Llanes
Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba

Ph.D. Gabriel Salazar
Organización Latinoamericana de Energía, Ecuador

Ph.D. Silvia Calderón
Finnish Meteorological Institute, Finlandia

Ph.D. Wilfrido A. Moreno
University of South Florida, Estados Unidos

Ph.D. Gustavo Scaglia
Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Ph.D. Eduardo F. Camacho
Universidad de Sevilla, España

Ph.D. Diego Ordóñez
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Hebertt Sira-Ramirez
Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute, México

Ph.D. Juan Carlos De los Reyes
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Rui Pedro Paiva
University of Coimbra, Portugal

Ph.D. Sebastián Taco
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Pamela Flores
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

La Revista Politécnica está incluida en Scientific Electronic Library Online (SciELO), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (REDIB), Matriz de Información para el Análisis de Revistas (MIAR), Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CiteFactor, PKP Index, Google Scholar, ResearchBib, International Institute of Organized Research (I2OR), ICI World of Journals, y actualmente aceptada en la base de datos Scopus.

Se autoriza la reproducción total o parcial de su contenido siempre y cuando se cite la fuente. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores.

Coordinador Técnico Operativo

Ing. Ricardo Villarroel
ricardo.villarroel@epn.edu.ec

Ing. Katherine Aro
katherine.aro@epn.edu.ec

Proofreader

MSc. María Eufemia Torres

Diseño de Portada

Cristian Basurto
Diseñador Gráfico

AUTORIDADES

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**Vicerrectora de Investigación,
Innovación y Vinculación**
Alexandra Alvarado, Ph.D.

Rectora
Florinella Muñoz, Ph.D.

Vicerrector de Docencia
Iván Bernal, Ph.D.

Editorial

Alcanzamos la indexación en Scopus

En este volumen, nos complace informar a todos nuestros lectores que Scopus, el mayor repositorio de resúmenes y citas académicas y uno de los más prestigiosos a nivel mundial, acaba de indexar a la Revista Politécnica de la Escuela Politécnica Nacional en su base de datos. Sin lugar a duda, que este es un reconocimiento a la calidad científica de nuestra Revista, del que solo gozan otras 3 revistas en Ecuador. Este logro es el resultado del apoyo de las autoridades de la Escuela Politécnica Nacional, quienes creyeron y respaldaron el proyecto desde sus inicios. Sin embargo, quisiéramos hacer un reconocimiento especial a cada uno de los actores principales en el proceso editorial: los autores, los editores, el proofreader, el equipo de edición y los revisores.

Principalmente a los autores, quienes motivados por publicar los resultados de sus investigaciones, han confiado y escogido a la Revista Politécnica para visibilizar sus trabajos.

A los editores, quienes juegan el rol de jueces al momento de asignar revisores y decidir los artículos que se publican.

Al proofreader, por cumplir un rol fundamental en el desempeño de la revista, pues esto implica una revisión íntegra de cada documento aceptado para publicación con el objetivo de detectar errores de lenguaje, y a la vez resolver problemas relacionados con la redacción académica y revisión de estilo del texto, entre otros.

Al equipo de edición, quien coordina las revisiones entre autores y revisores; y a la vez genera la versión definitiva del artículo para su publicación, archivo e indexación. Esto implica el formato tanto para la revista digital, como para publicación en las diferentes bases de datos en donde se encuentra indexada la revista.

Y finalmente, de manera muy especial queremos agradecer a los revisores, miembros del comité editorial de la revista, por su contribución a la sociedad científica y académica de manera altruista. El trabajo de revisión no es una tarea sencilla. El revisor debe adentrarse en el artículo que revisa para comprender el enfoque de los autores, la problemática y la metodología utilizada; y así poder comprender los elementos de discusión expuestos y las conclusiones planteadas. Adicionalmente, debe revisar las referencias bibliográficas y actualizar sus conocimientos sobre la materia acudiendo a otras fuentes complementarias si fuese necesario. Todo esto con el objetivo de poder transmitir sugerencias a los autores. Esto significa que su labor va más allá del simple arbitraje, su importancia es relevante en el control de calidad de una publicación.

Es por esto que la Revista Politécnica debe sus logros en gran medida a la labor de sus revisores anónimos, invisibles pero invaluable; lo que ha permitido la difusión de artículos con contenido científico relevante.

Gracias a esta gran familia, quienes conformamos el equipo de la revista, por su compromiso, su mística de trabajo y sentido de pertenencia.

En esta ocasión, los artículos publicados en este cuarto volumen del año 2021 son exhaustivos en la extracción de conceptos y teorías clave que soportan las discusiones y conclusiones novedosas e interesantes en distintas áreas del conocimiento.

El artículo de Vargas-García y colaboradores, “*Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión*”, realiza una revisión descriptiva sobre la disponibilidad y potencial de biomasa en América del Sur, con el propósito de establecer los tipos y cantidad de bioplásticos biobasados y biodegradables (BBB) que se pueden producir en esta región. Se realizó una descripción de la biomasa, sus características y clasificación. Posterior a esto, se recopiló información de la biomasa generada en cada país, para finalmente describir los tipos de BBB existentes en la actualidad. La investigación reveló que en la región se pueden producir 204,42 millones de toneladas (MMt) de bioplástico

basado en celulosa regenerada, 4,11 MMt de bioplástico basado en almidón, 0,58 MMt de ácido poliláctico y 8,68 MMt de polihidroxibutirato. Además, la producción de BBB es una alternativa que permite minimizar la contaminación ambiental producida por los plásticos sintéticos, ya que utiliza de manera eficiente y sostenible los residuos generados por actividades agropecuarias e industriales.

En el artículo de Carrera y colaboradores, *“Gestión de la Exposición Laboral a Ruido en el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CCICEV) de la Escuela Politécnica Nacional”*, los autores tienen como objetivo identificar los factores de riesgo que pueden afectar la salud auditiva del personal del CCICEV de la Escuela Politécnica Nacional, evaluarlos y proponer las medidas de control que permitan el cumplimiento de la normativa vigente respecto a la exposición laboral de ruido en el Ecuador. Luego de realizar la evaluación a riesgo físico, el nivel de presión sonora diario equivalente ponderado en A (Laeq_d) en el área técnica, sobrepasa los 85 dBA y en el área administrativa se encuentra sobre los 70 dBA. Por ello, fueron propuestas medidas de control para la fuente, el medio y el receptor, de acuerdo con la jerarquía de control de ruido de la norma ISO 45001.

En el artículo presentado por Carzola, *“Un Proceso Holístico de Toma de Decisiones para Mejorar la Productividad del Transporte Público en Cuenca-Ecuador”*, los autores determinan que si la urbanización crece de forma no planificada, se requieren más inversiones para ampliar la infraestructura actual o construir nuevas. El gobierno local de Cuenca-Ecuador tiene como objetivo ampliar la oferta de transporte público en toda la zona urbana (77,5% de cobertura espacial y 92% de cobertura poblacional en el área urbana), utilizando la máxima capacidad de la red vial. Por lo tanto, requiere un marco holístico e inclusivo que garantice la implementación del proyecto. Los estudios de planificación urbana han demostrado que la productividad de la red de transporte público depende de la red y los sistemas de actividad. La aplicación de la teoría de la red de actores demostró que la solución propuesta no solo es necesaria sino factible. El análisis permitió identificar diez actores interesados y un actor no interesado. Además, el método destaca el papel de cada actor para contrarrestar a los posibles oponentes y cumplir el objetivo de desarrollo para el 2030.

En el artículo de Cabrera y colaboradores, *“Estudio de la Catálisis Heterogénea con Disulfuro de Hierro (II) como Tratamiento de Emisiones Gaseosas Contaminadas con Tolueno Producidas en la Industria de Pintura”*, se desarrolla una alternativa para el tratamiento de las emisiones gaseosas contaminadas con tolueno producidas en la industria de pinturas, de modo que se minimice el riesgo de afectación a la salud de trabajadores y personas aledañas que mantienen contacto con dichas emisiones. Para simular el caudal del aire contaminado, se desarrolló a nivel de laboratorio un prototipo de un sistema fundamentado en el proceso de evaporación, a través del cual se obtuvo una concentración de tolueno igual a 108 partes por millón (ppm) en la corriente de aire. También, se diseñó y desarrolló un sistema para tratar la corriente, compuesto por el agente oxidante peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y el catalizador disulfuro de hierro II (FeS₂). En una primera etapa, se estudió la eficacia del H₂O₂ como agente de tratamiento obteniéndose que a un flujo de 2 mL/min, se degrada el 10,1 % del tolueno presente en la emisión contaminada, mientras que a un flujo de 3 mL/min, se degrada el 10,5 %. A continuación, se trabajó con diferentes cantidades de disulfuro de hierro II en una concentración igual al 86 %. Se determinó que 10 g de FeS₂ degradan al tolueno en un 36,25 %, mientras que 20 gramos un 61,09% y 30 g un 70,39 %. Finalmente, se concluyó que la concentración de tolueno en el aire disminuye hasta 32 ppm, cuando se trabaja bajo las mejores condiciones determinadas de 2 mL/min de H₂O₂ y 30 g de FeS₂.

En el artículo de Castillo y colaboradores, *“Propuesta de Actualización del RAOHE Incorporando Tecnologías de Fracturamiento Hidráulico, Reinyección de Recortes y Revisión de Límites Permisibles en la Gestión de Descargas Líquidas”*, los autores analizan la discontinuidad en la normativa y de procesos desde el enfoque de la tecnología relacionada con el manejo y disposición de agua. Específicamente, en la revisión y análisis de límites permisibles en el manejo de descargas líquidas, reinyección de recortes y fracturamiento hidráulico. Este ensayo se apoyó en el estudio de fuentes de investigación primaria para la definición de sugerencias generales sobre la aplicación y gestión ante la entidad de gestión ambiental, a la espera de que esta información pueda aportar a la articulación de marcos técnicos más comprensibles.

En el último artículo de León y Santacruz “*Elaboración de Briquetas a partir de Subproductos de Palma Africana (Elaeis guineensis J) y Arroz (Oryza sativa L)*”, la elaboración de briquetas se realiza a partir de mezclas de raquis de palma africana y cáscara de arroz con las siguientes composiciones: 100% raquis de palma africana; 75% raquis de palma africana y 25% cáscara de arroz; 50% de ambos subproductos, 25% raquis de palma africana y 75% de cáscara de arroz; y 100% cáscara de arroz. Las briquetas fueron analizadas en cuanto a friabilidad y dureza (textura instrumental), para posteriormente utilizar las briquetas con mejores resultados de ese estudio en la determinación de su poder calórico. Se obtuvieron valores de friabilidad entre 0,84% y 17,86% y de dureza entre 11,84 N y 29,44 N, sin que existan diferencias significativas ($p < 0,05$). El tratamiento escogido con mejores condiciones de friabilidad y dureza (50% raquis de palma africana y 50% cáscara de arroz) tuvo un poder calórico de 15,76 MJ/kg.

Queremos agradecer a nuestros lectores que cada día consideran a la Revista Politécnica como una referencia en sus investigaciones. Estamos seguros que el contenido de estos manuscritos logrará cautivar el interés de investigadores, docentes y estudiantes en sus actividades propias.

JENNY TORRES OLMEDO, Ph.D.

EDITOR

Contenido
Vol. 48, No. 2
Noviembre 2021 – Enero 2022

7

Vargas-García Yadira; Pazmiño-Sánchez Joffre; Dávila-Rincón Javier

Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión

Biomass Potential in South America for the Production of Bioplastics. A review

21

Carrera Gisela; Salgado Francisco; Villacis William

Gestión de la Exposición Laboral a Ruido en el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CCICEV) de la Escuela Politécnica Nacional

Management of Occupational Exposure to Noise at the Technology Transfer Center for Training and Research in Vehicle Emission Control (CCICEV) of the Escuela Politécnica Nacional

33

Cazorla Patricia

A Holistic Decision-Making Process to Improve the Productivity of Public Transportation in Cuenca-Ecuador

Un Proceso Holístico de Toma de Decisiones para Mejorar la Productividad del Transporte Público en Cuenca-Ecuador

43

Cabrera Marcelo; Montenegro Lucía; Mejía Stephanie

Estudio de la Catálisis Heterogénea con Disulfuro de Hierro (II) como Tratamiento de Emisiones Gaseosas Contaminadas con Tolueno Producidas en la Industria de Pintura

Study of Heterogeneous Catalysis with Iron (II) Disulfide as a Treatment in Gaseous Emissions Contaminated with Toluene from Paint Industries

53

Castillo Castro Daniel Sebastián; Zambrano Carranza Johnny Robinson; Rivera Parra José Luis

Propuesta de Actualización del RAOHE Incorporando Tecnologías de Fracturamiento Hidráulico, Reinyección de Recortes y Revisión de Límites Permisibles en la Gestión de Descargas Líquidas

RAOHE Review Proposal that Considers Technologies of Hydraulic Fracturing, Cuttings Reinjection and Revision of Permissible Limits in the Handling of Liquid Effluents

65

León Alain; Santacruz Stalin

Elaboración de Briquetas a partir de Subproductos de Palma Africana (*Elaeis guineensis* J) y Arroz (*Oryza sativa* L)

*Elaboration of Briquettes from By-products of African Palm (*Elaeis guineensis* J) and Rice (*Oryza sativa* L)*

Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión

Vargas-García, Yadira^{1,2,3,*} ; Pazmiño-Sánchez, Joffre⁴ ; Dávila-Rincón, Javier⁵ 

¹Instituto Superior Tecnológico Crecermás, Lago Agrio – Ecuador

²Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Amazonas, Lago Agrio – Ecuador

³Universidad de Jaén, Campus las Lagunillas, Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales; Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario (ceiA3), Jaén, España

⁴Soluciones Profesionales Biobasados e Industrialización Limpia - SOPBIAL Cía. Ltda., Dirección de proyectos, Lago Agrio – Ecuador

⁵Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Departamento de Ingeniería, Bogotá – Colombia

Resumen: La biomasa es una fuente primaria renovable que ha generado mayor interés en el mundo durante los últimos años, debido a la oportunidad de obtener productos energéticos y no energéticos similares a los que se producen de las fuentes no renovables. En este sentido, América del Sur, por su ubicación geográfica, cuenta con alto potencial de generar y adicionar valor a la biomasa; por lo que esta investigación realiza una revisión descriptiva sobre la disponibilidad y potencial de biomasa en América del Sur, con el propósito de establecer los tipos y cantidad de bioplásticos biobasados y biodegradables (BBB) que se pueden producir en esta región. En primer lugar, se realizó una descripción de la biomasa, sus características y clasificación. Posterior a esto, se recopiló información de la biomasa generada en cada país, para finalmente describir los tipos de BBB existentes en la actualidad. La investigación reveló que en la región se pueden producir 204,42 millones de toneladas (MMt) de bioplástico basado en celulosa regenerada, 4,11 MMt de bioplástico basado en almidón, 0,58 MMt de ácido poliláctico y 8,68 MMt de polihidroxibutirato. Además, la producción de BBB es una alternativa que permite minimizar la contaminación ambiental producida por los plásticos sintéticos, ya que utiliza de manera eficiente y sostenible los residuos generados por actividades agropecuarias e industriales. Finalmente, este estudio permite ampliar el estado del arte e intensificar las ventajas que tienen los países de América del Sur con respecto a la generación de empleos y desarrollo industrial en zonas rurales.

Palabras clave: Bioeconomía, bioindustrias, biomasa, plásticos biobasados y biodegradables.

Biomass Potential in South America for the Production of Bioplastics. A review

Abstract: Biomass is a primary renewable source that has generated greater interest in the world in last years, because it offers the opportunity to obtain energy and non-energy products similar to those manufactured from non-renewable sources. In this sense, South America, due to its geographical location, has high potential to generate and add value to biomass; so that this research carries out a descriptive review on the availability and potential of the biomass in South America, with the purpose of establishing the types and quantity of biobased and biodegradable bioplastics (BBB) that can be produced in this region. In the first place, a description of the biomass, its characteristics and classification was made. Subsequently, information was collected on the biomass generated in each country, to finally describe the types of BBB currently available. The research revealed that 204.42 million of tons (MMt) of bioplastic based on regenerated cellulose can be produced in the region, 4.11 MMt of starch-based bioplastic, 0.58 MMt of polylactic acid and 8.68 MMt of polyhydroxybutyrate. In addition, the production of BBB is an alternative that allows to minimize the environmental pollution produced by synthetic plastics, since it uses in an efficient and sustainable way the waste generated by agricultural and industrial activities. Finally, the study made it possible to expand the state of the art and intensify the advantages that the countries of South America have with respect to the generation of jobs and industrial development in rural areas.

Keywords: Bioeconomy, bioindustries, biomass, biobased and biodegradable plastics.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década el uso de la biomasa creció significativamente, destinándose a la producción de bioenergía

y materiales biobasados (Gerssen-Gondelach et al., 2014). Además, en el año 2016, la biomasa ocupó el cuarto lugar en el consumo total de energía del mundo, precedido por el carbón, petróleo y gas natural. (Wang et al., 2016). Según

*vargasyadira92@gmail.com

Recibido: 18/01/2019

Aceptado: 05/10/2021

Publicado: 01/11/2021

10.33333/rp.vol48n2.01

CC 4.0

investigaciones, esta materia prima renovable puede convertirse en una de las principales fuentes mundiales de energía primaria durante el presente siglo XXI (Berndes et al., 2003).

Las principales ventajas que tiene el uso de la biomasa como recurso energético en lugar del petróleo, carbón y gas, son la mejora de la situación socio-económica de las áreas rurales mediante el aprovechamiento de los residuos agrícolas y la reducción de las emisiones de azufre, partículas, CO, CH₄ y NO_x al medio ambiente. Además, la biomasa posee un ciclo neutro de CO₂ que no contribuye al efecto invernadero (MEER, 2014). Varias investigaciones demuestran que América Latina y el Caribe (ALC) y África Subsahariana son potenciales productores de biomasa que podrían desempeñar un papel importante para el desarrollo de la bioeconomía (Gerssen-Gondelach et al., 2014).

Dentro de ALC se encuentra América del Sur, la cual representa el 42% del continente americano con una superficie de 18 millones de km². En ella habitan alrededor del 6% de la población mundial y posee una gran variedad de climas como húmedo-cálido, frío seco y húmedo, templado, mediterráneo, tropical y ecuatorial (CEPAL, 2008). América del Sur se caracteriza principalmente por la extracción de recursos naturales (mineros, petroleros y/o gas) y actividades agrícolas (PNUMA, 2013). Por otro lado, en el año 2019 esta región consumió el 4,90% de la oferta mundial de energía primaria en las que se incluyen las energías renovables (BP, 2020). Asimismo, las emisiones de CO₂ en este mismo año correspondieron al 3,7% de las emisiones mundiales relacionadas con la combustión de petróleo, gas y carbón (BP, 2020).

El petróleo mediante el proceso de refinación que se realiza en una refinería es separado en diversas fracciones, en las cuales se obtiene la nafta, que es el principal elemento para la producción de plásticos (PlasticsEurope, 2017). En América del Sur cada año se produce el 4% de la producción mundial de plásticos de un solo uso (ONU Medio Ambiente, 2018; PlasticsEurope, 2020). Sin embargo, el uso de estos materiales ha contribuido en gran medida a la contaminación ambiental, ya que una vez desechados pueden permanecer hasta 2.000 años en el ambiente ya sea en vertederos, lagos u océanos (Digregorio, 2009).

Los plásticos desempeñan un papel insustituible en la vida cotidiana de los seres humanos. Actualmente su consumo a nivel mundial es mayor al consumo propio del acero (Wang et al., 2016). En vista de esto, la industria del plástico enfrenta un gran desafío con el ambiente, desde la utilización de sus materias primas hasta los productos que se obtienen. Para lo cual, es de suma importancia buscar alternativas que garanticen el desarrollo sostenible de esta industria. En este sentido, una transición de la economía actual basada en combustibles fósiles a una economía basada en biomasa puede ser un camino óptimo a seguir (Sleenhoff et al., 2015; Wang et al., 2016).

Los bioplásticos son uno de los principales bioproductos que se comercializan dentro de la economía basada en la biomasa. Estos son fabricados a partir de materias primas renovables y/o

biodegradables con una amplia gama de propiedades y aplicaciones (European Bioplastics, 2016). Según la Organización Europea de bioplásticos, estos materiales se encuentran divididos en tres grupos (European Bioplastics, 2016). En el primer grupo están los biobasados y no biodegradables como el polietileno, tereftalato de polietileno y poliamidas. El segundo grupo corresponde a los biobasados y biodegradables como el ácido poliláctico (PLA), polihidroxialcanoatos (PHA's), basados en almidón, celulosa y proteínas. Por último están los basados en recursos fósiles y biodegradables como el adipato de polibutileno tereftalato (European Bioplastics, 2016). Los bioplásticos tienen una historia de aproximadamente 150 años, estos materiales perdieron su importancia con el auge de la industria petroquímica en los años 50. Actualmente, el renacimiento de estos materiales ha sido impulsado por el progreso de la biotecnología y la preservación del ambiente (Pawelzik et al., 2013).

Cada año se produce cerca de 370 MMt de plásticos a nivel mundial (PlasticsEurope, 2020), de los cuales los bioplásticos representan apenas el 1%, sin embargo, esta producción ha aumentado alrededor del 20% por año, debido al incremento de materiales con mejores características técnicas que se ofrecen en el mercado (European Bioplastics, 2017a). De acuerdo a esto, los bioplásticos podrían sustituir técnicamente alrededor del 85% de los plásticos convencionales en un mediano y largo plazo (European Bioplastics, 2017b).

Finalmente, tomando en cuenta lo mencionado anteriormente y con el fin de adicionar valor a la biomasa, la presente investigación abarca una revisión descriptiva, fundamentada en artículos científicos, organismos nacionales e internacionales que han sido publicados en los últimos 7 años detallando la disponibilidad de biomasa en los países de América del Sur, con el fin de establecer los tipos y la cantidad de bioplásticos biobasados biodegradables que se pueden producir en la región; esta cantidad es determinada a partir de los rendimientos establecidos por el Instituto de Bioplásticos y Biocompuestos. Consecuentemente, se inicia con una descripción general de la biomasa, para posteriormente detallar la disponibilidad de esta materia prima en América del Sur y finalmente puntualizar las perspectivas y clasificaciones de los BBB.

2. BIOMASA

La biomasa captura la energía del sol mediante el proceso de la fotosíntesis. Esta energía es transportada a través de los diferentes eslabones de la cadena alimentaria hasta llegar al ser humano, la cual es utilizada como materia prima para obtener diferentes bioproductos energéticos y no energéticos (Zhang & Wang, 2013). En términos específicos, la biomasa es una fuente de energía renovable proveniente de los residuos de la materia orgánica, los cuales se generan principalmente de las actividades agrícolas, pecuarias, forestales, agroindustriales, acuosas, residuos urbanos y cultivos con fines energéticos (MEER, 2014). Las principales características que tiene esta fuente primaria son: carbono neutral, distribución geográfica relativamente uniforme, puede desarrollarse cerca de donde se usa, contribuye en gran medida al desarrollo socio-económico

y es relativamente económica en comparación con las fuentes primarias no renovables (Sims & Bassam, 2004).

En la Figura 1, se muestra la clasificación de la biomasa en función de su origen. Esta se encuentra dividida en biomasa residual y cultivos energéticos. La primera hace referencia a los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales de la materia orgánica (MEER, 2014). Esta biomasa proviene de los residuos de madera, forestales, agrícolas, pecuarios, municipales y agroindustriales (Prando, 2015). Los residuos de madera comprenden los restos de aserríos como cortezas, astillas y aserrín. Mientras tanto, los residuos forestales son aquellos restos de plantaciones tales como ramas, cortezas y troncos. Los residuos agrícolas son los que se generan en las cosechas de los cultivos como: podas, tallos, cáscaras, raquis, etc. (MEER, 2014). Estos tres tipos de residuos forman parte de la biomasa lignocelulósica, cuyos principales componentes son: lignina (10-25%), celulosa (40-80%) y hemicelulosa (15-30%), las cuales varían por las características específicas de cada materia prima (Faba et al., 2013; Singh et al., 2017). Con respecto a los residuos pecuarios y municipales, estos corresponden a los residuos orgánicos de ciudad, excretas y purines (Bioenarea, 2013; Fabio et al., 2017). Por último, se encuentran los residuos agroindustriales que se generan cuando las materias primas agrícolas y ganaderas son utilizadas en procesos industriales por ejemplo: cáscaras, pulpas de frutas, bagazos, residuos de carne, lácteos, grasas y aceites vegetales y animales, entre otras (MEER, 2014; OLADE, 2017).

Mientras tanto, los cultivos energéticos son destinados principalmente para la obtención de bioenergía en forma de combustible sólido, líquido o gaseoso (Ambientum.com, 2015; Sims & Bassam, 2004). Dentro de estos cultivos se encuentran los oleaginosos (colza, soja, palma aceitera, higuera, piñón, etc.), azucareros (sorgo dulce, remolacha azucarera, caña de azúcar, etc.) (Bioenarea, 2013; Sims & Bassam, 2004) y acuosa, los cuales hacen referencia a las algas. Esta última se desarrolla en ambientes controlados mediante fotobiorreactores en áreas menos extensas de terrenos (IICA, 2010). Tanto para la biomasa residual como para los cultivos energéticos, las composiciones físicas y químicas difieren entre sí, por lo que condiciona directamente las tecnologías de conversión y cada una de las etapas logísticas (Prando, 2015).

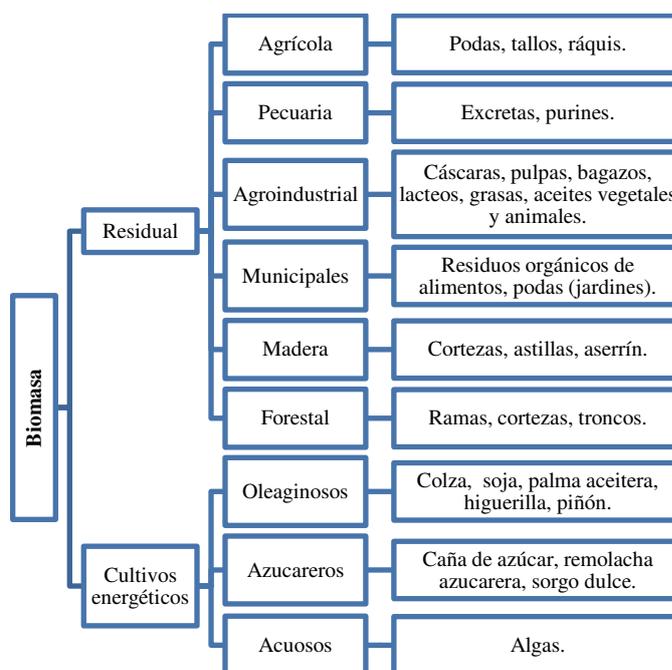


Figura 1. Clasificación de biomasa según su origen
Adaptado de (Sims & Bassam, 2004)

Adicionalmente, la biomasa se la puede clasificar en generaciones, es decir primera, segunda y tercera generación. La biomasa de primera generación hace referencia a los cultivos destinados a consumo humano tales como: el maíz, banano, soja, palma aceitera, arroz, entre otros; que por su misma naturaleza enfrentan diversos desafíos sociales, económicos y ambientales, ya que están totalmente relacionados con la seguridad alimentaria; además de causar problemas en el uso del suelo y generar un incremento de precios. La biomasa de segunda generación permite mayores posibilidades de sostenibilidad en comparación a la clasificación anterior, ya que corresponde a productos que no están relacionados directamente con el consumo humano, tales como: residuos domésticos e industriales, residuos sólidos municipales, residuos agrícolas, forestales y animales, así como también los cultivos energéticos como el piñón de tempe y la higuera, que representan riesgos a la salud de los humanos. La dificultad con la segunda clasificación se relaciona al mínimo desarrollo de rutas de conversión para obtener los bioproductos finales. Finalmente, la biomasa de tercera generación corresponde al aprovechamiento de algas y micro algas ya que son totalmente renovables y su potencial energético es mayor en comparación a las biomásas detalladas anteriormente; sin embargo, el desarrollo de sus procesos es incipiente y se requieren investigaciones de mayor avance científico (Pazmiño-Sánchez et al., 2017).

Por otro lado, la CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) clasifica a la biomasa como moderna y tradicional. La biomasa tradicional es la destinada a calefacción y preparación de alimentos en los hogares y la moderna está destinada a generación de electricidad, vapor, producción de biocombustibles y materiales biobasados (CEPAL, 2006). A su vez, clasifica el consumo de la biomasa en uso sostenible y no sostenible, dentro de la sostenible se incluyen residuos animales, vegetales, urbanos y leña

recolectada de ramas secas y tala de árboles que serán replantados. La biomasa no sostenible está compuesta básicamente por la leña que proviene de la deforestación (CEPAL, 2006).

La biomasa contiene elementos químicos similares a los recursos no renovables como el petróleo, gas y carbón. De modo que, de esta materia prima se puede obtener una variedad de bioproductos energéticos y no energéticos, los cuales pueden sustituir parcial o completamente a los productos derivados de los recursos fósiles. Algunos de los bioproductos que se obtienen en la actualidad a partir de biomasa son: biocombustibles, biolubricantes, biopolímeros, pinturas, adhesivos, espesantes, estabilizadores, telas y una gama de celulósicos (Sims & Bassam, 2004). Por otro lado, a diferencia de los combustibles fósiles, la combustión de la biomasa no contribuye al aumento de gases de efecto invernadero (GEI). Esto se debe a que el carbono que se libera es absorbido continuamente por la vegetación durante su crecimiento (MEER, 2014), es decir la emisión de CO₂ es neutra (Gerssen-Gondelach et al., 2014; OLADE, 2017).

3. POTENCIAL DE BIOMASA EN AMÉRICA DEL SUR

A nivel mundial están disponibles 13 000 MMt de biomasa anual, que se utilizan para alimentación animal, humana y energía, representando el 60%, 15% y 25% respectivamente (CEPAL, 2015a). La demanda creciente de biomasa ha generado impactos en la producción agrícola, debido a que existe el cuestionamiento de usar el suelo para la siembra de cultivos energéticos poniendo en riesgo la seguridad alimentaria de cada país (Sims & Bassam, 2004). A pesar de aquello, esto representa una oportunidad para países de economías emergentes basadas en la agricultura, pecuaria y agroindustria como es el caso de ALC (CEPAL, 2015a), ya que por la diversidad de biomasa que tiene la región, representa oportunidades estratégicas para el desarrollo regional y local, además de permitir la diversificación de sus matrices productivas y energéticas (FAO, 2013).

En el año 2010, se generaron 5,1 toneladas per cápita de biomasa en toda ALC, en la cual se incluyeron cultivos primarios, residuos agrícolas, agropecuarios y madera (Schandl et al., 2016). Se estima que para el año 2050, el potencial energético de biomasa producida por ALC representará entre el 17 y 26% de la oferta mundial de energía, convirtiéndose en el principal productor de biomasa a nivel mundial (Razo et al., 2007). Con lo que respecta a América del Sur, esta ha venido desarrollando planes energéticos en los que se incluye el uso más eficiente de las fuentes renovables como la producción de biocombustibles (OLADE, 2016). Como resultado de esta implementación, las emisiones de CO₂ en el año 2019 disminuyeron el 0,7% en comparación con el año anterior (BP, 2020).

3.1. Biomasa disponible en países de América del Sur

Argentina (ARG)

Es un país que dispone de recursos energéticos importantes, tanto renovables como no renovables (FAO, 1995). En los

últimos años la actividad económica de este país ha estado inmersa en la explotación de minerales metálicos e industriales, lo que ha afectado directamente a la estabilidad de la biomasa (PNUMA, 2013). Dentro del plan nacional “Argentina innovadora 2020”, uno de los principales objetivos es desarrollar diversos productos industriales como biopolímeros, componentes químicos y bioenergía a partir de materias primas como la soja, maíz y algodón (CEPAL, 2015a). En la cosecha de los años 2010-2011, se produjo 100,81 MMt de granos (soja, maíz, trigo, sorgo, girasol). De la soja y girasol se obtuvieron 8,22 MMt de aceites vegetales (FAO, 2013), por lo que Argentina en el año 2011 se convirtió en el principal exportador de biodiesel a nivel mundial, siendo uno de los destinos la Unión Europea (Roitman et al., 2011).

Con lo que respecta a biomasa para fines energéticos, este país ofertó 804 kTEP (kilo toneladas equivalentes de petróleo) de bagazo de caña de azúcar, 913 kTEP de leña, 1 673 kTEP de aceites vegetales y 425 kTEP de alcoholes vegetales en el año 2015 (Ministerio de energía y minería, 2016). Adicionalmente, es un país con un alto potencial en biomasa lignocelulósica, el cual produce aproximadamente 3,54 MMt/año de residuos forestales (podas frutales, olivo, aserraderos); 0,40 MMt/año de residuos de molienda y 3,50 MMt/año de residuos agrícolas (arroz, caña, maní, algodón, olivo) (Roitman et al., 2011). Se estima que existen alrededor de 143 MMt/año de biomasa leñosa fácilmente accesible, proveniente de bosques nativos e implantados en el país (FAO, 2009). Por último, en el año 2015 se generó 1,57 millones de m³ de residuos de madera (FAO, 2017).

Bolivia (BOL)

En este país la información con respecto a biomasa fue escasa, sin embargo Bolivia por su ubicación geográfica y los recursos energéticos con los que cuenta (entre ellos la biomasa), es un país que está encaminado a convertirse en uno de los principales ejes de suministro energético de América del Sur (FAO, 1995). En el año 2014, se obtuvo 7 485,04 kBEP (kilo barriles equivalentes al petróleo) de biomasa de bagazo de caña de azúcar, leña y residuo animal, aportando el 4,54% de la energía primaria total (Sánchez, 2015). Además, en el año 2015 se produjeron 402 000 m³ de residuos de madera (FAO, 2017).

Brasil (BRA)

Es el principal exportador de bioetanol en el mundo, gracias a que posee un gran potencial territorial y clima favorable (CEPAL, 2004; PNUMA, 2013). Cuenta con una alta producción de biomasa que es procesada dentro de su territorio, dándole un valor agregado. La utilización de biomasa sostenible para fines energéticos en el año 2012 representó el 25% del consumo final de energía (CEPAL, 2016) y se estima que para el año 2020 el uso de la biomasa represente el 32% de la matriz energética brasileña (FAO, 2013). Mientras tanto, en el año 2015 se generó 79,09 MMt de leña, 19,15 MMt de melaza de caña de azúcar, 162,59 MMt de bagazo de caña de azúcar, y 17,19 millones de m³ de residuos de madera (Black et al., 2016; CEPAL, 2015b; FAO, 2017; MME, 2015, 2016).

Chile (CHI)

Es el principal país exportador de minerales metálicos e industriales como el cobre, a pesar de aquellas exportaciones de biomasa han ido en aumento desde 1980 (PNUMA, 2013). Chile, cuenta con un alto potencial en biomasa forestal debido a sus extensas plantaciones de pino y eucalipto (Pontt, 2008). Dispone de 5,60 millones de ha (hectáreas) de bosques nativos productivos y 2,90 millones ha de plantaciones forestales, dando un total de 8,35 millones de ha de plantaciones comercialmente explotables (Arteaga-Pérez et al., 2015). De estas plantaciones se obtiene una biomasa forestal de 21,60 millones de ts/año (tonelada seca por año), generando un promedio de 4 MMt/año de leña (Marcos, 2012; Rios et al., 2013). Además, Chile dispone de aproximadamente 900 MMt/año de biomasa para producir biogás, de los cuales comprenden 551,57 MMt/año de materia orgánica proveniente de las plantas de sacrificio de animales (avícola, vacuno, porcino) (D. M. Paneque, 2011). Por otra parte se producen 7,97 MMt/año de residuos agrícolas, en los que sobresalen residuos de cultivos de remolacha con 2,50 MMt/año, trigo con 1,80 MMt/año, maíz con 1,50 MMt/año y papa con 1,10 MMt/año (M. Paneque et al., 2011). A su vez, en el año 2015 se produjeron 1,92 millones de m³ de residuos de madera (FAO, 2017).

Colombia (COL)

En el año 2001, Colombia marcó su entrada a la nueva era de la bioenergía. En la Tabla 1 se muestra el potencial de biomasa de este país. Los sectores con mayor producción de biomasa en Colombia son el azucarero y palmero, que han incursionado en la cogeneración eléctrica. El potencial agrícola de Colombia es de 22 millones de ha (FAO, 2011a). En el año 2012 las destilerías utilizaron cerca de 0,37 MMt de azúcar crudo para producir bioetanol. Anualmente los ingenios azucareros producen 6 MMt de bagazo de caña, provenientes de los 23 MMt de caña de azúcar.

Tabla 1. Potencial de biomasa en Colombia

Sector de biomasa residual	Producto	Tipo de residuo	Producción (MMt/año)
Agrícola	Arroz	Tamo y cascarilla	6,28
	Banano	Raquis, vástago y rechazo	11,55
	Café	Pulpa, cisco y tallo	15,53
	Caña panelera	Bagazo y hojas de cogollo	9,51
	Maíz	Rastrojo, tusa y capacho	1,94
	Palma africana	Cuesco, fibra y raquis	1,66
	Plátano	Raquis, vástago y rechazo	20,41
	Caña de azúcar	Hojas, cogollo y bagazo	15,53
Pecuario	Avícola	Estiércol	3,45
	Bobino	Estiércol	99,17
	Porcino	Estiércol	2,80
Sólidos orgánicos urbanos	Centros de acopio y plazas de mercado	-	0,12
	Urbanos de poda	-	0,04

Fuente: Adaptado de (Escalante et al., 2010)

En el mismo año se tuvo una capacidad de 0,50 MMt de aceite de palma africana para la producción de biodiesel (FAO, 2013). Con lo que respecta a la biomasa agrícola, a nivel

nacional se generan 82,42 MMt/año de residuos. La biomasa residual que produce el sector pecuario y urbano es de 105,42 MMt/año y 0,17 MMt/año respectivamente (Escalante et al., 2010). En el año 2015, este país generó 361.000 m³ de residuos de madera (FAO, 2017).

Ecuador (ECU)

Es un país con tradición agrícola y ganadera que genera gran cantidad de biomasa que puede ser aprovechada energéticamente (FAO, 2013). Esto se ve representado en la producción de energía primaria del año 2015, en el que se utilizaron 1,47 MMt de bagazo de caña y 0,72 MMt de leña para generación eléctrica (MCSE, 2016). En la Tabla 2, se indica el potencial biomásico que tiene Ecuador, el cual proviene de los sectores agrícolas, pecuarios, forestales y municipales. Con lo que respecta a biomasa residual del sector agrícola se generan aproximadamente 18,23 MMt/año de residuos. En el sector pecuario se producen 1,44 MMt/año de biomasa residual, en el sector forestal se originan 0,22 MMt/año y el sector urbano genera 1,70 MMt/año de desechos municipales (CEPAL, 2004; MEER, 2014). Se estima que a partir de residuos agrícolas como hojas de maíz, cascarilla de arroz, fruto de palma y cáscara de frutas se podría generar el 50% de la demanda de energía eléctrica nacional (CEPAL, 2004). Por otro lado, en el año 2015 se produjeron 158 000 m³ de residuos de madera (FAO, 2017).

Tabla 2. Potencial biomásico en Ecuador

Sector de biomasa residual	Producto	Tipo de residuo	Producción (MMt/año)
Agrícola	Arroz	Pajilla y cáscara	2,11
	Banano	Raquis, seudotallo, hojas y rechazo	4,93
	Cacao	Poda, mazorca, cáscara de mazorca, raquis y rechazo de producto	2,02
	Café	Poda, renovación de plantas, cáscara y pulpa	0,10
	Caña de azúcar	Tallos, hojas, bagazo	0,79
	Maíz duro	Hojas, tallo y mazorcas	0,43
	Palma africana	Hojas, raquis, fibras, cascarilla de nuez	6,87
	Piña	Hojas, corona, cáscara y corazón	0,12
	Palmito	Hojas, despuntes, capas exteriores, rechazo	0,48
	Plátano	Hojas, seudotallo, raquis, rechazo	0,37
Pecuario	Avícola	Excretas	0,51
	Porcino	Excretas	0,06
	Vacuno (carne)	Excretas	0,01
	Vacuno (leche)	Excretas	0,86
Forestal	Forestal	Ramas, corteza, raíces, aserrín y astillas	0,22
Municipales	Municipales	-	1,70

Fuente: Adaptado de (CEPAL, 2004; MEER, 2014)

Paraguay (PAR)

La matriz energética de este país tiene un elevado componente de biomasa, ésta representó el 31,60% de la producción de energía primaria del año 2015 (MOPC, 2016). En este mismo año se ofertaron 1 610,83 kTEP de leña, 700,30 kTEP de productos de caña y 584,14 kTEP de residuos agroforestales

(cáscara de algodón, bagazo de caña, carozo de coco) (MOPC, 2016). En la Tabla 3, se indica la disponibilidad de biomasa de los principales cultivos de este país.

Tabla 3. Disponibilidad de biomasa

Cultivo	Residuo (MMt/año)
Soja	7,46
Algodón	0,53
Girasol	0,64
Caña	0,70
Maní	0,07
Sésamo	0,06

Fuente: Adaptado de (Forster-Carneiro et al., 2013; Hiloidhari et al., 2014; Lovera, 2011)

Perú (PER)

La agenda energética 2010-2040 de este país consolida a largo plazo la introducción a energías renovables (FAO, 2011b). Perú forma parte de los países que tienen una excesiva dependencia a la leña y falta de acceso a energías más eficientes y de mayor calidad (CEPAL, 2003, 2004). Solo en el año 2012 se ofertaron 83 431 TJ (Tera Joule) de leña en comparación de 19 430 TJ de bagazo de caña (Carrasco, 2015). A nivel nacional existen 272 MMt de biomasa, de las cuales 256 MMt corresponden a leña y 16 MMt a residuos derivados de actividades agrícolas, agroindustriales y madereras (FAO, 2011b).

Actualmente, existen 50 201 ha de palma africana y 20 000 ha de caña de azúcar que son destinadas para la producción de biocombustibles. De la utilización de caña de azúcar para bioetanol se dispone de 8,48 MMt de bagazo de caña (FAO, 2011b). Por otro lado, se calculó que para el año 2015 los residuos agrícolas de cultivos como la caña de azúcar, maíz amarillo duro, algodón, arroz y sorgo dulce aportaron 133 455 TJ (FAO, 2011b).

Uruguay (URU)

En el año 2015, se ofertaron 0,27 MMt de residuos de caña de azúcar, sorgo dulce, soja, girasol, canola y sebo del sector agropecuario para la producción de biocombustibles (MIEM, 2015). Con lo que respecta a la biomasa residual agrícola se obtienen cada año aproximadamente 0,20 MMt de cáscara de arroz, 0,26 MMt de paja de trigo y 0,04 MMt de cáscara de girasol. Por otro lado, en el año 2015 se obtuvieron 2,16 MMt de leña (MIEM, 2015), 1,66 MMt de residuos forestales provenientes de poda y cosecha (DNETN, 2006) y 4 000 m³ de residuos de madera (FAO, 2017).

Venezuela (VEN)

La biomasa utilizada en este país es casi marginal, debido principalmente a que es un país autoabastecido y exportador de hidrocarburos (CEPAL, 2003, 2004). A pesar de ello, desde el año 1960 comienza el desarrollo de centrales azucareras en este país (Dominguez et al., 2010). Según la Confederación de Asociaciones de Productores Agropecuarios, se generan a nivel nacional 0,03 MMt/año de residuos de café, 2,85 MMt/año de residuos de caña de azúcar, 0,28 MMt/año de residuos de arroz, 0,53 MMt/año de residuos de maíz (paja y

tallos) y 0,17 MMt/año de residuos de sorgo (FEDEAGRO, 2016). Adicionalmente, en el año 2015 se produjeron 123 000 m³ de residuos de madera (FAO, 2017). Se estima que la biomasa existente en Venezuela pueda proporcionar 740 kBEP (Moreno, 2013).

4. BIOPLÁSTICOS BIOBASADOS BIODEGRADABLES

Los bioplásticos son la bioindustria de más rápido crecimiento a nivel global, atrayendo la principal atención de gobiernos e inversionistas (Lee, 2016). En el año 2016, a nivel mundial se produjeron 4,20 MMt de bioplásticos, de los cuales el 5,90% fueron fabricados en América del Sur (European Bioplastics, 2017a). Para el año 2018 se estima que Asia, América del Sur y Europa sean los continentes con mayor capacidad de producción de bioplásticos con el 75,80%, 12,20% y 7,60% respectivamente (Lee, 2016).

Las materias primas utilizadas para la producción de bioplásticos provienen principalmente de la biomasa residual del sector agrícola, como los residuos ricos en carbohidratos, azúcares y biomasa lignocelulósica (European Bioplastics, 2017b). En este sentido, en el año 2019 se utilizaron 0,79 millones de ha, lo que equivale al 0,01% de la superficie agrícola del mundo y se estima que para el año 2024 se necesite 1 millón de ha para obtener estas materias primas, representando el 0,021% de la superficie agrícola mundial (European Bioplastics, 2019).

Los BBB corresponden a los basados en almidón, proteína, celulosa, ácido poliláctico y producidos por microorganismos como se indica en la Figura 2 (European Bioplastics, 2016). En el año 2019, los BBB representaron el 55,5% de la producción mundial de bioplásticos y se prevé que su capacidad aumente a 2,42 MMt para el año 2024 (European Bioplastics, 2019). Estos bioplásticos actualmente se utilizan en las industrias textiles, empaques rígidos y flexibles, dispositivos electrónicos y en la agricultura (European Bioplastics, 2019). Esto se debe a que se pueden procesar utilizando las mismas tecnologías (extracción, soplado o inyección) de los termoplásticos convencionales (Valero-Valdivieso et al., 2013), sin embargo la fabricación de estos presenta algunos problemas con respecto con las materias primas, consumo de energía y costos operacionales (Ramesh et al., 2017). Los BBB como el ácido poliláctico (PLA), polihidroxialcanoatos (PHA's) o los basados en almidón ofrecen propiedades mejoradas como la flexibilidad, durabilidad, imprimibilidad, transparencia, resistencia al calor y brillo (European Bioplastics, 2017b).

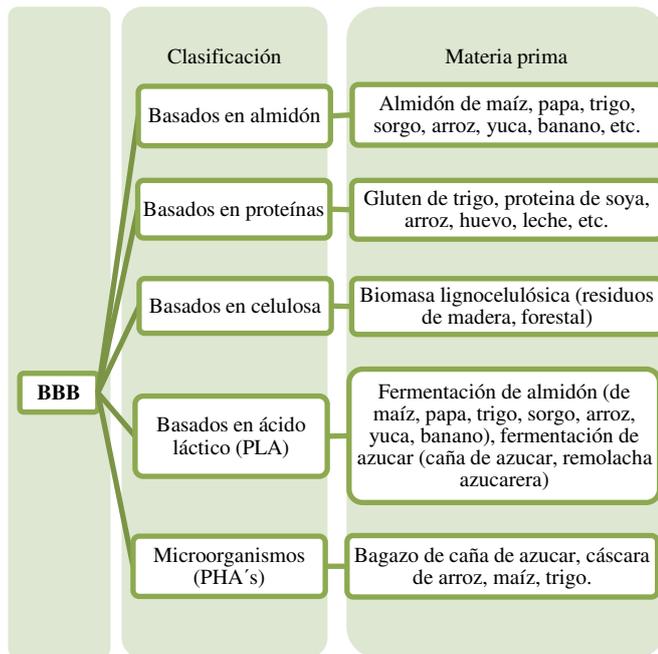


Figura 2. Biomasa para producción de bioplásticos, biobasados, biodegradables (BBB)

Adaptado de (European Bioplastics, 2016; Perez et al., 2015; Saratale & Oh, 2015; Soroudi & Jakubowicz, 2013; Wilde & Deconinck, 2013)

4.1. Bioplásticos basados en almidón

El almidón es un polisacárido que se puede obtener a partir de frutos y/o biomásas agrícolas como el maíz, papa, trigo, sorgo, yuca, banano, arroz, entre otras (Wilde & Deconinck, 2013). Para fabricar 1 tonelada (t) de este bioplástico se requieren 0,25 t de plastificante y 0,75 t de almidón que puede provenir de 1,07 t de residuos de maíz o 1,63 t de residuos de trigo (IfBB, 2020). El uso principal de este bioplástico es para fabricar envases y embalajes (Valero-Valdivieso et al., 2013). Adicionalmente, el almidón es un polímero con alto potencial para síntesis de materiales biodegradables, sin embargo, tiene limitaciones como baja resistencia a la humedad y ruptura, baja elongación, poca flexibilidad y reducida procesabilidad por su alta viscosidad. Por lo que, con el fin de minimizar estas limitaciones algunos tipos de almidones han sido modificados químicamente o en su proceso de extrusión se utilizan plastificantes para obtener bioplásticos termoestables como es el caso del TPS (almidón termoplástico, por sus siglas en inglés) (Enriquez et al., 2012; Wilde & Deconinck, 2013).

En la actualidad, estos bioplásticos son mezclados con polímeros (ésteres de celulosa, poliésteres y ácidos) basados en la industria petroquímica, con el fin de mejorar su proceso y biodegradabilidad para obtener láminas y películas de alta calidad usadas en embalaje (Valero-Valdivieso et al., 2013). El procesamiento de películas biodegradables y compostables se realiza principalmente mediante tres formas: moldeo, prensado y extrusión (Enriquez et al., 2012) y su producción requiere de un 68% menos de energía en comparación con un plástico sintético (Álvarez-Chávez et al., 2012).

4.2. Bioplásticos basados en proteínas

Las proteínas se producen anualmente de diversas fuentes, en las que se incluyen: gluten de trigo, proteína de soya, huevo,

leche, colágeno, gelatina y arroz (Martínez et al., 2013; Perez et al., 2015). La estructura de las proteínas consiste en redes tridimensionales estables que no permiten que el material tenga suficiente plasticidad, pero con la ayuda de un plastificante (agua, glicerol, propileno glicol, etc.) y un proceso termoplástico o termo-mecánico es posible que estas cadenas se desplieguen y se entrelacen, con el objetivo de que su textura cambie y de esta manera se pueda obtener un plástico transparente, biodegradable y compostable (Perez et al., 2015; Zárate-Ramírez et al., 2014).

Las proteínas derivadas de las plantas (trigo, soya y arveja) son biodegradables, por ejemplo el gluten de trigo se demora 50 días en biodegradarse cuando se encuentra bajo tierra (Zárate-Ramírez et al., 2014). De este tipo de proteínas se obtiene películas que mediante procesos físico-químicos y de colada pueden ser utilizadas para envasado de alimentos por sus características de opacidad y resistencia a la humedad (Zárate-Ramírez et al., 2014). El mercado mundial de bioplásticos basados en proteínas vegetales, está dominado por la proteína de soya debido a su precio y alta calidad, sin embargo también se puede utilizar la proteína de arveja que incluso es más económica que la soya (Perez et al., 2015). Como una alternativa novedosa en la obtención de bioplásticos se encuentra la factibilidad de producirlos a partir de la albúmina de clara de huevo, que si se la compara con el gluten se pueden obtener bioplásticos altamente transparentes con propiedades adecuadas para la fabricación de envases de alimentos biodegradables (Gonzalez-Gutierrez et al., 2010; Jerez et al., 2007).

4.3. Bioplásticos basados en celulosa

La celulosa es el principal componente de las paredes celulares de las plantas, por lo cual su disponibilidad es muy alta ya que se lo puede obtener de la biomasa lignocelulósica (Wilde & Deconinck, 2013). La celulosa es un polímero fibroso, resistente e insoluble en agua por sus complejos enlaces intramoleculares. Los materiales que se pueden obtener a partir de celulosa han sido ampliamente estudiados por la comunidad científica en los últimos 16 años, sin embargo la aplicación de estos materiales en el campo de ciencias ambientales y energéticas sigue siendo muy limitada con sólo el 4% y 3% respectivamente (Mohamed et al., 2017). Las fibras celulósicas se pueden destacar como materia prima renovable debido a sus propiedades físico-químicas, físico-mecánicas y biodegradabilidad (Santos et al., 2015).

Según la fuente de celulosa, se pueden obtener tres tipos diferentes de bioplásticos: de fibras naturales, de celulosa regenerada y de celulosa modificada (Wilde & Deconinck, 2013). El principal bioplástico es el celofán, que se lo obtiene a partir de celulosa regenerada, este tiene propiedades como: estabilidad a las altas temperaturas, alta resistencia, biodegradable en suelo, agua y en condiciones marinas. Por otro lado, el acetato de celulosa se lo obtiene de celulosa modificada químicamente, sin embargo este tipo de bioplástico no cumple con las normas de compostabilidad (Wilde & Deconinck, 2013). Adicionalmente, para obtener 1 t de bioplástico basado en celulosa regenerada se necesitan 2,50 t de madera, que se pueden obtener de residuos forestales y

madereros, siendo mezclada con 2,38 t de NaOH, en conjunto con 0,14 t de CS₂ y 1,15 t de H₂SO₄ (IfBB, 2020).

4.4. Bioplásticos basados en ácido láctico

El PLA se obtiene por la polimerización de ácido láctico derivado de la fermentación microbiana del almidón o azúcar (Álvarez-Chávez et al., 2012; Soroudi & Jakubowicz, 2013; Valero-Valdivieso et al., 2013). Para obtener 1 t de PLA a partir de almidón se requieren 3,54 t de residuos de trigo o 2,39 t de residuos de maíz. Y para obtener PLA de azúcares fermentables, son necesarias 11,31 t de bagazo de caña de azúcar o 9,19 t de residuos de remolacha azucarera (IfBB, 2020).

El ácido láctico es una materia prima económicamente viable y ambientalmente amigable debido principalmente a su biodegradabilidad, compostabilidad y reciclabilidad (Spiridon

et al., 2015; Valero-Valdivieso et al., 2013). Se emplea para producir artículos de uso común y de embalaje como bandejas, botellas o películas para las industrias de envasado de alimentos por tener buenas propiedades de barrera frente a olores y sabores. Se puede fabricar mediante técnicas de moldeo por inyección, soplado, termo formado y extrusión (Soroudi & Jakubowicz, 2013; Spiridon et al., 2015; Valero-Valdivieso et al., 2013). El PLA es un bioplástico muy exitoso y con un gran mercado potencial, por lo que varias empresas como DOW Chemical está planeando elevar su capacidad de producción de 0,14 a 0,45 MMT de PLA/año (Wang et al., 2016). Por otro lado, al producir bioplásticos a partir de ácido láctico proveniente de caña de azúcar se evitarían de 10 a 14 t de CO₂ equivalente/ha, lo que indica una aportación significativa en la reducción de GEI (Gerssen-Gondelach et al., 2014).

Tabla 4. Resumen de disponibilidad de biomasa residual forestal, agrícola y maderera en América del Sur (MMt)

Tipo de biomasa residual	ARG	BOL	BRA	CHI	COL	ECU	PAR	PER	URU	VEN	Total América del Sur
Forestal °	146,54	-	79,09	25,60	-	0,22	-	256,00	3,81	-	511,26
Agrícola	3,50	-	181,74	7,97	82,43	18,23	0,70	24,48	0,49	3,69	323,23
• Maíz	-	-	-	1,50	1,94	0,43	-	-	-	0,53	4,40
• Caña de azúcar	-	-	162,59	-	15,54	0,79	0,70	8,48	-	2,85	190,95
• Trigo	-	-	-	1,80	-	-	-	-	0,26	-	2,06
Residuos de madera*	1,57	0,40	17,19	1,92	0,36	0,16	-	-	0,004	0,12	21,73

* millones de m³, ° incluye leña

4.5. Bioplásticos producidos por microorganismos

Los PHA's son producidos por fermentación de materias primas renovables como: residuos lignocelulósicos (bagazo de caña, cáscara de arroz, cáscara de banano, etc.), sacarosa, aceites vegetales, melazas, residuos de industria láctea, y ácidos grasos (triglicéridos vegetales y animales), entre otras (IfBB, 2020; Saratale & Oh, 2015). Tienen un potencial como termoplástico altamente biodegradable dado que los microorganismos existentes en la naturaleza son capaces de degradarlos en su totalidad; a pesar de estas ventajas su uso está limitado debido a su alto costo de producción (Ahmad et al., 2015).

Existen más de 150 tipos de PHA's, pero dentro del ámbito industrial se destaca el Polihidroxibutirato (PHB) debido que utiliza fuentes sencillas de carbono como fructosa, glucosa, xilosa y sucrosa (Saratale & Oh, 2015). Para obtener 1 t de PHB a partir de azúcares fermentables, se requieren 22 t de bagazo de caña de azúcar o 17,87 t de residuos remolacha azucarera provenientes de residuos agroindustriales. Si se produce la misma cantidad de PHB a partir de almidón se requerirían 4,63 t de residuos de maíz o 7,04 t de residuos de trigo provenientes de residuos agrícolas y/o agroindustriales (IfBB, 2020). Los principales usos de este bioplástico son películas de empaquetado en bolsas, contenedores, productos higiénicos, contenedores de cosméticos, envases de shampoo, etc. (Ahmad et al., 2015; Valero-Valdivieso et al., 2013). Este bioplástico se puede obtener por procesos de inyección y extracción, además este puede sustituir al polipropileno,

poliestireno y al polietileno de alta densidad (Naranjo et al., 2014).

5. DISCUSIÓN GENERAL

Debido al potencial agrícola y forestal de América del Sur, como se indica en la Tabla 4, esta región genera 511,26 MMT de biomasa forestal y 21,73 millones de m³ de residuos de madera, que por su composición química estas son materias primas ricas en celulosa (40-80%) (Singh et al., 2017). Este contenido brinda una gran oportunidad para producir bioplásticos basados en celulosa regenerada (Wilde & Deconinck, 2013). Además, la celulosa se puede descomponer en azúcares como la glucosa para fabricar PHB (Saratale & Oh, 2015). Por otro lado, en América del Sur se generan 323,23 MMT de biomasa residual agrícola. Esta se compone principalmente de residuos lignocelulósicos, almidón y azúcares, de las cuales se puede producir PHB, bioplásticos basados en almidón y PLA (Saratale & Oh, 2015; Soroudi & Jakubowicz, 2013; Wilde & Deconinck, 2013).

Para el año 2021, la Organización de Bioplásticos Europeos, estima que el PHB, PLA, bioplásticos basados en almidón y celulosa representarán el 4,10%, 5,30%, 7,10% y 0,50% de la producción mundial respectivamente (European Bioplastics, 2017c).

Considerando la disponibilidad de biomasa en América del Sur (Tabla 4) y los requerimientos de biomasa para producir 1 t de cada BBB que se detallan en la Tabla 5, los países con potencial para producir bioplástico basado en celulosa

regenerada a partir de biomasa forestal son: Argentina, Brasil, Chile, Perú y Uruguay, los cuales producirían un total de 204,42 MMt/año de este bioplástico.

Tabla 5. Requerimiento de biomasa para obtener 1 tonelada de cada tipo de BBB

Tipo de BBB	Tipo de biomasa	Requerimiento de biomasa*
Basados en almidón	Residuos de maíz	1,07
Basados en celulosa regenerada	Forestal	2,50
PHB	Residuos caña de azúcar	21,99
PLA	Residuos de trigo	3,54

* En toneladas

Adaptado de: (IfBB, 2020)

Por otro lado, Chile, Colombia, Ecuador y Venezuela tienen el potencial de fabricar 1,40 MMt/año, 1,81 MMt/año, 0,41 MMt/año y 0,50 MMt/año de bioplástico basado en almidón respectivamente, teniendo en cuenta el requerimiento de biomasa de residuos de maíz. Con respecto al PHB, considerando los valores disponibles de bagazo de caña y que se requieren 21,99 t de biomasa proveniente de dicho cultivo, se pueden producir 7,39 MMt/año, 0,71 MMt/año, 0,04 MMt/año, 0,03 MMt/año, 0,39 MMt/año y 0,13 MMt/año de PHB en Brasil, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú y Venezuela respectivamente. Además, a partir de los residuos disponibles de trigo se pueden producir 0,51 MMt/año y 0,07 MMt/año de PLA en Chile y Uruguay respectivamente, considerando los datos indicados en la Tabla 4.

En la Figura 3, se indica la capacidad de producción de BBB en América del Sur a partir de la disponibilidad de biomasa residual por país, en el cual se observa que Perú es el país con mayor potencial para producir bioplástico basado en celulosa regenerada debido a la dependencia y disponibilidad de biomasa forestal y residuos de madera. A su vez, se identifica que Chile puede obtener tres tipos de BBB, brindándole la oportunidad de diversificar su producción y convertirse en una potencia de América del Sur por la variedad y disponibilidad de biomasa que posee.

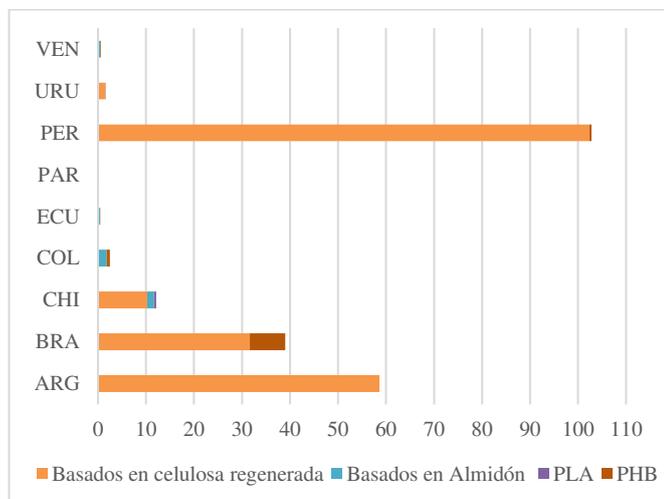


Figura 3. Distribución de la producción de BBB en América del Sur, en MMt

Con respecto a las emisiones de GEI al producir PLA y PHB a partir de maíz, se reducirían de 3 a 14 tCO₂ equivalente/ha y de 0 a 7 tCO₂ equivalente/ha respectivamente. Mientras que las emisiones de GEI se reducirían entre 10 a 14 tCO₂ equivalente/ha para el PLA y 3 a 14 tCO₂ equivalente/ha en la producción de PHB utilizando caña de azúcar como materia prima (Gerssen-Gondelach et al., 2014). Esto brinda a Brasil, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú y Venezuela la ventaja de distribuir sus residuos de bagazo de caña para producir PLA y PHB, aportando con la reducción de emisiones de GEI.

Además de los residuos agrícolas mencionados, es importante considerar que varios países de América del Sur son potencias mundiales en la exportación de granos, frutas y/o flores como es el caso de Ecuador. Este país es el principal exportador de banano a nivel mundial (Redagrícola, 2020). En el año 2019 se produjeron 6,58 MMt de banano, lo que a su vez generó 0,07 MMt de banano de rechazo (INEC, 2020), que en la mayoría de los casos son arrojados al aire libre, generando un problema ambiental (Moreira Carrión, 2013; Ramírez & Solórzano, 2012). Este residuo puede ser utilizado para producir bioplásticos como el PHB y PLA, debido a que la pulpa y la cáscara contienen almidón y azúcares respectivamente (Naranjo et al., 2014).

Considerando lo mencionado anteriormente, existe un gran potencial para que la industria del plástico de América del Sur desarrolle nuevas líneas de productos en relación a los BBB. Sin embargo, estas industrias deberán enfrentar desafíos en investigación y desarrollo de nuevos procesos (Iles & Martin, 2013). Para lo cual, será necesario generar vínculos con centros de investigación, universidades e institutos que permitan establecer estrategias de I+D+i (Investigación, Desarrollo e Innovación) necesarias para cumplir con las proyecciones de cada industria y reducir la contaminación que generan los plásticos sintéticos. Cabe recalcar que en América del Sur existen empresas que actualmente producen envases con PLA como es el caso de Vaiv (Chile) (Vaiv, 2015), Zeaplast (Chile) (ZeaPlast, 2012) y Grupo Phoenix (Colombia, Venezuela, Brasil, Uruguay y Ecuador) (Grupo Phoenix, 2014), las cuales aportan al cambio de la matriz productiva de la región y al fomento de plazas de trabajo en zonas rurales.

Por otro lado, si los gobiernos de cada país de América del Sur siguen intensificando la bioeconomía de los bioplásticos, traerán consigo varios beneficios como la menor dependencia de los recursos fósiles y desarrollo de varias industrias sostenibles (Lee, 2016). Para que esta transición no genere perturbaciones, es necesario establecer nuevas estrategias de producción en los que se utilicen una mínima cantidad de recursos como el agua, agroquímicos y fertilizantes. Esto a su vez debe brindar beneficios a la sociedad como seguridad alimentaria, energética y una distribución equitativa de los recursos (Sleenhoff et al., 2015). Así también el mercado de los BBB debe superar barreras relacionadas al uso de la tierra para producir cultivos con fines no alimentarios; el acceso restringido a los residuos biomásicos y sobre todo superar obstáculos mercantiles con sectores más establecidos en varios países como es el caso de los biocombustibles, los cuales disponen de un beneficio legal preferencial perjudicando el sector de los bioplásticos (Morone et al., 2015). Por todo lo

mencionado, resulta imperante desarrollar vínculos entre la economía circular, bioeconomía y los BBB para estimular la innovación y la comercialización de este tipo de productos biobasados (European Commission, 2017).

Finalmente, en América del Sur se deben buscar las formas necesarias para contrarrestar la desigualdad social, especialmente la que se genera en zonas rurales y que por cuestiones políticas o por carencia de planificación no ha sido mitigada (Akella et al., 2009). Por otra parte, varios investigadores (Akella et al., 2009; Bioenarea, 2013) señalan que estas zonas podrían tener un desarrollo sostenible mediante el fomento de la bioeconomía zonal.

6. CONCLUSIÓN

La presente investigación reveló que en América del Sur se puede producir 204,42 MMt de bioplástico basado en celulosa regenerada, 4,11 MMt de bioplástico basado en almidón, además 0,58 MMt de PLA y 8,68 MMt de PHB, debido a la disponibilidad de biomasa que tiene la región y considerando los requerimientos de biomasa para la producción de 1 t de los diferentes tipos BBB. Por otra parte, se pudo connotar que, si se aprovecha esta biomasa con fines energéticos y/o energéticos, esta región puede pasar de una economía dependiente de recursos fósiles a una economía basada en biomasa y dejar atrás la histórica designación de ser exportadora de materias primas.

Adicionalmente, la producción de bioplásticos basados en biomasa residual es una alternativa para contrarrestar la contaminación ambiental producida por los plásticos sintéticos, ya que se aprovecha de una manera eficiente y sostenible los residuos que se generan en la naturaleza y en las industrias. Por otro lado, cada país de América del Sur deberá evaluar y determinar las mejores condiciones de recolección, transporte, almacenamiento, transformación de la biomasa y entrega de los bioplásticos, debido principalmente a que estos factores son determinantes en la evaluación de los costos de inversión y operación de este tipo de bioindustrias. Con base en esto, es fundamental y se recomienda que las instituciones de educación superior enfoquen la I+D+i a estos desafíos, en donde se incluya la evaluación de las materias primas, rutas de procesamiento, aspectos logísticos, sociales, ambientales, políticos y legales en cada una de las etapas de la ingeniería conceptual, básica y detalle, con el fin de aportar en la diversificación de las matrices productivas y energéticas, además de contribuir al desarrollo regional respondiendo a los problemas globales como la equidad, desarrollo sostenible, garantía de suministro de energía, empleo y mitigación del cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Fomento al Talento Humano de Ecuador (IFTH) por el apoyo financiero otorgado para realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- Ahmad, M., Mohd, K., Arif, H., Noriznan, M., Salihon, J., Shirai, Y., & Ali, M. (2015). Case study for a palm biomass biorefinery utilizing renewable non-food sugars from oil palm frond for the production of poly (3-hydroxybutyrate) bioplastic. *Journal of Cleaner Production*, 87, 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.010>
- Akella, A. K., Saini, R. P., & Sharma, M. P. (2009). Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. *Renewable Energy*, 34(2), 390–396. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.002>
- Almeida, A. de, Ruiz, J. A., López, N. I., & Pettinari, M. J. (2004). Bioplásticos: una alternativa ecológica. *Química Viva*, 3, 1–24. <https://doi.org/10.1111/tpj.12777/1/24>
- Álvarez-Chávez, C. R., Edwards, S., Moure-Eraso, R., & Geiser, K. (2012). Sustainability of bio-based plastics: general comparative analysis and recommendations for improvement. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.003>
- Ambientum.com. (2015). *Energía - Cultivos energéticos*. Portal profesional del medio ambiente. http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/Cultivos_energeticos.asp
- Arteaga-Pérez, L. E., Vega, M., Rodríguez, L. C., Flores, M., Zaror, C. A., & Casas Ledón, Y. (2015). Life-Cycle Assessment of coal-biomass based electricity in Chile: Focus on using raw vs torrefied wood. *Energy for Sustainable Development*, 29, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.10.004>
- Berndes, G., Hoogwijk, M., & Van Den Broek, R. (2003). The contribution of biomass in the future global energy supply: A review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy*, 25(1), 1–28. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00185-X](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00185-X)
- Bioenarea. (2013). *Biorrefinerías una oportunidad de negocio para las zonas rurales y las industrias* (p. 38). Bioenarea. <https://docplayer.es/27400896-Biorrefinerias-una-opportunidad-de-negocio-para-las-zonas-rurales-y-las-industrias.html>
- Black, M. J., Sadhukhan, J., Day, K., Drage, G., & Murphy, R. J. (2016). Developing database criteria for the assessment of biomass supply chains for biorefinery development. *Chemical Engineering Research and Design*, 107, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.046>
- BP. (2020). *Statistical Review of World Energy* (Statistical Review of World Energy (ed.); 69a ed.). BP p.l.c. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
- Carrasco, S. (2015). *Balance de Energía Nacional, desde la perspectiva de supervisor*. https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/hidrocarburos/Publicaciones/BALANCE_DE_ENERGIA_EN_EL_PERU_2014.pdf
- CEPAL. (2003). *Sostenibilidad energética en América Latina y el Caribe: El aporte de las fuentes renovables*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2764/1/S2003717_es.pdf
- CEPAL. (2004). *Fuentes renovables de energía en América Latina y el Caribe* (pp. 1–159). Comisión Económica para América Latina y el Caribe - Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/9/14839/clc12132e.pdf>
- CEPAL. (2006). *Fuentes renovables de energía en América Latina y el Caribe, dos años después de la conferencia de Bonn*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. http://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/8/35988/Fuentes_deEnergiaRenovablesALClcw_100.pdf

- CEPAL. (2008). *Biocombustibles líquidos para transporte en América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3638/1/S2008449_es.pdf
- CEPAL. (2015a). Bioeconomía: nuevas oportunidades para la agricultura. En *Desarrollo Productivo* (p. 47). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38427/1/S1500414_es.pdf
- CEPAL. (2015b). *Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética del Brasil*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38863/1/S1500636_es.pdf
- CEPAL. (2016). *Monitoreando la eficiencia energética en América Latina*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40505/1/S1600876_es.pdf
- Digregorio, B. E. (2009). Innovations Biobased Performance Bioplastic: Mirel. *Chemistry & Biology*, 16(1), 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.chembiol.2009.01.001>
- DNETN. (2006). *Generación de energía eléctrica a partir de la biomasa en Uruguay*. (pp. 1–21). Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear. Ministerio de Industria, Energía y Minería. http://www.miem.gub.uy/sites/default/files/generacion_de_energia_elctrica_a_partir_de_la_biomasa_en_uruguay_la_dendroenergia_-_octubre_2006.pdf
- Dominguez, P., López, Y., & Vivas, F. (2010). Energía de la Biomasa en Venezuela. En *Energía de la biomasa* (p. 42). Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre. <https://es.slideshare.net/PedroDominguez2/energia-de-la-biomasa-en-venezuela#:~:text=GENERACIÓN ELÉCTRICA A TRAVÉS DE BIOMASA BIOMASA EN VENEZUELA LAS.de vapor utilizable dentro del>
- Enriquez, M., Velasco, R., & Ortiz, V. (2012). Composición y procesamiento de películas biodegradables basadas en almidón. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10(1), 182–192. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v10n1/v10n1a21.pdf>
- Escalante, H., Orduz, J., & Zapata, H. (2010). *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia*. Ministerio de Minas y Energía. <https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1058>
- European Bioplastics. (2016). *Environmental communication guide for bioplastics* (pp. 1–36). <https://doi.org/10.1177/019263659107553913>
- European Bioplastics. (2017a). Bioplastic market data 2016. En *Global production capacities of bioplastics 2016 - 2021*. <http://www.european-bioplastics.org/market/>
- European Bioplastics. (2017b). *Frequently Asked Questions* (pp. 1–26). <https://doi.org/10.1002/div.1789>
- European Bioplastics. (2017c). *Global production capacities of bioplastics 2021*. http://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/2016/Share-of-Material-Types-2021_en.jpg
- European Bioplastics. (2019). *Bioplastics Market Development*. <https://www.european-bioplastics.org/news/publications/#MarketData>
- European Commission. (2017). *Bio-based Products. Final Report*. <http://bio-based.eu/downloads/commission-expert-group-on-bio-based-products-final-report/>
- Faba, L., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2013). La biomasa como materia prima para la obtención de combustibles líquidos. *Ecotimes, revista ambientum*. <http://www.ambientum.com/revista/2013/junio/biomasa-como-materia-prima-para-obtencion-combustibles-liquidos.asp#>
- Fabio, G., Yujato, M., & Arenas, A. (2017). *Manual Estadística Energética 2017*. Organización Latinoamericana de Energía. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0380.pdf>
- FAO. (1995). *Reunion regional sobre generación de electricidad a partir de biomasa* (Departamento de Montes (ed.)). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/T2363s/T2363s00.htm>
- FAO. (2009). *Análisis del balance de energía derivada de biomasa en Argentina* (pp. 1–118). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/i0900s/i0900s.pdf>
- FAO. (2011a). *Estado del arte y novedades de la bioenergía en Colombia* (pp. 1–33). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://extranet.olade.org/sites/default/files/CIDA/Biocombustibles/FAO/Estado del Arte y Novedades de la Bioenergía en Colombia.pdf>
- FAO. (2011b). *Estado del arte y novedades de la bioenergía en el Perú* (pp. 1–37). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/as415s/as415s.pdf>
- FAO. (2013). *La Bioenergía en América Latina y El Caribe* (pp. 1–424). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00140.pdf>
- FAO. (2017). *Forest products 2015*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/a-i7304m.pdf>
- FEDEAGRO. (2016). *IPAF en línea* (pp. 1–58). Confederación de Asociaciones de Productores Agropecuarios. <http://www.fedeagro.org/fotos/file/IpafenLineaIIJul16.pdf>
- Forster-Carneiro, T., Berni, M. D., Dorileo, I. L., & Rostagno, M. A. (2013). Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 77, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.05.007>
- Gerssen-Gondelach, S. J., Saygin, D., Wicke, B., Patel, M. K., & Faaij, A. P. C. (2014). Competing uses of biomass: Assessment and comparison of the performance of bio-based heat, power, fuels and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40(April), 964–998. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.197>
- Gonzalez-Gutierrez, J., Partal, P., Garcia-Morales, M., & Gallegos, C. (2010). Development of highly-transparent protein/starch-based bioplastics. *Bioresource Technology*, 101(6), 2007–2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.025>
- Grupo Phoenix. (2014). *Esto es más que un vaso*. <http://www.grupophoenix.com/home/>
- Hiloidhari, M., Das, D., & Baruah, D. C. (2014). Bioenergy potential from crop residue biomass in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.025>
- IfBB. (2020). *Biopolymers facts and statistics 2019* (7a ed.). Institute for Bioplastics and Biocomposites. <https://www.ifbb-hannover.de/en/facts-and-statistics.html>
- IICA. (2010). *Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiesel*. Instituto de Cooperación para la Agricultura. http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Atlas_de_Bioenergía_y_Combustibles_2.pdf
- Iles, A., & Martin, A. N. (2013). Expanding bioplastics production: sustainable business innovation in the chemical industry. *Journal of Cleaner Production*, 45, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.008>
- INEC. (2020). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC)* (p. 43). Instituto Nacional de Estadística y Censos.

- https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2019/Presentacion_de_los_principales_resultados_ESPAC_2019.pdf
- Jerez, A., Partal, P., Martínez, I., Gallegos, C., & Guerrero, A. (2007). Egg white-based bioplastics developed by thermomechanical processing. *Journal of Food Engineering*, 82(4), 608–617. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.03.020>
- Lee, D. H. (2016). Bio-based economies in Asia: Economic analysis of development of bio-based industry in China, India, Japan, Korea, Malaysia and Taiwan. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(7), 4333–4346. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.048>
- Lovera, L. (2011). *Estado del arte y novedades de la bioenergía en el Paraguay*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/as414s/as414s.pdf>
- Marcos, S. (2012). *Análisis económico-energético de la biomasa lignocelulósica en Chile* [Pontificia Universidad Católica de Chile]. <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/1899>
- Martínez, I., Partal, P., García-morales, M., Guerrero, A., & Gallegos, C. (2013). Development of protein-based bioplastics with antimicrobial activity by thermo-mechanical processing. *Journal of Food Engineering*, 117, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.02.014>
- MCSE. (2016). *Balance energético nacional 2016 - año base 2015* (Vol. 1, pp. 1–211). Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- MEER. (2014). *Atlas bioenergético del Ecuador*. Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad - Ministerio de Electricidad y Energía Renovable - Instituto Nacional de Preinversión. <http://historico.energia.gob.ec/biblioteca/>
- MIEM. (2015). *Balance energético preliminar Uruguay*. Ministerio de Industria, Energía y Minería. http://www.miem.gub.uy/documents/15386/7730255/BALANCE_PRELIMINAR_2015.pdf
- Ministerio de energía y minería. (2016). *Balance Energético Nacional Argentina* (pp. 1–40). Centro de Información Energética. http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion_del_mercado/publicaciones/energia_en_gral/balances_2016/Documento_Metodologico_Balance_Energetico_Nacional_2015_fin_al.pdf
- MME. (2015). *Balanço energético nacional, Brazilian Energy Balance - año base 2014* (pp. 1–291). Ministerio de Minas e Energía - Empresa de Pesquisa Energética. https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf
- MME. (2016). *Balanço energético nacional, Brazilian Energy Balance - año base 2015* (pp. 1–296). Ministerio de Minas e Energía - Empresa de Pesquisa Energética. https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf
- Mohamed, M. A., Mutalib, M. A., Hir, Z. A. M., Zain, M. F. M., Mohamad, A. B., Minggu, L. J., Awang, N. A., & Salleh, W. N. W. (2017). An overview on cellulose-based material in tailoring bio-hybrid nanostructured photocatalysts for water treatment and renewable energy applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 103, 1232–1256. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.181>
- MOPC. (2016). *Balance energético nacional 2015* (pp. 1–45). Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. https://www.sme.gov.py/vmme/pdf/balance2015/Balance_Energetico_Nacional_2015.pdf
- Moreira Carrión, K. (2013). *Reutilización de residuos de la cáscara de Bananos (Musa Paradisiaca) y plátanos (Musa Sapientum) para la producción de alimentos destinados al consumo humano* [Universidad de Guayaquil]. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Moreno, J. (2013). Propuestas sobre desarrollo energético de Venezuela. En *Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. Libro interacadémico* (p. 174). http://prof.usb.ve/jaller/PPI_papers/LIBRO_INTERACADEMICO_2_013-COMPLETO4.pdf
- Morone, P., Elena, V., & Falcone, P. (2015). Assessing the potential of biowaste for bioplastics production through social network analysis. *Journal of Cleaner Production*, 90, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.069>
- Naranjo, J. M., Cardona, C. A., & Higuera, J. C. (2014). Use of residual banana for polyhydroxybutyrate (PHB) production: Case of study in an integrated biorefinery. *Waste Management*, 34(12), 2634–2640. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.007>
- OLADE. (2016). *Informe de estadísticas energéticas* (pp. 1–23). Organización Latinoamericana de Energía. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0367.pdf>
- OLADE. (2017). *Manual de Planificación Energética* (2da ed.). Organización Latinoamericana de Energía. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0378.pdf>
- ONU Medio Ambiente. (2018). *Plásticos de un solo uso: Una hora de ruta para la sostenibilidad*. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.unep.org/es/resources/informe/plasticos-de-un-solo-uso-una-hoja-de-ruta-para-la-sostenibilidad>
- Paneque, D. M. (2011). *Estado del arte y novedades de la bioenergía en Chile*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/as420s/as420s.pdf>
- Paneque, M., Román-Figueroa, C., Vázquez-Panizza, R., & Zulantay, M. (2011). *Bioenergía en Chile*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/Biocombustibles/FAO/BioenergíaChile.pdf>
- Pawelzik, P., Carus, M., Hotchkiss, J., Narayan, R., Selke, S., Wellisch, M., Weiss, M., Wicke, B., & Patel, M. K. (2013). Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials - Reviewing methodologies and deriving recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 211–228. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.006>
- Pazmiño-Sánchez, J., Vargas-García, Y., & Dávila-Rincón, J. (2017). Perspectivas de las biorrefinerías y situación actual de los biocombustibles en Ecuador como país emergente. *Perfiles*, 2(18), 51–76. <http://dspace.espe.edu.ec/handle/123456789/9370>
- Perez, V., Felix, M., Romero, A., & Guerrero, A. (2015). Characterization of pea protein-based bioplastics processed by injection moulding. *Food and Bioprocess Technology*, 97, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.12.004>
- PlasticsEurope. (2017). *How plastic is made*. Association of plastics manufacturers. <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/how-plastic-is-made.aspx>
- PlasticsEurope. (2020). *Plastics – the Facts 2020* (pp. 1–64). PlasticsEurope. Association of Plastics Manufacturers. <https://www.plasticseurope.org/es/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>
- PNUMA. (2013). *Tendencias del flujo de materiales y productividad de recursos en América Latina*. Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente. [http://www.pnuma.org/deat1/pdf/RecentTrendsMaterialFlows\(Final\)06jun2013.pdf](http://www.pnuma.org/deat1/pdf/RecentTrendsMaterialFlows(Final)06jun2013.pdf)
- Pontt, C. (2008). *Potencial de biomasa en Chile* (pp. 1–74). Universidad Técnica Federico Santa María. http://www.archivochile.com/Chile_actual/patag_sin_repre/03/chact_hidroy-3_00019.pdf

- Prando, R. (2015). Biomasa, definición y características. *Introducción a los procesos tecnológicos industriales*, 1–121. <https://es.scribd.com/document/424069803/EERR-Biomasa>
- Ramesh, M., Palanikumar, K., & Reddy, K. H. (2017). Plant fibre based biocomposites: Sustainable and renewable green materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(February), 558–584. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.094>
- Ramírez, J. C., & Solórzano, S. A. (2012). *Banano rechazado para exportación en Ecuador: propuesta de creación de valor para lograr su introducción al mercado internacional* [Universidad Politécnica Salesiana Ecuador]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2840/1/UPS-GT000315.pdf>
- Razo, C., Ludeña, C., & Saucedo, A. (2007). *Producción de biomasa para biocombustibles líquidos: el potencial de América latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/4581/S0700830.es.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Redagráfica. (2020). *Colombia entre el "top 5" de los productores y exportadores de banana*. <https://www.redagricola.com/co/colombia-entre-el-top-5-de-los-productores-y-exportadores-de-banana/>
- Reddy, C. S., Ghai, R., Rashmi, & Kalia, V. (2003). Polyhydroxyalkanoates: an overview. *Bioresource Technology*, 87(2), 137–146. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00212-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00212-2)
- Rios, A., Almonacid, B., Holmqvist, C., & Gutiérrez, D. (2013). *Evaluación de Mercado de Biomasa y su Potencial - Versión Resumida*. <https://www.prevencionincendiosforestales.cl/documento/evaluacion-de-mercado-de-biomasa-y-su-potencial/>
- Roitman, M., Martinelli, C., & Rodríguez, C. (2011). Producción de energía a partir de biomasa. *Energías alternativas de Córdoba*, 1–34. http://www.epec.com.ar/docs/institucional/energiasalternativas/BIO_MASA.pdf
- Sánchez, L. (2015). *Balance Energético Nacional Bolivia 2000-2014*. Ministerio de Hidrocarburos y Energía. https://issuu.com/ministeriodehidrocarburos/docs/ben_2000_2014
- Santos, R. P. O., Rodrigues, B. V. M., Ramires, E. C., Ruvolo-Filho, A. C., & Frollini, E. (2015). Bio-based materials from the electrospinning of lignocellulosic sisal fibers and recycled PET. *Industrial Crops and Products*, 72, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.024>
- Saratale, G. D., & Oh, M. K. (2015). Characterization of poly-3-hydroxybutyrate (PHB) produced from *Ralstonia eutropha* using an alkali-pretreated biomass feedstock. *International Journal of Biological Macromolecules*, 80, 627–635. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.07.034>
- Schandl, H., Fischer-kowalski, M., West, J., Giljum, S., Dittich, M., Eisenmenger, N., Geschke, A., Lieber, M., Wieland, H., Schaffartzik, A., Lenzen, M., Tanikawa, H., & Miato, A. (2016). *Global Material Flows Resource and Productivity*. <https://www.resourcepanel.org/reports/global-material-flows-and-resource-productivity-database-link>
- Sims, R. E., & Bassam, N. El. (2004). Biomass and Resources. En *Bioenergy Options for a Cleaner Environment* (pp. 1–28). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008044351-5/50003-9>
- Singh, Y. D., Mahanta, P., & Bora, U. (2017). Comprehensive characterization of lignocellulosic biomass through proximate, ultimate and compositional analysis for bioenergy production. *Renewable Energy*, 103, 490–500. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.039>
- Sleenhoff, S., Landeweerd, L., & Osseweijer, P. (2015). Bio-basing society by including emotions. *Ecological Economics*, 116, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.04.011>
- Soroudi, A., & Jakubowicz, I. (2013). Recycling of bioplastics, their blends and biocomposites: A review. *European Polymer Journal*, 49(10), 2839–2858. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.07.025>
- Spiridon, I., Leluk, K., Maria, A., & Nicoleta, R. (2015). Composites: Part B Evaluation of PLA – lignin bioplastics properties before and after accelerated weathering. *COMPOSITES PART B*, 69, 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.006>
- Vaiv. (2015). *Agua Mineral - Toma Agua No plástico*. <http://www.vaiv.cl/>
- Valero-Valdivieso, M., Ortegón, Y., & Uscategui, Y. (2013). Biopolymers: Progress and Prospects. *SciELO Colombia*, 181, 171–180. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/viewFile/20642/42269>
- Wang, R., Zhang, J., Kang, H., & Zhang, L. (2016). Design, preparation and properties of bio-based elastomer composites aiming at engineering applications. *Composites Science and Technology*, 133, 136–156. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.07.019>
- Wilde, B. de, & Deconinck, S. (2013). *Benefits and challenges of bio- and oxo-degradable plastics*. https://www.ows.be/wp-content/uploads/2013/10/Final-Report-DSL-1_Rev02.pdf
- Yu, J. (2007). Microbial production of bioplastics from renewable resources. En S.-T. Yang (Ed.), *Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources* (pp. 585–610). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52114-9_50024-4
- Zahari, M. A. K. M., Ariffin, H., Mokhtar, M. N., Salihon, J., Shirai, Y., & Hassan, M. A. (2015). Case study for a palm biomass biorefinery utilizing renewable non-food sugars from oil palm frond for the production of poly(3-hydroxybutyrate) bioplastic. *Journal of Cleaner Production*, 87(C), 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.010>
- Zárate-Ramírez, L. S., Romero, A., Bengochea, C., Partal, P., & Guerrero, A. (2014). Thermo-mechanical and hydrophilic properties of polysaccharide / gluten-based bioplastics. *Carbohydrate Polymers*, 112, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.05.055>
- ZeaPlast. (2012). *ZEApplast: Plásticos biodegradables*. <http://www.zeaplast.cl/>
- Zhang, B., & Wang, Y. (2013). Biomass processing, conversion and biorefinery. En *Biomass Processing, Conversion and Biorefinery* (pp. 1–457). <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84892095504&partnerID=ZOTx3y1>

BIOGRAFÍA

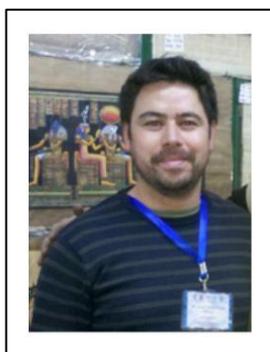


Yadira Vargas García, Ingeniera Industrial de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Magister en Ingeniería de Procesos y Sistemas Industriales graduada en la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Profesionalmente vinculada a la docencia tecnológica superior e investigación en el diseño de procesos para obtención de bioplásticos dentro del contexto de biorrefinerías.



Joffre Pazmiño Sánchez, Ingeniero Industrial graduado de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Magíster en Ingeniería de Procesos y Sistemas Industriales de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Dentro del ámbito profesionalizante e investigativo labora en la formulación y evaluación de

proyectos relacionados a la valorización e industrialización de la biomasa, gestión de la Seguridad, Salud y Ambiente, así como también en la optimización de procesos industriales. Adicional, es con fundador y asesor de la compañía SOPBIAL CÍA LTDA., la misma que participa en proyectos ambientales como industriales.



Javier Dávila Rincón, Ingeniero químico egresado de la Universidad Nacional de Colombia, maestría en Ingeniería Química y PhD en Ingeniería. Trabaja en fluidos supercríticos para la extracción de aceites y biocompuestos así como en el diseño de procesos químicos y biorrefinerías. Aprovechamiento de residuos sólidos y productos derivados

de cannabis medicinal.

Gestión de la Exposición Laboral a Ruido en el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CCICEV) de la Escuela Politécnica Nacional

Carrera, Gisela^{1,*} ; Salgado, Francisco¹ ; Villacis, William¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

Resumen: El objetivo de esta investigación radica en: identificar los factores de riesgo que pueden afectar la salud auditiva del personal del CCICEV de la Escuela Politécnica Nacional, evaluar los riesgos y proponer las medidas de control que permitan el cumplimiento de la normativa vigente respecto a la exposición laboral de ruido en el Ecuador. En el CCICEV, se llegó a determinar que existe sobreexposición laboral a ruido, ya que luego de realizar la evaluación a riesgo físico, el nivel de presión sonora diario equivalente ponderado en A (Laeqd) en el área técnica, sobrepasa los 85 dBA y en el área administrativa se encuentra sobre los 70 dBA. Por ello, fueron propuestas medidas de control para la fuente, el medio y el receptor, de acuerdo con la jerarquía de control de ruido de la norma ISO 45001; siendo estas: para la fuente de enfriamiento, una cabina de insonorización; para el medio, paneles de absorción acústica, así como un revestimiento acústico en la fachada frontal de las oficinas; como medidas administrativas, se proponen pausas pasivas o activas en lugares libres de ruido, apagar las fuentes de ruido si no se las necesita e informar a los colegas de trabajo si se va a realizar una actividad ruidosa; además se recomienda realizar un plan general de seguridad y salud en el trabajo donde prevalezca la vigilancia de la salud, la formación e información al igual que la debida señalización, y para el receptor del área técnica, se propone el uso de equipo de protección auditiva.

Palabras clave: Ruido, Riesgo Físico, Exposición Laboral, Higiene Industrial, Salud Auditiva.

Management of Occupational Exposure to Noise at the Technology Transfer Center for Training and Research in Vehicle Emission Control (CCICEV) of the Escuela Politécnica Nacional

Abstract: The objective of this research is to: identify the risk factors that may affect the hearing health of the CCICEV staff of the Escuela Politécnica Nacional, evaluate the risks and propose control measures that allow compliance with current regulations regarding the occupational noise exposure in Ecuador. The CCICEV determined that there is occupational overexposure to noise, since after carrying out the physical risk assessment, the equivalent daily A-weighted sound pressure level (Laeqd) in the technical area exceeds 85 dBA and in the administrative area is over 70 dBA. For this reason, control measures were proposed for the source, the medium and the receiver, according to the noise control hierarchy of the ISO 45001 standard; being included: for the cooling source, a soundproofing cabin; for the middle, acoustic absorption panels, as well as an acoustic cladding on the front façade of the offices; As administrative measures, passive or active breaks are proposed in places free of noise, turning off noise sources if they are not needed and alerting co-workers if noisy activity is going to take place; In addition, it is recommended to carry out a general plan of health and safety at work where health surveillance, training and information prevail, along with proper signaling, and for the recipient of the technical area, the use of hearing protection equipment is proposed.

Keywords: Noise, Physical Risk, Occupational Exposure, Industrial Hygiene, Hearing Health.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el avance tecnológico se encuentra ligado a la industria, permite que esta, crezca a pasos agigantados, y, lo que parece un beneficio, trae consigo daños colaterales; siendo uno de ellos el ruido, este afecta a la salud de las personas que

se encuentran expuestas y más aún en condiciones laborales (Suter, 2012).

El ruido origina la pérdida progresiva de la capacidad auditiva y cada vez es mayor el número de personas afectadas. Se

*gisela.carrera@epn.edu.ec
Recibido: 02/03/2021
Aceptado: 05/10/2021
Publicado: 01/11/2021
10.33333/rp.vol48n2.02
CC 4.0

conoce además, que el ruido es un problema desde hace aproximadamente 2000 años (Baraza et al, 2014).

El ruido laboral es subestimado, dado que, los resultados de este se presentan luego de largos períodos de exposición, sus alertas son imperceptibles y cuando ya han sido identificadas, pueden haberse convertido en enfermedades profesionales donde los daños son irreparables (Suter, 2012).

El ruido está conformado por una serie de sonidos agrupados y no coordinados entre sí, estos sonidos no son entendibles, y producen sensaciones desagradables al oído, además interfieren con las actividades humanas (Falagán, 2008).

El intervalo de presión sonora o umbral auditivo que una persona con oídos sanos puede percibir y tolerar se encuentra entre 20×10^{-6} Pa y 200 Pa, si el valor fuera superior a este último, la persona se encontraría en un umbral doloroso que le provocaría lesiones irreversibles. Debido a que el oído responde de forma logarítmica con relación al ruido de un estímulo aplicado, las medidas acústicas se representan mediante una expresión logarítmica, de tal forma que, puedan llegar a ser manejables y fáciles de interpretar, tal es el caso del nivel de presión sonora representado en la Ecuación 1 (Falagán, 2008):

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_{ef}}{P_0} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:

L_p es el nivel de presión sonora [dB].

P_{ef} es la presión eficaz que caracteriza a la onda [Pa].

P_0 es la presión de referencia [Pa].

De acuerdo con la NTP 270 "Evaluación de la exposición al ruido. Determinación niveles representativos", se considera cuatro tipos de ruido: el ruido estable, periódico, aleatorio y de impacto.

El ruido estable es considerado constante, ya que, la diferencia entre el valor máximo y mínimo en el nivel de presión sonora ponderada en A debe ser inferior a 5 dB, para el ruido periódico esta diferencia debe ser igual o superior a 5 dB y debe poseer una cadencia cíclica. De igual forma que el caso anterior, para el ruido aleatorio, su diferencia puede ser superior o igual a 5 dB pero a su vez el nivel de presión sonora ponderada en A debe variar de forma aleatoria con el tiempo. En el caso del ruido de impacto no tiene similitud con ninguno de los casos anteriores ya que su nivel de presión sonora decrece exponencialmente en función del tiempo, siendo su duración menor a un segundo (INSHT NTP 270, s/f).

El ruido no desencadena los mismos efectos en todos los trabajadores, por lo tanto las pérdidas auditivas causadas por el ruido dependen de varios factores como:

- Intensidad de ruido
- Rango de frecuencias
- Exposición diaria
- Exposición prolongada
- Tipo de ruido

- Susceptibilidad de cada trabajador
- Género
- Edad
- Afecciones previas del oído
- Eficiencia de métodos de protección auditiva adoptados.
- Tipo de aficiones o hobbies que desempeñan los trabajadores, entre otros (Henao, 2014).

Múltiples han sido los efectos que se atribuyen a la exposición al ruido, pero el más representativo, es el efecto fisiológico, el cual se deriva del uso de equipo instrumental, y generalmente su resultado es el deterioro de la audición, mientras que, los efectos psicológicos dependen de la respuesta subjetiva de las personas, misma que es recabada de un análisis estadístico para el estudio de los efectos denominados como: molestia, irritación, alteraciones del sueño, interferencia de la comunicación; en el caso de éste último para que exista una conversación moderada en la que la inteligibilidad sea de alrededor del 80% es necesario que el nivel de presión sonora de la conversación sea mayor a 12 dBA con relación al ruido de fondo (Chávez, 2006).

Para obtener un entorno laboral saludable en el CCICEV, es necesario considerar ciertas medidas de prevención y control, para disminuir el nivel de ruido que perciben sus trabajadores.

Las medidas de control propuestas, permitirán reducir la exposición al ruido laboral a niveles aceptables, velando por la salud auditiva de las personas, y a su vez, se cumpliría la normativa ocupacional vigente, es decir, lo establecido en el Decreto Ejecutivo 2393 para Ecuador, en el que establece que, en caso de cumplir una jornada laboral de 8 horas, el nivel de presión sonora ponderado en A no debe ser superior a 85 dBA, y en los puestos de trabajo que demanden actividad intelectual, concentración o cálculo no debe exceder los 70 dBA (Presidencia de la República del Ecuador, 1986).

El ruido afecta a la salud, y se le considera perjudicial para cualquier área de trabajo, lo que a su vez, exige adoptar medidas de control ligadas a programas de vigilancia de la salud; el esfuerzo y compromiso es fundamental, ya que, al crear conciencia en el grupo de trabajo se consigue una cultura colectiva de seguridad (Delgado et al, 2010).

2. METODOLOGÍA

El CCICEV se encarga de evaluar la conformidad de los componentes o sistemas de los vehículos, mediante una simple inspección o ensayos de laboratorio, ya sea en proyectos de investigación, revisión técnica vehicular, laboratorio de emisiones, evaluación de vehículos nacionales e importados.

Las instalaciones que componen el CCICEV constan de un galpón y dentro de este se encuentran, el laboratorio de emisiones y revisión vehicular, dos bodegas, un mini comedor y las oficinas dispuestas en dos niveles como se observa en la Figura 1. Los puestos de trabajo del área administrativa desarrollan sus actividades en las oficinas, mientras que los puestos de trabajo del área técnica se desarrollan en el laboratorio, las oficinas y fuera de las instalaciones del CCICEV cuando la modalidad es por comisión de servicios.



Figura. 1. CCICEV

Para establecer de forma clara y ordenada los pasos a seguir en la gestión de la exposición laboral al ruido, se eligió el modelo de gestión del riesgo aplicado al ruido laboral como se indica en la Figura 2 (Cortés, 2012).

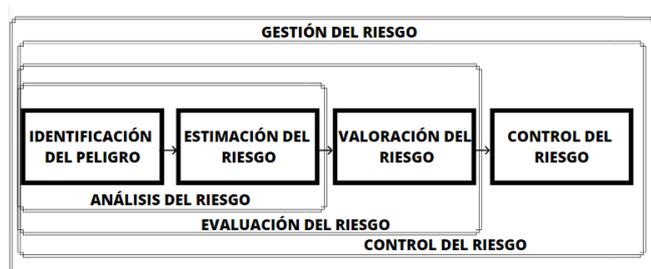


Figura. 2. Modelo de gestión del riesgo (Cortés, 2012)

Después de conocer las actividades que se desarrollan en el CCICEV, se comprobó la existencia de ruido laboral, y se llevó a cabo una investigación, cuyo caso particular, fue gestionar la exposición laboral al ruido, donde el nivel de medición y análisis de la información recabada fue cualitativa y cuantitativa, en cuyo caso las variables procedieron de un estudio no experimental que a su vez fue observacional, prospectivo, transversal y descriptivo. Además, el método empleado a lo largo de la investigación fue deductivo.

Según el Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS, s.f.), el objetivo de identificar los peligros asociados al trabajo, consiste en:

- Eliminar los factores de riesgo fáciles de suprimir.
- Evaluar los riesgos que no es posible suprimir.
- Planificar y/o proponer la adopción de medidas de control.

2.1 Identificación de los factores de exposición laboral al ruido

Se empleó el método práctico basado en la evidencia, mediante una lista de verificación del “Manual para la evaluación y prevención de riesgos ergonómicos y psicosociales en PYME”, debido a que el número de personas que laboran en el CCICEV es menor a 50 (INSHT, 2003a). Luego, se solicitó la colaboración de las personas que conforman el CCICEV para llenar una encuesta de sondeo que permitiría identificar de forma cualitativa la incidencia del ruido laboral, la encuesta contó con 20 preguntas de opción

múltiple para facilidad de diagnóstico. Con ello se obtuvo datos como: la jornada laboral, el área de trabajo, la permanencia laboral, edad, entre otros. La documentación histórica proporcionada por el CCICEV permitió identificar los puestos de trabajo, así como los servicios que ofrece y la demanda por año.

Posteriormente, los trabajadores fueron sometidos a exámenes médicos auditivos para conocer el estado de salud de sus oídos. Y se realizó la toma de datos mediante sonómetro para determinar el grado de exposición laboral a ruido.

2.2 Evaluación de la exposición laboral al ruido

El método de evaluación general de riesgos del INSHT, relaciona la probabilidad y consecuencia para determinar el nivel de riesgo, e interpretar el mismo de forma cualitativa, siendo así que la probabilidad puede llegar a ser baja, media o alta y éstas se pueden relacionar con una consecuencia en un rango que va desde ligeramente dañino a extremadamente dañino, dando como resultado un riesgo, trivial, tolerable, moderado, importante o intolerable (INSHT, 2000).

Y para la valoración cuantitativa, se debe emplear un método específico de exposición al ruido laboral, con el que sea posible establecer un plan de medición que permita una evaluación representativa y fiable.

De tal forma que la NTP 951, “Estrategias de medición y valoración de la exposición a ruido (II)” y el análisis de las condiciones de trabajo en el CCICEV permitieron determinar que la estrategia basada en el puesto de trabajo es adecuada para este proyecto, por su practicidad; además de ser considerada útil en situaciones en las que es complejo describir un patrón de trabajo (INSHT/INSST, 2012).

Después de identificar la estrategia de medición, fue importante obtener el nivel de presión sonora diario ponderado en A, para ello se empleó la Ecuación (2).

$$L_{A_{eq,d}} = L_{A_{eq,T}} + 10 \log \left(\frac{T}{8} \right) \quad (2)$$

Donde:

$L_{A_{eq,d}}$ es el nivel de presión sonora diario equivalente ponderado en A [dBA].

$L_{A_{eq,T}}$ es el nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado en A [dBA].

T es el tiempo de exposición en horas/día.

Y mediante la Tabla 1, se estableció el método de medición para ruido estable conforme al Real Decreto 286 de España, que considera el instrumento de medida necesario, el número de repeticiones y la duración de cada una según el tipo de ruido identificado.

Tabla 1. Método de medición del Ruido

Definición	Instrumento de medida	Duración por medición	Número de mediciones
$R(L_{Pa+1}) < 5\text{dB}$	Sonómetro, Tipo 2 (UNE-EN60651:1996) SLOW	$\geq 15\text{s}$	$R \leq 2\text{dB} \Rightarrow \geq 3\text{m}$ $2\text{dB} < R < 5\text{dB} \Rightarrow \geq 5\text{m}$

(Falagán, 2008)

El equipo de medición empleado fue un sonómetro Optimus con marca comercial Cirrus Research S.L., tipo CR161C cuyo número de serie es G061059, con un calibrador acústico cuyo nivel de calibración es 93.7 dB, baterías y software Noisetools como indica la Figura 3.

**Figura 3.** Sonómetro e implementos utilizados para muestreos en el CCICEV

Una vez identificados los puestos de trabajo críticos, se entrevistó a las personas que se desenvuelven a diario allí, para determinar cuáles eran los puestos de trabajo y las actividades que desarrollan, como indica la Tabla 2.

Donde:

- A1: Ensayo torque y potencia
- A2: Ensayo lug down
- A3: Ensayo ciclo europeo
- A4: Ensayo opacidad
- A5: Ensayo nivel sonoro tubo de escape
- A6: Ensayo análisis de emisiones de gases
- A7: Ensayo prueba de frenado
- A8: Elaboración de informes, tareas de oficina
- A9: Elaboración de informes, tareas de oficina

Tabla 2. Actividades desarrolladas por puesto de trabajo

Área Administrativa	
Puestos de Trabajo	Actividad
Director Ejecutivo	A8, A9
Especialista Administrativo	A8, A9
Especialista Financiero	A8, A9
Analista de Talento Humano	A8, A9
Analista de Adquisiciones	A8, A9
Auxiliar de servicios generales	A8, A9
Contador	A8, A9
Tesorero	A8, A9
Secretaria	A8, A9

Tabla 2. Actividades desarrolladas por puesto de trabajo (Continuación)

Área Técnica	
Puestos de Trabajo	Actividad
Responsable Técnico de Vehículos Nacionales	(A8, A9)*
Responsable Técnico de Vehículos Importados	(A8, A9)*
Responsable Técnico de Laboratorio de Emisiones y Revisión Vehicular	A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A9
Responsable de Calidad y Acreditación	(A8, A9)*
Inspector 1 de Vehículos Nacionales	(A8, A9)*
Inspector 1 de Vehículos Importados	(A8, A9)*
Inspector 2 de Vehículos Nacionales	(A8, A9)*
Inspector 2 de Vehículos Importados	(A8, A9)*
Técnico de Laboratorio 1	A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8

((A8, A9)* Trabajadores que permanecen en las instalaciones del CCICEV cuando no desarrollan trabajo bajo la denominación comisión de servicios)

Con los datos antes recopilados, se determinó si existe sobreexposición tanto para el área técnica como para el área administrativa, para ello se compararon los valores calculados de nivel de presión sonora diario equivalente ponderado en A, con los valores límite, establecidos por el Decreto Ejecutivo 2393 los cuales no deben exceder los 85 dBA y para puestos de trabajo que demanden actividad intelectual no debe exceder los 70 dBA, siempre que la jornada laboral sea de 8 horas.

2.3 Proposición de medidas de prevención y control de exposición laboral a ruido

Las medidas de prevención y control fueron propuestas luego de analizar las condiciones de fuente, el medio y el receptor, de acuerdo a la jerarquía de control de riesgo según la norma ISO 45001 en la que se establece eliminación, sustitución, controles de ingeniería, señalización, alertas y/o controles administrativos y equipos de protección personal (ISO, 2018).

Existen dos fuentes significativas de ruido, una es el ventilador de enfriamiento, el cual es necesario para mantener controlada la temperatura del motor del vehículo durante la realización de los ensayos de laboratorio, como torque y potencia, lug down o ciclo europeo donde el vehículo se encuentra anclado mediante cadenas metálicas y aumenta su velocidad en el mismo sitio, de 0 a aproximadamente 120 km/h en un tiempo inferior a 1 min; y otra los automotores de prueba; es así que, para el ventilador de enfriamiento, se propuso encerrar el ruido mediante una cabina de insonorización, a más de ello se propuso absorber el ruido mediante paneles acústicos en el techo del galpón y revestir con material acústico la fachada frontal de las oficinas; en lo que se refiere a los controles administrativos, éstos se encontrarán directamente ligados a la reducción de la exposición así como a la formación e información, siendo un paso a favor el hecho de que ya existe señalización en el lugar de estudio; para los trabajadores del área técnica, se propuso el uso de equipo de protección auditiva, tipo tapón y tipo orejera.

2.4 Estimación de la atenuación efectiva

Con la ayuda de la NTP 638 “Estimación de la atenuación efectiva de los protectores auditivos”, se logró determinar la estimación de la atenuación efectiva de los protectores auditivos tipo orejera y tipo tapón; para el desarrollo de los cálculos se consideraron 11 protectores auditivos tipo orejera y 8 protectores auditivos tipo tapón, para así conocer de entre ellos cuáles podían ofrecer mayor atenuación tanto para sonidos graves como agudos.

En esta sección, se desarrollaron los tres métodos establecidos en la NTP 638, el método de las bandas de octava, el método de H, M y L y el método del SNR esto con el objetivo de determinar la reducción predicha del nivel de ruido (PNR) y el nivel de presión sonora efectivo ponderado en A (LA’) para cada protector auditivo (INSHT, 2003b).

Debido a que el tiempo de utilización de un protector auditivo interviene directamente con la protección real que recibe una persona, se consideró el tiempo como variable; en cada uno de los cuatro protectores auditivos que registraron una mayor atenuación del ruido en el CCICEV.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultado de los exámenes médicos auditivos (audiometrías)

De los exámenes médicos auditivos, se obtuvo como resultado que 1 de las 19 personas presenta hipoacusia bilateral, el diagnóstico de la audiometría indica que la persona de 36 años presenta una hipoacusia bilateral de moderada a severa, en la que se descarta una patología tubárica, pero es necesario el control de ruido, la persona debe acudir a control cada tres meses después de realizado el examen para determinar cuál ha sido su evolución.

3.2 Resultado del método de evaluación general de riesgos del INSHT

Mediante el desarrollo del método de evaluación general de riesgos del INSHT, en el que relaciona la probabilidad y consecuencia, se determinó la existencia de un riesgo importante que requiere ser controlado, las medidas pueden aplicarse en la fuente, medio y/o receptor, como indica la Tabla 3.

Tabla 3. Matriz de evaluación de riesgo físico por ruido

Lugar de Trabajo	Identificación (Riesgo)	Método	Evaluación	
			Consecuencia	Probabilidad
CCICEV	Riesgo Físico por ruido (ensayos de laboratorio en automotores)	INSHT	Dañino	Alta
Riesgo		Importante		

Tabla 3. Matriz de evaluación de riesgo físico por ruido (Continuación)

Medidas a Adoptar	
Fuente	Colocar una cabina para reducir el ruido del ventilador de enfriamiento.
Medio	Colocar paneles acústicos para reducir el ruido en el galpón.
Receptor	Revestimiento de fachada de oficinas. Uso de protección auditiva para atenuar el ruido en el oído de los trabajadores.

3.3 Resultado de tabulación de datos obtenidos del sonómetro

Posterior a la tabulación de los datos de nivel de presión sonora, se calculó el nivel de presión sonora equivalente ponderado en A y como resultado se obtuvo que cada actividad sobrepasa los 85 dBA en laboratorio, y en oficina sobrepasa los 70 dBA en 8 horas, lo que indica que la persona se encontraría sobreexpuesta si se realizaría una de estas actividades durante toda la jornada de forma continua, de acuerdo con lo que establece el Decreto Ejecutivo 2393, por ahora, estos datos permitirán conocer el nivel de presión sonora equivalente diario ponderado en A.

Una vez identificadas las actividades que se realizan en los puestos de trabajo y luego de calcular su respectivo nivel de presión sonora equivalente ponderado en A, se determinó el nivel de presión sonora equivalente diario ponderado en A, para cada puesto de trabajo, de acuerdo al tiempo en el que se lleva a cabo cada actividad.

De ello, se obtuvo como resultado que los dos puestos (técnico de laboratorio 1 y responsable técnico de laboratorio de emisiones y revisión vehicular) sobrepasan los 85 dBA por jornada laboral de 8 horas, esto con base en el Decreto Ejecutivo 2393 y de acuerdo al límite de tolerancia recomendado por la OMS.

Lo expuesto anteriormente es posible observar en el ejemplo de cálculo para el Puesto de Responsable Técnico de Laboratorio de Emisiones y Revisión Vehicular, con la siguiente secuencia:

1.- Se identifican las actividades que componen el puesto de trabajo como se indican en la Tabla 2.

2.- Este puesto de trabajo se encuentra compuesto de ocho actividades, siete de ellas son ensayos que se ejecutan en el laboratorio de emisiones y revisión vehicular; la actividad restante se la realiza dentro de las oficinas para redactar informes o emitir proformas.

3.- El método de medición del ruido, empleado corresponde a la Tabla 1, en ella establece que se debe recabar entre tres y cinco mediciones, siempre que la relación entre ellas no supere los 5 dB, en este caso la relación entre el máximo y mínimo valor de nivel de presión sonora total del grupo de 5 tomas de datos, no supera los 2 dB.

4.- Estas mediciones fueron obtenidas en el lapso de un mes entre agosto y septiembre de 2019, en días al azar con tomas de datos en la mañana y tarde, el nivel de presión sonora que resultó de la toma de datos se representó en bandas de octava por cada actividad.

5.- Se determina el nivel de presión sonora de la actividad 1 para el valor de banda de octava 31,5 Hz mediante el cálculo del promedio de los cinco valores de nivel de presión sonora obtenidos mediante el uso del sonómetro con la ayuda de la Ecuación 3.

$$NPS_A = \frac{\sum_{A1}^{An} NPS_i}{n} \quad (3)$$

Donde:

NPS_A es el nivel de presión sonora por actividad [dB].
 NPS_i es el nivel de presión sonora por cada medición [dB].
 n es el número de mediciones.

$$NPS_A = \frac{\sum_{A1}^{An} NPS_i}{n}$$

$$NPS_{A1(31,5)} = \left(\frac{99,1 + 99,9 + 100,6 + 101,2 + 100,4}{5} \right) dB$$

$$NPS_{A1(31,5 \text{ Hz})} = 100,2 \text{ dB}$$

El valor promedio obtenido pertenece a la banda de octava de 31,5 Hz, el cálculo se debe realizar para cada banda de octava entre 31,5 Hz hasta 16000 Hz.

6.- Se calcula el nivel de presión sonora total de la actividad 1 mediante la suma logarítmica de los niveles de presión sonora con los datos por banda de octava de acuerdo a la Ecuación 4.

$$NPS_{A1} = 10 \log \left[10^{\frac{NPS_1}{10}} + 10^{\frac{NPS_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{NPS_n}{10}} \right] \quad (4)$$

Donde:

NPS_{A1} es el nivel de presión sonora por actividad [dB].
 NPS_n es el nivel de presión sonora por banda de octava [dB].

$$NPS_{A1} = 10 \log \left[10^{\frac{100,2315}{10}} + 10^{\frac{98,263}{10}} + 10^{\frac{95,9125}{10}} + 10^{\frac{91,8250}{10}} + 10^{\frac{89,7500}{10}} + 10^{\frac{88,81k}{10}} + 10^{\frac{86,72k}{10}} + 10^{\frac{82,64k}{10}} + 10^{\frac{79,38k}{10}} + 10^{\frac{62,316k}{10}} \right]$$

$$NPS_{A1} = 104 \text{ dB}$$

7.- Se determina el nivel de presión sonora equivalente ponderado en A, mediante la adición entre el nivel de presión sonora promedio de cada banda de octava con su respectivo valor de corrección de ponderación en A como indica la Ecuación 5.

$$L_{eqA1(B.O.)} = NPS_{A1(B.O.)} + Aten_{A_{B.O.}} \quad (5)$$

Donde:

$L_{eqA1(B.O.)}$ es el nivel de presión sonora equivalente ponderado en A, por actividad en cada banda de octava [dBA].

$NPS_{A1(B.O.)}$ es el nivel de presión sonora por actividad en cada banda de octava [dB].

$Aten_{A_{B.O.}}$ es el valor de corrección que le corresponde a cada banda de octava de la red de ponderación A.

$$L_{eqA1(31,5)} = NPS_{A1(31,5)} + Aten_{A_{31,5}}$$

$$L_{eqA1(31,5)} = [100,2 + (-39,4)] \text{ dBA}$$

$$L_{eqA1(31,5)} = 60,8 \text{ dBA}$$

8.- Se calcula el nivel de presión sonora equivalente ponderado en A total, de la Actividad 1 mediante la suma logarítmica de los niveles de presión sonora equivalentes ponderados en A de cada banda de octava como indica la Ecuación 6.

$$Leq_{A1} = 10 \log \left[10^{\frac{Leq_1}{10}} + 10^{\frac{Leq_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{Leq_n}{10}} \right] \quad (6)$$

Donde:

Leq_{A1} es el nivel de presión sonora equivalente ponderado en A por actividad [dBA].

Leq_n es el nivel de presión sonora equivalente ponderado en A por banda de octava [dBA].

$$Leq_{A1} = 10 \log \left[10^{\frac{60,8315}{10}} + 10^{\frac{72,063}{10}} + 10^{\frac{80,0125}{10}} + 10^{\frac{83,2250}{10}} + 10^{\frac{86,5500}{10}} + 10^{\frac{88,81k}{10}} + 10^{\frac{87,92k}{10}} + 10^{\frac{83,64k}{10}} + 10^{\frac{78,28k}{10}} + 10^{\frac{55,716k}{10}} \right]$$

$$Leq_{A1} = 94 \text{ dBA}$$

9.- Se realiza el mismo procedimiento desde el punto 5 al punto 8 con las actividades restantes que componen el puesto crítico 1 del área técnica, con los valores de nivel de presión sonora equivalente ponderado en A de cada actividad y el tiempo de duración de las mismas, luego se determina el nivel de presión sonora diario ponderado en A como se indica en la Ecuación 2.

$$L_{Aeq,d} = L_{Aeq,T} + 10 \log \left(\frac{T}{8} \right)$$

$$L_{Aeq,dA1} = L_{Aeq,A1} + 10 \log \left(\frac{T_{A1}}{8} \right)$$

$$L_{Aeq,dA1} = 94 \text{ dBA} + 10 \log \left(\frac{1 \text{ h}}{8} \right)$$

$$L_{Aeq,dA1} = 85 \text{ dBA}$$

10.- Luego de determinar el nivel de presión sonora equivalente diario ponderado en A de todas las actividades que se llevan a cabo en el puesto de trabajo, se determina el nivel de presión sonora equivalente diario total ponderado en A como indica la Ecuación 7.

$$Leq_{dT} = 10 \log \left[10^{\frac{Leq_{dA_1}}{10}} + 10^{\frac{Leq_{dA_2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{Leq_{dA_n}}{10}} \right] \quad (7)$$

Donde:

Leq_{dT} es el nivel de presión sonora equivalente diario ponderado en A [dBA].

Leq_{dA_n} es el nivel de presión sonora equivalente diario ponderado en A por actividad [dBA].

$$Leq_{A1} = 10 \log \left[10^{\frac{85_{A1}}{10}} + 10^{\frac{81_{A2}}{10}} + 10^{\frac{81_{A3}}{10}} + 10^{\frac{77_{A4}}{10}} + 10^{\frac{78_{A5}}{10}} + 10^{\frac{79_{A6}}{10}} + 10^{\frac{79_{A7}}{10}} + 10^{\frac{69_{A8}}{10}} \right]$$

$$NPS_{A1} = 89 \text{ dBA}$$

3.4 Medida de control en la fuente

La medida para reducir el ruido en la fuente, es aislar el ventilador de enfriamiento mediante una cabina de insonorización cuyas dimensiones son 2,40 m de largo, 1,00 m de ancho y 1,50 m de altura, con material de aluminio de 1 mm de espesor.

Con la cabina, el nivel de presión sonora equivalente ponderado en A de la máquina se vería reducido de 92 dBA a 77 dBA a 0,50 m de la misma y el nivel de atenuación total luego de considerar la pérdida por transmisión sería de 58 dBA aplicando adición de niveles sonoros entre las tres triangulaciones.

El ejemplo de cálculo que sustenta lo expuesto se encuentra a continuación:

1.- Se define el área que ocupará la cabina de insonorización a partir de sus dimensiones y los materiales que la conformarán.

Dimensiones

Largo (l) es 2,40 m

Ancho (a) es 1,00 m

Altura (h) es 1,50 m

Materiales

El área de aluminio se encontrará en las 3 caras laterales y la cara superior de la cabina, el área de hormigón, en la cara inferior o sección de losa donde se apoyará la cabina y la sección libre el área que permitirá la ventilación a la fuente de ruido. Para el cálculo se empleó las Ecuaciones 8, 9 y 10.

$$A_{aluminio} = (l \times h) + (l \times a) + 2 \times (a \times h) \quad (8)$$

$$A_{aluminio} = (2,4 \times 1,50) + (2,4 \times 1,00) + 2 \times (1,0 \times 1,50) = 9,0 \text{ m}^2$$

$$A_{hormigón} = l \times a \quad (9)$$

$$A_{hormigón} = 2,4 \times 1,0 = 2,4 \text{ m}^2$$

$$A_{aire} = l \times h \quad (10)$$

$$A_{aire} = 2,4 \times 1,5 = 3,6 \text{ m}^2$$

El área total es la sumatoria de áreas que forman parte en el diseño de la cabina como se observa en la Ecuación 11.

$$A_{total} = A_{aluminio} + A_{hormigón} + A_{aire} \quad (11)$$

$$A_{total} = 9,0 + 2,4 + 3,6 = 15,0 \text{ m}^2$$

2.- Se identifican los vértices para la triangulación entre la fuente de ruido, el borde superior de una de las caras laterales o pantallas acústicas y el receptor.

3.- Se calcula el número de Fresnel (N) mediante el uso de las Ecuaciones 12, 13, 14 y 15

$$N = \frac{2}{\lambda} (A + B - d) \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (13)$$

$$N_{cte} = 2(A + B - d) \quad (14)$$

$$N = \frac{f}{340} N_{cte} \quad (15)$$

Donde:

N: número de Fresnel

λ : longitud de onda [m]

c: velocidad de propagación del ruido en aire [m/s]

f: frecuencia [Hz]

N_{cte} : valor constante previo al cálculo donde interviene la frecuencia y la velocidad de propagación [m]

4.- Se identifica la pérdida por transmisión de cada material empleado en el diseño por banda de octava, además, se combinan en pares las áreas de los materiales que formarán parte de la cabina, de manera que $S_1 > S_2$, siendo S_1 la sección de mayor área y S_2 la de menor área de los dos materiales considerados para el primer par de evaluación. Si se va a emplear más de dos materiales en el diseño de la cabina, entonces, la primera combinación cuenta como un material a combinarse con la sección del nuevo material que conformará el nuevo par de evaluación, y el procedimiento se mantiene hasta agotar todos los materiales que serán utilizados para la cabina de insonorización.

5.- Mediante la ayuda de ábaco para pérdida de aislamiento o curvas para el cálculo de la pérdida por transmisión resultante al considerar dos superficies de materiales distintos. (Cahueñas, 2018), se determina la pérdida de transmisión resultante.

6.- Se desarrolla el mismo procedimiento que para la triangulación vertical y se encuentran los valores del número de Fresnel por banda de octava, la pérdida por transmisión resultante y el nivel de atenuación que surge como resultado

de la interposición de una pantalla acústica para las secciones triangulares horizontales.

3.5 Medida de control en el medio de transmisión

Otra medida que permite controlar el ruido es instalar 220 paneles acústicos de lana de vidrio con dimensiones de 2,45 m x 1,22 m x 0,08 m a dos caras, dispuestos en 5 hileras en la sección más corta del galpón, con un espacio entre ellos de 0,20 m; cada hilera llevará 44 paneles separados a lo largo del galpón 0,40 m.

Para determinar la absorción acústica de un recinto cerrado se debe partir de las áreas que lo componen los distintos materiales.

El coeficiente de absorción acústica varía porque depende de la frecuencia y el tipo de material, se expresa como indica la Ecuación 16, si el coeficiente de absorción acústica es 1, entonces la energía incidente es absorbida, pero si por el contrario, el coeficiente es 0 entonces toda la energía es reflejada.

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (16)$$

Donde:

α es el coeficiente de absorción acústica de un material
 E_a es la energía absorbida [J]
 E_i es la energía incidente [J]

Mediante la Ecuación 17, se obtiene la absorción acústica de un material.

$$A = S \times \alpha \quad (17)$$

Donde:

A es la absorción acústica [m²] ó [Sabines]
 S es la superficie del material [m²]
 α es el coeficiente de absorción del material

Los coeficientes de absorción del material son valores distintos según el material.

Para determinar la absorción acústica de un recinto, se emplea la Ecuación 18.

$$A = S_1 \times \alpha_1 + S_2 \times \alpha_2 + S_3 \times \alpha_3 + \dots + S_n \times \alpha_n \quad (18)$$

Donde:

A es la absorción acústica de un recinto [m²] ó [Sabines]
 S_i es la superficie interior del recinto ocupada por un material i [m²]
 α_i es el coeficiente de absorción del material i.

Mediante la Ecuación 19, es posible determinar el coeficiente de absorción promedio por material.

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times \alpha_i}{S} \quad (19)$$

Donde:

$\bar{\alpha}$ es el coeficiente de absorción promedio del material

α_i es el coeficiente de absorción del material i.

S_i es la superficie interior del recinto ocupada por el material i [m²]

S es la superficie interior total del recinto, ocupada por los materiales [m²]

A partir de la Ecuación 20, se obtiene la constante de cerramiento del recinto cerrado.

$$R = \frac{S \times \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (20)$$

Donde:

R es la constante de cerramiento

S es la superficie interior total del recinto, ocupada por los materiales [m²]

$\bar{\alpha}$ es el coeficiente de absorción promedio del material

Para determinar el nivel de presión sonora cuando existe absorción acústica en los recintos, se emplea la Ecuación 21

$$NPS = NWS + 10 \times \log \left(\frac{Q}{4\pi \times r^2} + 4/R \right) \quad (21)$$

Donde:

NPS es el nivel de presión sonora [dB]

NWS es el nivel de potencia sonora [dB]

Q es el coeficiente de direccionalidad

r es la distancia [m]

R la constante de cerramiento

Se determina el nivel de presión sonora equivalente ponderado en A, a partir de la corrección de red de ponderación A, se determina la reducción de ruido por banda de octava con los valores de Noise Criteria por banda de octava; para el proyecto se consideró al CCICEV como un recinto tipo fábrica para ingeniería pesada, con un valor de Noise Criteria de 70; se determinó la reducción del ruido y el área equivalente de absorción, y por último el área de paneles requerida, desde el punto más cercano al más lejano de la fuente.

Mediante la Figura 4, es posible observar la reducción en la propagación del ruido cuando se considera los paneles acústicos (b), con relación a cuando no han sido considerados (a), para ello, la sección en rojo indica la exposición a ruidos mayores a 85 dBA, la sección en azul ruidos entre 80 y 85 dBA y la sección en verde corresponde a ruidos inferiores a 80 dBA para una jornada laboral de 8 horas.

Con la instalación de los paneles acústicos, el nivel de presión sonora ponderado en A disminuiría 5 dBA a los 6 m y 8 dBA a los 24 m de distancia, como indica la Figura 5.

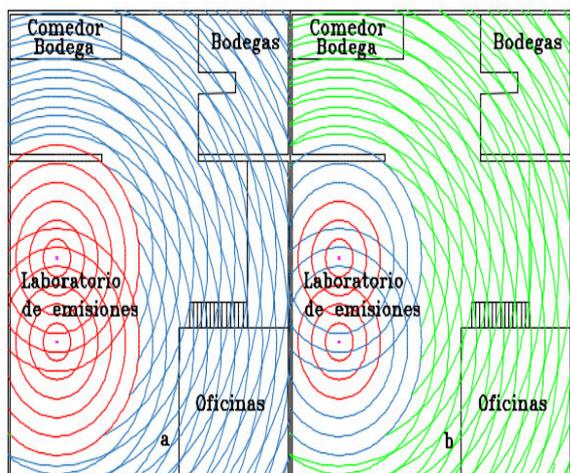


Figura 4. Propagación del ruido con y sin paneles acústicos

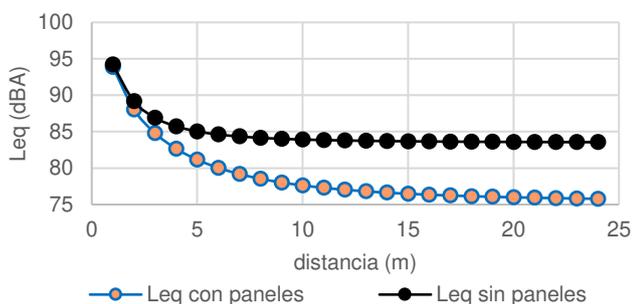


Figura 5. Variación del nivel de presión sonora ponderado en A, con relación a la distancia de alejamiento de la fuente de ruido con y sin paneles acústicos

Para el caso del revestimiento de la fachada frontal de las oficinas del CCICEV, se consideró la combinación de materiales, aluminio de 1 mm y vidrio de 6 mm; el nivel de presión sonora equivalente ponderado en A de las dos fuentes de ruido se reduciría de 94 dBA a 75 dBA a 10,0 m de la base y el nivel de atenuación total luego de considerar la pérdida por transmisión sería de 58 dBA aplicando adición de niveles sonoros entre las tres triangulaciones, se utilizó el mismo principio que para el diseño de la cabina de insonorización, con el objetivo es evitar que el ruido interrumpa las actividades laborales en las oficinas del CCICEV.

La Tabla 4 representa el costo en dólares de las tres medidas de control propuestas, este costo puede llegar a variar conforme pasa el tiempo, por lo tanto es referencial.

Tabla 4. Costos referenciales para el desarrollo de las tres medidas de control

1,0	Materiales	Unid.	Cant.	P. Unitario	P. Total
	Pls Aluminio liso (1,22x2,44) 1,0 mm	u	40	37,10	1484,00
	Pls Vidrio (2,4x3,6) 6,0 mm	u	2	411,26	822,52
	Paneles lana de vidrio (1,2x 24,0) 40,0 mm	m ²	1354	2,42	3276,68
	Pernos	u	3800	0,002	7,60
	Caucho	m	1803	0,20	360,60

Tabla 4. Costos referenciales para el desarrollo de las tres medidas de control (Continuación)

1,0	Materiales	Unid.	Cant.	P. Unitario	P. Total
	Perfil Aluminio 1,0x0,04	m	103	2,06	212,18
	Perfil Aluminio 1,0x0,1	m	1700	4,75	8075,00
Sub-total 1 :					S/. 14.238,58
2,0	Mano de Obra	Unid.	Cant.	P. Unitario	P. Total
	Montador	m ²	760	19,58	14880,80
	Ayudante	m ²	760	12,20	9272,00
Sub-total 2 :					S/. 24.152,80
3,0	Mano de Obra	Unid.	Cant.	P. Unitario	P. Total
	Herramientas	m ²	760	7,96	6049,60
Sub-total 3 :					S/. 6.049,60
Total (1 - 3) :					S/. 44.440,98

3.6 Medida de control en el receptor

Como resultado de la estimación de la atenuación efectiva de 19 protectores auditivos, 11 son tipo orejera y 8 son tipo tapón, se pudo determinar que los tapones 3M 1100 y 1110 ofrecen una mayor atenuación tanto para ruidos graves como agudos, como son tapones desechables pueden suponer una desventaja, por lo tanto también existe la opción de elegir los tapones 3M Ultrafit que ofrecen una segunda mejor atenuación con la ventaja de que no son desechables.

Si la preferencia es el uso de protectores auditivos tipo orejera que atenúen sonidos graves como agudos, se recomienda el uso del protector Sonis 3, pero si se trata de controlar los molestos sonidos agudos, el protector Sonis C ofrece una mayor atenuación, esto se determinó mediante los tres métodos de estimación de la atenuación efectiva de los protectores auditivos que proporciona la NTP 638.

De igual forma, de acuerdo a la misma NTP 638 indica que el método de bandas de octava para determinar tanto el PNR como L'A es fiable ya que considera el espectro de atenuación del protector auditivo. El siguiente método que brinda una buena aproximación en el cálculo del PNR es el método H, M y L, pero se debe tener cierto cuidado con el método SNR ya que este puede variar si preponderan frecuencias sumamente altas o excesivamente bajas en el espectro de atenuación del protector auditivo.

En cualquier caso, el uso de equipo de protección individual debe considerarse como la última medida de control, y esta debería ser de carácter complementario y temporal, además los trabajadores deben conocer y respetar las recomendaciones del fabricante en cuanto al correcto uso y mantenimiento según sea la elección del protector auditivo.

De acuerdo con las garantías que ofrece cada fabricante con relación al tiempo de uso del equipo de protección, se debe considerar de forma especial el hecho de que pueden presentarse riesgos derivados de la utilización del equipo de protección ya sea por mal uso o el uso excesivo del mismo.

3.7 Tiempo de utilización del protector auditivo

El resultado de los niveles de atenuación según el tipo de protector auditivo y el tiempo de utilización del mismo, en los primeros 5 min de no utilización, presenta una variación en la atenuación global, esta disminuye alrededor de 10 dBA con el uso de el protector auditivo tipo orejera Sonis C al igual que con los protectores auditivos tipo tapón 3M 1100/1110 y 3M Ultrafit, cosa que no ocurre con el protector tipo orejera Sonis 3 que disminuye aproximadamente 20 dBA.

Tabla 5. Nivel de presión sonora equivalente diario eficaz para los 4 tipos de protectores auditivos seleccionados de acuerdo a la atenuación

Tiempo de utilización del protector	Nivel de atenuación Naten (dBA)			
	Sonis 3	Sonis C	3M 1100/110	3M Ultrafit
8h00	60	71	69	70
7h25	80	80	79	80
6h50	82	82	82	82
6h15	84	84	84	84
5h40	85	85	85	85
5h05	86	86	86	86
0h00	89	89	89	89

De acuerdo con la Tabla 5, la mayor variación por no usar el protector auditivo se da en los primeros 35 min si se considera el tiempo de forma global y 5 min al considerar cada actividad, al cumplir 1 h 10 min del no uso del protector auditivo considerado como 10 min por actividad, la variación de atenuación deja de ser notable entre los 4 protectores auditivos pero aún se mantienen dentro de una exposición aceptable, pero deja de suceder a las 2 h 20 min de no uso de los protectores auditivos, es decir, a los 20 min de no uso en cada actividad; para obtener estos resultados las actividades en laboratorio fueron consideradas con la atenuación de cada uno de los protectores auditivos y para la actividad en oficina, se mantuvo el valor de exposición determinada como la presión sonora equivalente ponderada en A.

En lo que se refiere a las medidas administrativas u organizativas, es necesario que los trabajadores realicen pausas activas o pasivas en lugares libres de ruido, que apaguen las fuentes de ruido si no están en funcionamiento y que informen a sus compañeros de trabajo cada vez que vayan a realizar una actividad ruidosa, esto con el objetivo de reducir la exposición laboral de los trabajadores.

También la señalización de los espacios de trabajo, la formación e información periódica referente a seguridad y salud laboral debe ser impartida a todos y cada uno de los trabajadores.

A su vez se debe llevar a cabo programas de vigilancia de la salud, donde prevalezcan los exámenes de inicio, y fin de gestión, así como, los exámenes periódicos; para llevar un registro histórico de los acontecimientos.

4. CONCLUSIONES

- Después de identificar los factores de exposición laboral al ruido se concluye que efectivamente el ruido es parte del día a día del personal del CCICEV, y que a más de percibirlo genera ciertas interrupciones y molestias mientras se desarrollan las actividades laborales.
- Como consecuencia del análisis cualitativo y cuantitativo de la evaluación de riesgos, se concluye que el riesgo es importante y el nivel de presión sonora equivalente diario ponderado en A en los dos puestos críticos del área técnica es de 89 dBA y en el puesto crítico del área administrativa es de 75 dBA para una jornada laboral de 8 horas. Es decir, existe sobreexposición ya que sobrepasa los valores límite de 85 dBA y 70 dBA establecidos en el Decreto Ejecutivo 2393.
- Las medidas de control propuestas para la fuente y el medio de transmisión lograrían reducir el ruido significativamente; la cabina de insonorización de aluminio de espesor de 1 mm, permitiría reducir el ruido de 92 dBA a 77 dBA a 0,50 m de la misma y el nivel de atenuación total luego de considerar la pérdida por transmisión sería de 58 dBA, los 220 paneles de lana de vidrio anclados al techo del galpón dispuestos a dos caras, permitirían reducir el ruido de 95 dBA a 80 dBA a los 6 m de distancia y a los 24 m se encontraría en 76 dBA, en el caso del revestimiento de aluminio de espesor 1 mm y vidrio de espesor 6 mm de la fachada frontal de las oficinas, disminuiría el ruido de 94 dBA a 75 dBA a 10,0 m de la base y el nivel de atenuación total luego de considerar la pérdida por transmisión sería de 58 dBA aplicando adición de niveles sonoros entre las tres triangulaciones.
- Las medidas administrativas u organizativas como pausas activas o pasivas en un ambiente silencioso, apagar las fuentes de ruido si no se necesitan, informar a los presentes si se va a realizar una actividad ruidosa, la señalización, la formación e información así como la vigilancia de la salud, deben ser parte de la gestión del ruido, ya que, permiten reducir el tiempo de exposición de los trabajadores.
- Los protectores auditivos deben ser la última opción a considerar cuando de medidas de control se trata, esto debido a que es un elemento ajeno al cuerpo humano y resulta incómodo al usuario, entonces, si se logra implementar pronto las medidas antes descritas, solo se requeriría el uso de protectores auditivos en los primeros 3 m alrededor al foco de ruido como se muestra en la Figura 4, mientras dure la actividad 1 o las dos fuentes de ruido se encuentren funcionando al mismo tiempo.
- Para reducir la incidencia de ruido mientras se logra implementar las medidas de control en la fuente y en el medio de transmisión, se debe usar los protectores auditivos en todas las actividades de la 1 a la 7, con lapsos de descanso por actividad, máximo de 15 min, porque de no hacerlo la exposición diaria superaría los 84 dBA.

- La eficacia de los protectores auditivos, tipo orejera Sonis 3 y Sonis C así como los protectores auditivos tipo tapón 3M 1100/10 y 3M Ultrafit brindan el mismo nivel de atenuación luego de los 70 min de no uso, donde el no uso se considera 10 min en cada actividad y no de forma seguida o continua, y la mayor eficacia de entre todos los protectores auditivos analizados, es el Sonis 3 siempre que no existan períodos de no uso durante la jornada laboral de 8 horas.
- El nivel de presión sonora equivalente diario de 89 dBA que reciben los receptores de los dos puestos críticos del área técnica se vería reducido en 9 dBA si utilizan los protectores auditivos durante el desarrollo de sus actividades en el laboratorio con períodos de descanso máximo de 5 min.
- Otro aspecto a tomar en cuenta es la distribución de ambientes (laboratorio - oficinas) porque el ruido distrae y molesta, cosa que impide desarrollar las actividades laborales administrativas de forma apropiada, de ser posible lo ideal sería reubicar las oficinas de tal manera que estas no se encuentren dentro del galpón donde se desarrollan las actividades de laboratorio, con ello el número de personas expuestas disminuiría y a su vez el personal técnico podría descansar en zonas libres de ruido.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar un plan de prevención de riesgos laborales general, así como un plan de emergencias en el CCICEV, para evitar situaciones que puedan afectar a los trabajadores, visitantes, a las instalaciones y al medio ambiente velando así por la continuidad de actividades laborales.
- Establecer un programa de vigilancia de la salud en el que se realice exámenes médicos auditivos al inicio y fin de gestión, así como, de control periódico cada 3 años, para cumplir en cierta forma las medidas administrativas.
- Formar a los trabajadores mediante charlas relacionadas a seguridad en el trabajo para que puedan conocer los riesgos a los que se encuentran expuestos y así evitar actos o condiciones inseguras, siendo de igual forma parte primordial en cuanto al cumplimiento de las medidas administrativas.
- Realizar pausas activas y pausas pasivas de ser el caso, para que las personas puedan despejar su mente y reducir el estrés que puedan llegar a sentir.
- Generar buenas prácticas laborales en las cuales se comprometan los trabajadores de forma responsable con su seguridad y la de terceros.
- Implementar conductas de seguridad colectiva evitando conductas competitivas, esto permitirá el crecimiento del grupo de trabajo y la valoración de todos sus miembros.
- Evaluar la contaminación laboral por emisión de gases para futuras investigaciones en el CCICEV.

REFERENCIAS

- Baraza, X., Castejón, E., y Guardino, X. (2014). *Higiene Industrial* (1era ed.). Barcelona, España: UOC.
- Cahueñas, R. (2018). *Diseño de una cabina insonorizada para un Laboratorio de calibración de equipos de Monitoreo de ruido*. Obtenido de https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/31772/2/TESES%20FINAL_RODRIGO%20CAHUE%C3%91AS_AGOSTO%202018.pdf. (Diciembre, 2019)
- Chávez, J. (2006). Efectos del ruido sobre la salud. *Ciencia y Trabajo*. Obtenido de http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/patt/3_Contaminacion_Fisica/3_ruidoeffectos.pdf (Diciembre 2019).
- Cortés, J. (2012). *Seguridad e higiene*. (10a. ed.). Madrid, España: Tébar Flores.
- Delgado, S., Ena, T., Ena, B., y Martín, B. (2010). *Formación y orientación laboral* (1era ed.). Madrid, España: Paraninfo.
- Falagán, M. (2008). *Higiene Industrial Agentes físicos y actividades especiales* (2). Oviedo, España: Fundación Luis Fernández Velasco.
- Henao, F. (2014). *Riesgos físicos I ruido, vibraciones y presiones anormales* (2da ed.). Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones.
- INSHT NTP 270. (s/f). NTP 270. Evaluación de la exposición al ruido. *Determinación de niveles representativos*. Obtenido de https://www.insst.es/documents/94886/327166/ntp_270.pdf/9c674732-ce77-481f-8c38-ffc03579bb75 (Agosto, 2019).
- INSHT. (2000). *Evaluación de riesgos laborales*. Obtenido de: https://www.insst.es/documents/94886/96076/Evaluacion_riesgos.pdf/1371c8cb-7321-48c0-880b-611f6f380c1d (Diciembre, 2019).
- INSHT. (2003a). *Manual para la evaluación y prevención de riesgos ergonómicos y psicosociales en PYME*. Obtenido de: <https://www.insst.es/documents/94886/96076/evaluacionriesgospy me/391f8fb1-d5dd-4a59-af90-b52d15d32633> (Agosto, 2019).
- INSHT. (2003b). *NTP 638 Estimación de la atenuación efectiva de los protectores auditivos*. Obtenido de: https://www.insst.es/documents/94886/326775/ntp_638.pdf/ec7cda7b-d636-48de-8d05-020cd25857a9 (Agosto, 2019)
- INSHT/INSST. (2012). *NTP 951 Estrategias de medición y valoración de la exposición a ruido (II): tipos de estrategias*. Obtenido de <https://www.insst.es/documents/94886/326879/951w.pdf/fc57e51d-5251-4662-ba16-e1b3a6a8706d> (Agosto, 2019).
- ISO. (2018). *Norma Internacional ISO 45001. Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo*. Ginebra, Suiza: ISO
- ISTAS, I. S. (s.f.). *Evaluación de riesgos laborales*. Obtenido de: <https://istas.net/salud-laboral/actividades-preventivas/evaluacion-de-riesgos-laborales>. (Agosto, 2019).
- Presidencia de la República del Ecuador. (1986). Decreto ejecutivo 2393: *Reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo*. Obtenido de: <http://www.trabajo.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2012/12/Reglamento-de-Seguridad-y-Salud-de-los-Trabajadores-y-Mejoramiento-del-Medio-Ambiente-de-Trabajo-Decreto-Ejecutivo-2393.pdf>. (Enero, 2020).
- Suter, A. (2012). Capítulo 47. *Ruido*. Obtenido de: <https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+47.+Ruido> (Agosto, 2019).

BIOGRAFÍAS



Gisela Carrera, Ingeniera Civil mención Estructuras, por la Escuela Politécnica Nacional en el 2016, Magister en Seguridad Industrial, mención Prevención de Riesgos Laborales, por la Escuela Politécnica Nacional en el 2020, se ha desempeñado como Asistente de Laboratorio de Ensayos, Asistente Técnico de Obras Públicas,

Supervisora de Proyectos, Profesora Ocasional a tiempo completo, Técnico Docente Politécnico a tiempo completo y actualmente se desempeña como Consultora de Obras Civiles.



Francisco Salgado, Ingeniero Químico, por la Escuela Politécnica Nacional en el 2002, Magister Europeo en Energías Renovables por la Universidad de Zaragoza en el 2008, Especialista en Radioquímica y Aplicaciones Nucleares, cursó sus estudios de Doctorado en la Universidad Nacional de San Martín

de Argentina, fue Responsable de la Maestría de Seguridad Industrial de la Escuela Politécnica Nacional, fue Docente de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial y la Universidad SEK del Ecuador, dejó un gran legado a cada uno de sus estudiantes, actualmente es parte de los buenos recuerdos de cada una de las personas que pasaron a lo largo de su vida.



William Villacis, Doctorado de la Universidad de Buenos Aires área Ingeniería (en curso). Especialista en Seguridad Nuclear por la Universidad de Buenos Aires (2019). Especialista en Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación por la Universidad de Buenos Aires (2017). Magíster en Seguridad Industrial y Salud Ocupacional por

la Escuela Politécnica Nacional (2013). Ingeniero Químico por la Escuela Politécnica Nacional (2004). Se desempeña como docente universitario en las áreas de Higiene Industrial 2 y Fundamentos de Prevención de Riesgos Laborales para posgrado y Seguridad Industrial y Salud Ocupacional para pregrado en la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria. En la actualidad trabaja como Docente, Oficial de Seguridad Radiológica, Presidente Suplente del Comité de Seguridad e Higiene del Trabajo por parte del empleador en la Escuela Politécnica Nacional y es Coordinador de la Maestría en Seguridad Industrial Mención Prevención de Riesgos Laborales.

A Holistic Decision-Making Process to Improve the Productivity of Public Transportation in Cuenca-Ecuador

Cazorla, Patricia^{1,*} 

¹Universidad de Cuenca, Facultad de arquitectura, Cuenca, Ecuador

Abstract: National governments are responsible for guaranteeing the accessibility, affordability, availability, and social acceptability of public services. If urbanization grows in an unplanned way requires more investments to extend the current infrastructure or build new ones. Since, in general, cities in developing countries lack sufficient economic resources, it is necessary to maximize the productivity of the current infrastructure to satisfy additional demand. Boosting asset utilization, optimizing maintenance planning, and expanding demand management measures could take advantage of the wasted infrastructure. The local government of Cuenca-Ecuador aims to expand the public transport supply throughout the urban area (77.5% of spatial cover and 92% of population cover in the urban area), using the maximum network capacity. Thus, it requires a holistic and inclusive framework that guarantees the implementation of the project. Studies in urban planning have shown that the productivity of the public transportation network depends on the network and activity systems. The application of actor-network theory demonstrated that the proposed solution (a package of 22 measures related to the transit-oriented development and demand-management measures) is not only necessary but feasible. The analysis allowed identifying ten interested actors and one non-interested actor. Moreover, the method highlights the role of each actor to counteract potential opponents and meet the target by 2030.

Keywords: Productivity, public transportation, actor-network theory.

Un Proceso Holístico de Toma de Decisiones para Mejorar la Productividad del Transporte Público en Cuenca-Ecuador

Resumen: Los gobiernos nacionales son responsables de garantizar la accesibilidad, asequibilidad, disponibilidad y aceptabilidad social de los servicios públicos. Si la urbanización crece de forma no planificada, se requieren más inversiones para ampliar la infraestructura actual o construir nuevas. Dado que, en general, las ciudades de los países en desarrollo carecen de recursos económicos suficientes, es necesario maximizar la productividad de la infraestructura actual para satisfacer la demanda adicional. Impulsar la utilización de activos, optimizar la planificación del mantenimiento y ampliar las medidas de gestión de la demanda podría aprovechar la infraestructura desperdiciada. El gobierno local de Cuenca-Ecuador tiene como objetivo ampliar la oferta de transporte público en toda la zona urbana (77,5% de cobertura espacial y 92% de cobertura poblacional en el área urbana), utilizando la máxima capacidad de la red vial. Por lo tanto, requiere un marco holístico e inclusivo que garantice la implementación del proyecto. Los estudios de planificación urbana han demostrado que la productividad de la red de transporte público depende de la red y los sistemas de actividad. La aplicación de la teoría de la red de actores demostró que la solución propuesta (un paquete de 22 medidas relacionadas con el desarrollo orientado al tránsito y las medidas de gestión de la demanda) no solo es necesaria sino factible. El análisis permitió identificar diez actores interesados y un actor no interesado. Además, el método destaca el papel de cada actor para contrarrestar a los posibles oponentes y cumplir el objetivo de desarrollo para el 2030.

Palabras clave: Ramp metering, Sistema dinámico de control de tráfico, Beneficios, Contra indicadores.

1. INTRODUCTION

According to ONU-Habitat between 2000 and 2050, the quantity of urban space should be doubled in developed countries and expanded by 326% in developing countries to accommodate people (United Nations, 2013). The urban

boundary expansion towards undeveloped land near a city requires the extension or construction of new infrastructures, demanding relevant investments. Nevertheless, developing countries lack economic resources. Then, there are other necessary measures to accomplish with the required new

*patricia.cazorla@ucuenca.edu.ec
Recibido: 11/07/2019
Aceptado: 05/10/2021
Publicado: 01/11/2021
10.33333/rp.vol48n2.03
CC 4.0

investments. This reality demands the application of urgent measures to ensure a sustainable development.

Sustainability means to satisfy as much as possible dialy needs using as little as possible non-renewable or difficult to renew resources, including land use and infrastructure networks. Then, the efficient usage of infrastructure networks could cover the increment in the demand without an additional budget. For instance, the McKinsey Global Institute argues that “Improving infrastructure productivity could save \$1 trillion a year” (McKinsey Global Institute, 2013). They showed how boosting asset utilization, optimizing maintenance planning, and expanding the use of demand-management measures could generate savings of up to \$ 400 billion a year.

As infrastructure networks are public values, national governments are responsible for guaranteeing the accessibility, affordability, availability, and social acceptability of public services. Thus, authorities and policymakers play a crucial role in the improvement of infrastructure productivity. They should remove obstacles to the effective participation of all stakeholders in the decision-making process. This calls for a more holistic and inclusive framework for the planning, design, and provision of urban mobility systems and services.

This framework could be established through the application of actor-network theory. This method allows for mapping and analyzing the physical and social complexity of infra-systems. The methodology includes the identification of interested actors, non-interested actors, the formal relations between them, and interdependencies (Boelens, 2015; D. Sage, 2011).

Ecuador is a developing country, according to the World Bank’s 2021 list (World Bank, 2021). The lack of an adaptive urban planning approach causes the unbalance of the population inside the urban area, and therefore, the waste of infrastructure networks. Moreover, the lack of adequate institutional capacity and corruption-free procurement process for providing public infrastructure and services pose immense challenges in advancing sustainable development.

This article shows how the application of actor-network theory helps to define such a framework to improve the productivity of public transportation in the city of Cuenca-Ecuador. The solution will consist of a combination of transit-oriented development and demand-management measures. The implementation of the solution will allow extending the public transport service to all urban population without any substantial investment.

The article is outlined as follows. The second section introduces the Sustainable Development Goal, while the subsequent section presents the challenges to tackle in Cuenca-Ecuador. Section four provides the list of involved actors, and section five presents a description of the public values at stake. Section six shows the framework for the local government to meet the specified infrastructure challenge by 2030, and section seven describes the role of the local government in the actor-network. Finally, section eight presents a discussion and conclusions.

2. TOWARDS A MORE SUSTAINABLE FUTURE

In 2015, the United Nations adopted a set of seventeen goals as part of a new sustainable development agenda. Goal number eleven is to make cities inclusive, safe, resilient, and sustainable. The purpose by 2030 is to provide access to safe, affordable, accessible, and sustainable transport systems for everyone. Actions should include improving road safety and expanding public transportation. This, with special attention to the needs of those in vulnerable situations, women, children, persons with disabilities, and the elderly (United Nations, Sustainable Development Goals, 2017).

Expanding public transportation improves the livability of the city. Firstly, it is a sustainable mode of transport since greenhouse gas emissions per bus are about one-twelfth of the car (United Nations, 2013). Secondly, it increases the accessibility of jobs, education, health services, and other facilities. Thirdly, it is demonstrated that people with access to public transport, work more days annually than those without such an access (United Nations, 2013). Furthermore, public transportation supports community cohesion by increasing the quantity and quality of interactions between people. And finally, public transport tends to increase physical activity as most trips include walking or cycling links.

Considering that land use influences travel behavior and transport systems influences the way cities to grow, a trade-off between accessibility and livability could be reached by the combination of transit-oriented development and demand management measures. This means that cities should be more compact (Boussauw et al., 2012), with a mix of land use and prioritize sustainable modes such as public transportation and active mobility (walking and cycling). Experiences worldwide demonstrate that this could reduce 10 % to 20 % in car dependency (United Nations, 2013).

Ecuador is a state member of the United Nations since 1945 (United Nations, Member States, 2017). Therefore, Cuenca must meet this goal as well.

3. CHALLENGES TO BE TACKLED

The city of Cuenca lies in the southern part of Ecuador in the sierra of the Andes, with elevation varying from 2350 to 2550 m.a.s.l. The urban area occupies 70.59 km² and has a population of 636996 inhabitants (INEC, 2020). Low densities and uncontrolled growth in the periphery characterize this area (GAD Municipal Cuenca, 2016).

Four rivers cross the city, Tomebamba, Yanuncay, Tarqui, and Machángara. These rivers drain in the Amazon River watershed. The city is surrounded by mountains on all sides with passes to the west, south, and east. Tourism, industry, and agriculture are the principal sources of its economic development (IDOM-GAD Municipal, 2015).

The Tomebamba River divides Cuenca into two parts. At the top, corresponding to the old city, working, and commerce activities are predominant, since here relevant government and some educational institutions lie. In the lower part, corresponding to the modern city, dwelling activities are the most important. Besides, the urban area exerts a great

attraction to a regional level since there are localized major facilities such as the University of Cuenca, the Regional Hospital Vicente Corral Moscoso, and The Supreme Court of Justice. Owing to the architectural wealth of its city center, UNESCO listed Cuenca as a World Heritage Trust site in 1999.

Currently, the public transport (PT) supply entails buses (primary mode from a social perspective), taxis, pickups and since May 2020, the Light Rail Transport (LRT) 4 Ríos has been operating (GAD Municipal Cuenca, 2016). The LRT has a length of 20.4 km.

Two public bus systems run in the city (GAD Municipal Cuenca, 2016); the first is a trunk model that runs in the north-south direction with buses that feed it in the east-west direction. The transfer stations are in the Feria Libre (Zone 39

Figure 1) and the Buses Terminal (Zone 10 Figure 1). These points are not the beginning or end of the operation, but crossing points where the exchange could take place. The second operating bus system is composed of conventional lines, which do not have a defined model, describing diffuse paths in its route, although individually describes a diametrical behavior.

The spatial coverage of public transportation on urban territory is 77.5%, while the population cover is 92% (GAD Municipal Cuenca, 2016). Such limitations restrict access to opportunities for urban dwellers in Patamarca, Sinincay, Narancay, Rayoloma, Molinopamba and Capulispamba (zones 36, 21, 30, 24, 32, 38, 31, 49 in Figure 1), with implications for their overall wellbeing and progress. In these zones, the population density varies between 800 and 3600 inh/km².

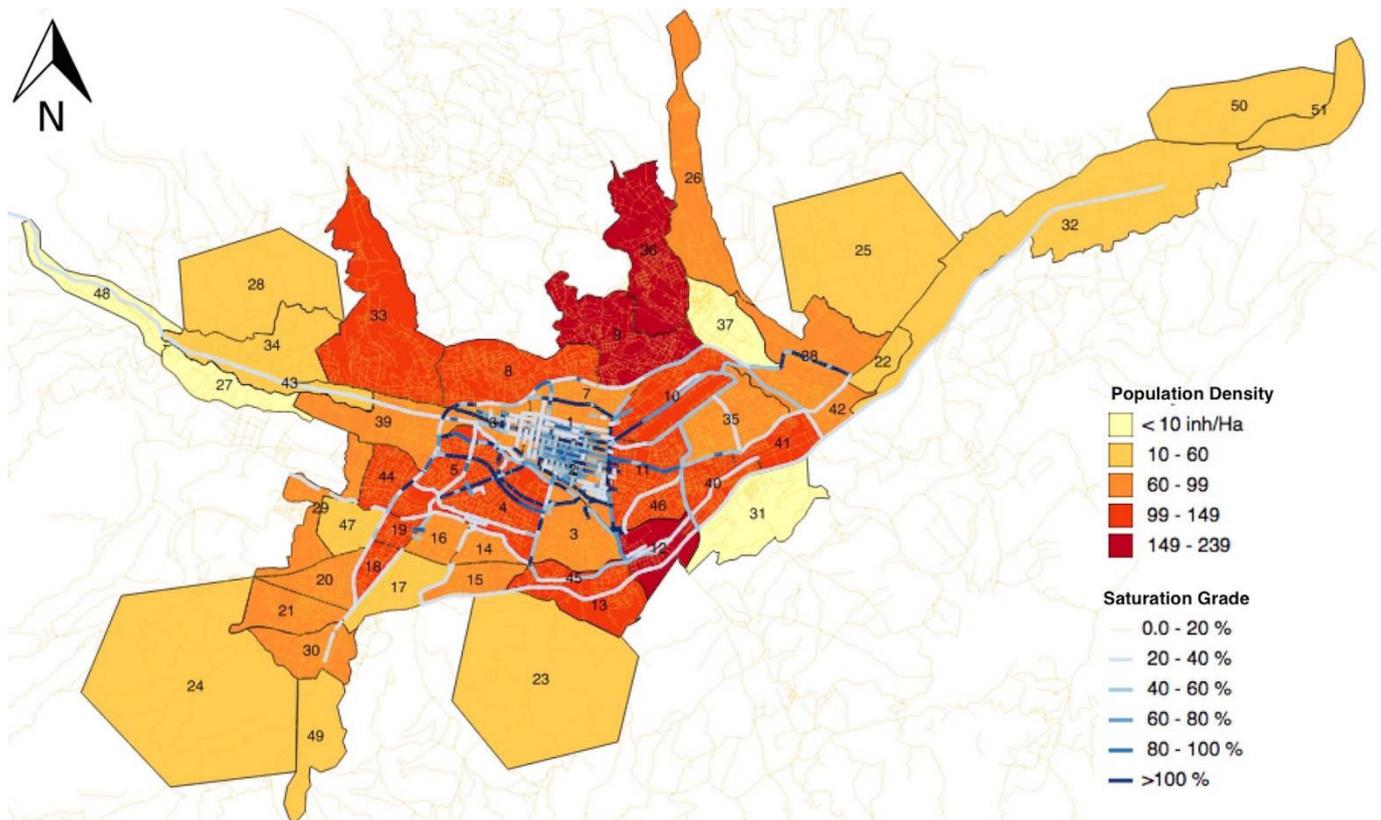


Figure 1. Map of the city of Cuenca. Colors represent the population density according to the Ordinance for land use planning promulgated since 2003 and currently valid. Blue lines show the saturation grade of the road infrastructure. The intensity of the color is proportional to the saturation grade.

Source: Generated by the author

Buses cover 866.73 km every day with an average frequency of 7 min. 31% of buses run with a mean speed of 10 and 17 km/h, 55% between 17 and 24 km/h, and 14% of the bus lines run with an average speed higher than 24 km/h (GAD Municipal Cuenca, 2016).

Regarding the rolling stock, this mode encompasses 475 units with a global capacity for 36560 passengers; 17248 seated, and 19312 legal standees. 54% of the units have an average capacity of 90 passengers, and 52% has a mean age of 10 years (useful legal life is 20 years for the urban public transport service).

An important performance indicator is the occupancy ratio of the public transport system. It corresponds to the relation between the number of passengers and the traveled distance per vehicle. The public transport system in the urban area has an average of 4.2 passengers/veh-km (a value of 4 passenger/veh-km covers the operational costs per km in Cuenca (GAD Municipal Cuenca, 2016)). However, 9 bus lines from the 29 in operation, do not even cover their operational costs due to the low passenger demand.

Concerning the travel time, 17.3% of trips last between 1 to 5 min and 34.1% between 6 to 10 min (GAD Municipal Cuenca, 2016). Thus, non-motorized modes could execute these trips to release traffic pressure (0.17 - 6 km). Considering the

relationships between the supply and the demand, a new configuration of bus lines is necessary.

Another indicator is the saturation grade of the road infrastructure. It corresponds to the relation between road capacity and the demand in every corridor. Plotting the saturation grade allows identifying those corridors that are being sub-used. Figure 1 shows the saturation grade of the road infrastructure within the urban area. This percentage represents the ratio between the demand and the road capacity during the peak hour.

Moreover, the relationship between population density and saturation grade allows identifying those areas where construction of housing projects should be encouraged, taking advantage of the road infrastructure that is being wasted.

According to P MEP 2015-2025 (GAD Municipal Cuenca, 2016), there are 600000 daily local trips in the urban area. 70% of these trips are recurrent (same route and same hour). Regarding the modal split, the municipality reports that 32% of them are made walking, 31% with a public bus, 32% with a private car and 5% with other modes. The occupancy rate for car trips is very low (GAD Municipal Cuenca, 2016).

According to the Public Mobility Company, EMOV EP., in 2014 the transport sector was responsible for 95% of carbon oxide emissions, 71.2% nitrogen oxides, 30.2% sulfur dioxide, and 55.6% microscopic suspended particles (MP10) (GAD Municipal Cuenca, 2016; IDOM-GAD Municipal, 2015; EMOV EP., 2017). These pollutants cause serious health problems that, the World Health Organization (WHO) estimates, that in Ecuador, 33.1% of the deaths registered in 2019 were directly related to causes derived from environmental pollution (Revista Opción S-Isafas Campaña, 2019).

3.1 Performance goals for 2030

According to the Ecuadorian Constitution and the Organic Law of Land Transport, Traffic and Road Safety (LOTTSV), the Municipality of Cuenca is responsible for providing the public transportation service in the entire city (ANT, Ley Orgánica Reformatoria a la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial., 2015). A private operator provides the public transport service. However, the lack of urban planning makes that public transport operators avoid supplying a suitable service if they do not receive additional compensation. Thus, the lack of public transport services encourages the use of the private car to satisfy transportation needs (GAD Municipal Cuenca, 2016; Cuenca, 2015; Busch-Geertsema & Lanzendorf, 2017).

In agreement with goal number 11 of the United Nations, the Municipality of Cuenca must provide access to a safe, affordable, accessible, and sustainable public transport system for all citizens in Cuenca. The municipality should accomplish this by improving the productivity of the current network by managing the PT-demand and making the investment as small as possible.

Urban planning and land-use policies, together with demand management and fiscal measures, could encourage a modal shift towards more sustainable mobility (United Nations, 2013). Another alternative is the management of parking supply. Increasing parking costs has proved to be effective in discouraging the private vehicle if it is incorporated in the overall city-wide transport strategy (Moore et al., 2010; Litman, 2018).

The problem formulation, causes, and dilemmas allow us to identify some fundamental actions to meet the posed goal.

1. Increase the PT-demand, especially in those bus lines in which the number of passengers/veh-km is lower than 4.
2. Extend the public transport supply to Patamarca, Sinincay, Narancay, Rayoloma, Molinopamba, and Capulispamba (zones 36, 21, 30, 24, 32, 38, 31, 49 in Figure 1).
3. Reduce the total travel cost for public transport service.
4. Diminish private car dominance.

4. NETWORK OF ACTORS

Actor-network theory is the most suitable approach to map the constantly shifting networks of relationships among human and nonhuman actors involved in the expansion of the spatial coverage of the public transport service in Cuenca. The actor-network theory allows systematically exploring the socio-political environment in which the problem is concerned. It entails knowing who will support the proposed solution, who is against it, who has the power to block the strategy, and who can offer social support to it. Moreover, the policy for problem-solving should consider the concerns and issues of all actors.

The Actor-network theory has been used in several research areas in which a holistic perspective is necessary. For instance, (Valderrama A. & Jrgensen U., 2008) proposed a framework based on actor-network theory to account for the interactions of existing and new transport systems. Through the analysis of the Transmilenio in Bogotá and the Metro in Copenhagen, the authors exhibited that the design, construction, and operation of urban transport systems constitute a process where the actors involved negotiate and actively distribute agency in the components of the new system. Sage et al. (2011) applied the actor-network theory to identify human and non-human actors that could assure the success of major construction projects.

Like those authors, Elbanna (2013); MacNeil & Mills (2015); De Albuquerque (2015) used a case study to show the benefits of the actor-network theory.

Burga & Rezanía (2017) applied the actor-network theory to collect data and analyze it for the enactment of accountability in the renovation project of a historical building at a public university. The relationships between stakeholders exhibit the sequence of accountability in each stage of the project from the onset to the fulfillment of the project.

Opping (2017) provides a conceptual model of stakeholder management performance attributes to measure project success in the industry by evaluating the level of stakeholder and organizational satisfaction in construction project delivery.

Sarker et al. (2019) conducted a systematic case study to exhibit the willingness to walk to a public transport station. The actor-network theory was applied to map the relationships between the involved stakeholders. This allowed identifying the factors that could improve the accessibility to the public transport service and formulating strategies and standards for the sustainable planning of the public transportation system in Munich.

Dudley et al. (2019) explored the dynamics of how a technological innovation failed as a niche innovation in terms of the socio-technical transitions framework. Through the Mobike dockless bicycle hire scheme in Manchester showed that poor participatory practice in the earlier stages of the scheme, together with the inability of the innovator to respond appropriately through the participatory exchange, including the direct participation of the public through the technology, in the implementation stage, are the reasons for failure.

Those studies highlight the importance of the complete identification of all stakeholders: to form alliances to strengthen the project and to facilitate its execution, or to take timely measures that weaken possible opposition.

Table 1 shows the network of actors that are involved in the improving of the PT-productivity in Cuenca. The network of actors allows identifying the political, legal, financial, and technical resources available for the execution of the actions.

Table 1. The network of actors, interests, and means that were identified to improve the productivity of the public transportation service in Cuenca

Actors	Interest	Means
Minister of Transportation and Public Works	Provide access to PT to all citizens in a safe, efficient and affordable way.	Legislation and financial resources at national level.
National Transit Agency (ANT)	Contribute to the national development, through the regulation, planning, and control of land transport, traffic and road safety, through the formulation and application of laws, rules, policies, plans, programs, and projects that guarantee the satisfaction of users.	Control, monitoring and financial competences at national level.
Mayor of Cuenca and the Cantonal Council	Improve the productivity of the transportation network. Increase the PT-accessibility to the urban area making the small investment as possible.	Legislation and financial resources at local level.

Mobility Department (DMT)	Improve the productivity of the public transportation system by managing the demand (Public-transport-oriented growth). Implement measures and strategies to increase the level of service of PT.	Knowledge and technical resources.
Public mobility company (EMOV EP)	Execute the projects of the Mobility Department.	Legal competences to call for tender.
Urban Planning Department (SEGEPLAN)	Assure a balanced growth in the urban area, avoiding the urban sprawl and the formation of slums. Take advantage of the ordinance to consolidate areas with low population density (83000 housing deficit until 2030 (Cuenca I.-G. M., 2015)). Establish a new policy to control the price of the available urban soil to avoid speculation (10.5 % of the urban soil is available (Cuenca I.-G. M., 2015)).	Knowledge and technical resources.
Transport Chamber of Cuenca (Representing to the public transport operators.)	Assure positive revenues for all its associates. Get subsidies for bus lines in which the demand does not cover the operational costs.	Operational resources and working force (rolling stock, bus drivers, data about the demand and the collection)
Parking operators	Assure positive revenues for their business, thus they are in favor of the use of a private car.	Citizen participation
Private investors	Assure positive revenues for their business, thus they are in favor to promote housing projects in places with network infrastructure.	Publicity of housing programs. Citizen participation
Public transport users	Better, safety, reliable PT-service without an increment in the fee. (31 % in the modal split)	Citizen participation
Captive private car users	Access to public transportation. (8 % of the urban population has no access to PT)	Citizen participation

Source: Generated by the author

5. PUBLIC VALUES AT STAKE

Since the problem involves a public service (Public Transportation), it is necessary to review the current situation of the involved public values at stake. The proposed solution strategy should improve these conditions.

The current situation is as follows:

Affordability: The Ecuadorian government reduces the supply cost of public transportation by subsidies. These grants include half of the fee (current fee is 0.30 USD/trip) to pregnant women, students, persons with disabilities, and the elderly. Besides this, there is a subsidy for imported tires for buses and a new rolling stock purchase for buses if the previous one is scrapped (Ministerio de Finanzas, 2019; El Universo, 2019). The government eliminated the subsidy for fuels in May 2020 (Escobar, 2020).

As it was mentioned, subsidies are not addressed to improve the level of service of public transportation.

Safety: Road traffic accidents are the third cause of death in Ecuador (El Universo, 2018). Malpractice, recklessness, speeding, and driving drunk are the main factors that contribute to this reality. The ANT reported 1258 crashes in Cuenca during 2018, which resulted in 38 deceased, which represents 1.78 % at the national level (ANT, Estadísticas de transporte terrestre y seguridad vial, 2018). There are no statistics only about public transport.

Accessibility: Accessibility determines the equity of people to accomplish their essential needs. The grade of the accessibility of a zone boots its economic development.

The accessibility to transit stations or stops from their catchment area determines the public transport accessibility. Another factor that determines public transport accessibility is the geographical coverage of public transport within a given travel time budget. i.e. a 400-m walkable catchment for bus stops is suggested and backed by several pieces of evidence (Bertolini et al., 2005). In Cuenca, there are zones with a bus stop every 300 m. As it was mentioned, 8 % of the population has no access to the public transport and, 22.5 % of the urban territory has no infrastructure for this service.

Quality: Statistic information about the real condition of the population is very limited since the scarce documents refer to national censuses which are executed approximately every ten years. However, studies such as the presented in Mejía et al. Mejía et al. (2015) reveal that the general perception of the quality of the public transport service is in average 14.14 in the scale 0-20. In this scale, 0 means unacceptable, 10 acceptable, and 20 excellent. The lower perception is about the security against assaults inside the rolling stock (7.44) and for the driver training (7.96). On the contrary, the ticket price reached the highest perception (12.85). Regarding the speed and travel time, the perception is positive, with average punctuation of 10.22.

Sustainability: Sustainability in public transport means to satisfy as much as possible demand, using as little as possible of non-renewable or difficult to renew resources, including land use and infrastructure. Then, according to the indicators mentioned in section 2 (spatial cover, PT-accessibility, occupancy ratio, travel time, saturation grade of the road infrastructure, CO2 emissions, etc.), the public transportation in Cuenca requires additional measures to become sustainable.

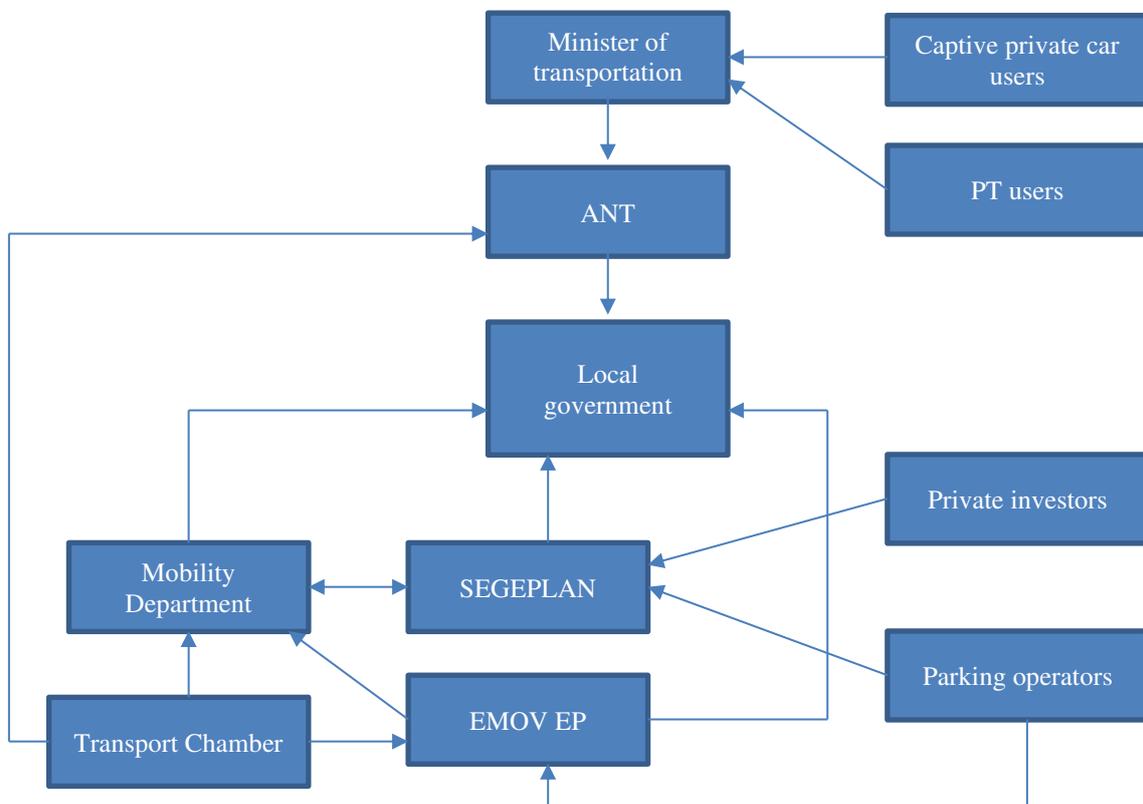


Figure 2. Map of the formal relations between stakeholders.
Source: Generated by the author

6. FRAMEWORK FOR THE MUNICIPAL GOVERNMENT TO MEET THE SPECIFIED INFRASTRUCTURE CHALLENGE BY 2030

Designing an approach that assures solving a posed problem, requires identifying the interests, desired situation, current situation, causes for detected gaps, preferred solutions, and own means of every involved actor (Maldonado et al., 2010; Tiwana & Keil, 2009; Turner & Zolin, 2012; Rezania & Ouedraogo, 2013).

The inventory of interests shows that all stakeholders, except for the parking operators, are dedicated actors. They could be strong allies to improve PT-productivity and extend the PT-service to the entire urban population. Therefore, the municipal government should handle them to undertake the project. The Minister of transportation and public works, and the ANT have established the necessary legislation to grant the competence of transit and transportation to the local government. Together with this, the additional budget that each local government should receive to exert this jurisdiction has been established, so it is up to the municipality to comply with and enforce what is stipulated in the LOTTSV valid since 2014 (ANT, Ley Orgánica Reformatoria a la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial., 2015).

Likewise, the identification of gaps in the current situation, their causes, and the preferred solutions helped to list some specific activities to success with the actions enumerated in subsection 3.1.

Parking operators could be potential critics of the project, especially those who have their business inside the city center. Therefore, the local government and the Cantonal Council should establish measures to boost the sequential change of the core business; some alternatives could be providing incentives for the implementation of cycling facilities, such as lockers, douches, maintenance workshops, etc.

With the Transport Chamber of Cuenca, the public transport operators should show their financial model to define measures that allow the extension of the PT-service without jeopardizing its business.

7. ROLE OF THE MUNICIPAL GOVERNMENT IN THE ACTOR NETWORK

In the mapping of the formal relations between the involved actors, we considered national and local guidelines, laws, and ordinances. Based on this statutory framework, Figure 2 shows the hierarchy of the actors that should be respected.

As we can see in Figure 2, the local government is responsible for complying and enforcing all the dispositions of the Minister of transportation and public works and the ANT. At the same time, the local government is responsible for organizing, planning, and coordinating through the local authorities the necessary measures for the implementation of such dispositions. The actor-network of Figure 2 highlights that the Minister of transportation and public works and the ANT are strong allies of the local government. They, based on

the current legislation, could use financial resources from the national budget to fund the investment. Table 2 shows a list of the actions to be taken with the people or entities responsible for their execution.

Table 2. List of tasks and responsible for every required measure

MEASURES	ACTIONS TO UNDERTAKE	RESPONSIBLE
1. Balance the PT-demand during the journey.		
1.1 Increasing the population density in areas in which the current road infrastructure is sub-used and there is vacant land.	Inventory of vacant land.	SEGEPLAN, DMT
1.2 Reformulate the routes of the bus lines in a way that every origin zone connects efficiently with its principal destination.	Origin-destination survey per zone and per bus line.	DMT, EMOV EP
1.3 Redistribute as possible the main interest points (attractors of trips) among areas with higher PT-demand.	Inventory of interest points per zone.	SEGEPLAN, DMT
1.4 Increasing reliability in the public transport system.	Establish a contingency plan for a possible obstacle in the route. Real-time coordination with the traffic operation center.	EMOV EP, Transit Chamber of Cuenca
1.5 Respecting the bus stops.	Road safety education programs in schools and high school, and training programs for bus operators.	Transit Chamber of Cuenca, PT users, Education department
1.6 Improve the payment method.	Enhance the use of the electronic card by advertising campaigns and road safety education programs.	EMOV EP, Transit Chamber of Cuenca, Education department
1.7 Implementing safety systems inside the units, for instance, video cameras (front and back), tickets validators, emergency buttons.	Control and monitoring of the installed devices.	EMOV EP, Transit Chamber of Cuenca
1.8 Enhance the training of the conductors.	Driver education and monitoring programs.	EMOV EP, Transit Chamber of Cuenca

1.9 Provide a service with warmth and quality.	Driver education and monitoring programs	SEGEPLAN
2. Supply the PT-service to all the urban area.		
2.1 Consolidate areas with scarce population by the promotion of affordable housing programs.	Improve the coordination between the planning and the control department based on the products of 1.1. Provide incentives to increase the number of dwellings per lot.	SEGEPLAN, DMT
2.2 Reformulate the routes of the bus lines.	Based on the products of 1.2.	DMT, EMOV EP
2.3 Redistribute bus stops.	Based on the products of 2.2.	DMT, EMOV EP
3. Reduce the total travel cost for public transport service.		
3.1 Improving the conditions of the road infrastructure in which the buses run.	Based on the products of 1.2.	DMT, OOPP
3.2 Implement priority policies for public transport in the main corridors.	Using the data of the traffic operation center (traffic lights, horizontal and vertical signaling, physic elements).	DMT, OOPP
3.3 Adjust frequencies in the most demanded routes.	Based on the products of 1.3 and 2.2.	DMT, Transit Chamber of Cuenca
3.4 Extend the public transport service to all urban area.	Based on the products of 1.3 and 2.2.	DMT, EMOV EP
4. Decreasing in the private car dominance.		
Review of the car ownership policy (increase or implement taxes).	Coordinated reduction in the subsidy of fuels for private car users. Severe green taxes, tax per driven kilometer during the peak period inside the congested zones.	Mayor and Cantonal Council
Increasing the total travel time for the private car and giving priority for public transport on the main corridors.	Based on the products of 3.2	DMT, EMOV EP

Reducing parking spots within the congested zones, but augmenting in the borders.	Based on the products of 1.3 and 2.2.	DMT, EMOV EP, SEGEPLAN
Change the perception that car ownership rises social status.	Education programs in schools and high school.	EMOV EP Citizen organizations

Source: Generated by the author

8. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In this study, we explore how the application of actor-network theory allows defining a holistic and inclusive framework for the planning, design, and provision of urban mobility systems to extend the public transport service to all urban population. The framework allows improvements with little investment in Cuenca’s infrastructure. This, by the combination of transit-oriented development and demand-management measures.

The findings of this study suggest that the productivity of the public transportation network depends on the planning configuration of the city. Urban models that consider high population densities and diversity of activities take advantage of the maximum infrastructure capacity, while the closeness of the activities boosts the use of non-motorized modes.

On the contrary, the case study of Cuenca described in section 3, with low population densities and a strong tendency to continue expanding the urban area, wastes the current infrastructure capacity. This model requires a higher investment to cope with the demand of the growing urbanization and extends the commuting distance while it encourages the use of the private car. This, since the PT-service is not efficient due to the low demand.

Besides, the population density and the saturation grade of the road infrastructure in Cuenca show that the concentration of activities in few zones as the Historic Center and the Ejido attracts a higher demand of trips which overcrowd the road infrastructure of buses (17 bus lines of the 29 cross these zones). In addition, the lack of measures to discourage the use of the private car increases congestion levels and its detrimental effects.

The diagnostic of the current situation (section 3) and the review of the involved public values at stake (section 5) allow identifying four fundamental actions to improve the PT-productivity in Cuenca, and to make the city inclusive, safe, resilient, and sustainable to 2030.

The improvement of the PT-productivity service is feasible by the implementation of a package of 22 specific activities that combine transit-oriented development and demand-management measures.

The local government of Cuenca has all the necessary instruments to meet the goal by 2030: moving from captive riders to clients in public transportation by making public transport a lifestyle choice. This requires a strong customer

focus and strong political leadership to negotiate with all stakeholders.

The network of actors involved (Table 1) highlights the importance of citizen participation to ensure that each state contributes positively to each stage of the process (planning, financing, socialization, dissemination, and execution); the necessity of a constant articulation and coordination of the planning, mobility, and urban control departments inside the local government; the importance of to communicate the measures that will be applied, their objective, how will be measured, their impact, and the results of the monitoring. Only a well-informed citizenry of the common benefits that are being achieved in each phase can guarantee social support to the project and its sustainability.

Perhaps, a limitation of this work is related to the lack of knowledge about the business model of the Transport Chamber of Cuenca (private PT operator) to review if the package of measures assures sustainability to the public transport operators.

Further research is needed to study the impact of the COVID-19 on the public transport demand and the change in the activities in the city due to the different restrictions in the pandemic context.

REFERENCES

- ANT, A. N. (2015). *Ley Orgánica Reformatoria a la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial*. Retrieved from Agencia Nacional de Tránsito: <http://www.ant.gob.ec/index.php/ant/base-legal/ley-organica-reformatoria-a-la-ley-organica-de-transport>
- ANT, A. N. (2018). *Estadísticas de transporte terrestre y seguridad vial*. Retrieved from Agencia Nacional de Tránsito: <https://www.ant.gob.ec/index.php/descargable/file/6096-siniestros-diciembre-2018>
- Bertolini, L. L. (2005). Sustainable accessibility: A conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transport Policy*, 12(3), 207–220. 10.1016/j.tranpol.2005.01.006
- Boelens, L. (2015). *Governance of mobile complexity: co-evolutionary management towards a resilient mobility in Flanders. Adaptive mobility: a new policy and research agenda on mobility in horizontal metropolises*. Gent: UGent (In Planning) p.191-209.
- Burga, R. & Rezanía, D. (2017). Project accountability: An exploratory case study using actor-network theory. *International journal of project management*, 35(6), 1024-1036. 10.1016/j.ijproman.2017.05.001
- Busch-Geertsema, A., Lanzendorf, M (2017). From university to work life – jumping behind the wheel? Explaining mode change of students making the transition to professional life. *Transport research part A* 106, 181-196. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.09.016>
- Cuenca, G. M. (2016). *Formulación del plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Cuenca, PDOT tomo I: Diagnóstico sectorial e integrado*. Cuenca: GAD Municipal Cuenca.
- Cuenca, I.-G. M. (2015). *Cambio climático, riesgos naturales y crecimiento urbano en ciudades emergentes y sostenibles: Estudio urbano Cuenca*. Cuenca: Gobierno Autónomo Descentralizado Cuenca.
- De Albuquerque, J.P., Marcel, C. (2015). The tension between business process modelling and flexibility: revealing multiple dimensions with a sociomaterial approach. *J. Strateg. Inf. Syst.*, 24 (3) , pp. 189-202, 10.1016/j.jsis.2015.08.003.
- Dudley, G., Banister, D. & Schwanen. (2019). The dynamics of public participation in new technology transitions: the case of dockless bicycle hire in Manchester. *Built Environment*, 45(1), 93-111.
- El Universo, E. C. (2018, Agosto 17). *Tasa de fallecidos por accidentes de tránsito en Ecuador ha aumentado en el 2018*. Retrieved from El Universo: <https://www.eluniverso.com/noticias/2018/08/17/nota/6908768/ta-sa-mortalidad-accidentes-transito-ecuador-ha-aumentado-2018>
- Elbanna, A. (2013). Top management support in multiple-project environments: an in-practice view. *Eur. J. Inf. Syst.*, 22 (3) , pp. 278-294, 10.1057/ejis.2012.16.
- EMOV EP. (2017). *Red de monitoreo de la calidad del aire de Cuenca*. Cuenca: <https://www.emov.gob.ec/sites/default/files/CALIDAD%20DEL%20AIRE%202017.pdf>.
- Escobar, M. T. (2020, May 19). *Primicias*. Retrieved 07 07, 2021, from <https://www.primicias.ec/noticias/economia/gasolina-diesel-eliminarian-subsidios-bandas-precios/>
- Finanzas, M. d. (2019). *Programación presupuestaria cuatrianual 2016-2019*. Retrieved from <http://www.finanzas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/11/34-Programaci%C3%B3n-Presupuestaria-Cuatrianual-2016-2019.pdf>
- GAD Municipal Cuenca. (2016). *Plan de movilidad y espacios públicos 2015-2025, PMEP*. Retrieved from GAD Cuenca: <http://www.cuenca.gob.ec/?q=node/13696>
- IDOM-GAD Municipal. (2015). *Cambio climático, riesgos naturales y crecimiento urbano en ciudades emergentes y sostenibles: Estudio urbano Cuenca*. Cuenca: Gobierno Autónomo Descentralizado Cuenca.
- INEC. (2020). *Ecuador en cifras*. Retrieved from Insituto Nacional de Estadísticas y Censos: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/inec-presenta-sus-proyecciones-poblaconales-cantonaes/#:~:text=Seg%C3%BAAn%20estos%20datos%2C%20Quito%20en,El%20Oro%20con%202.379%20habitantes>.
- Katta Spiel, C. F. (2017.). When Empathy Is Not Enough: Assessing the Experiences of Autistic Children with Technologies. *In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)*. ACM, . New York, NY, USA, 2853–2864. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025785>.
- Kobe Boussauw, T. N. (2012). Relationship between Spatial Proximity and Travel-to-Work Distance: The Effect of the Compact City . *Regional Studies*, 46:6, 687-706. doi:10.1080/00343404.2010.522986
- Litman, T. (. (2018). *Parking management best practices*. Routledge. Retrieved from https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=LepGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT8&dq=efficiency+and+effectiveness+to+diminish+the+parking+demand&ots=HsySY9NII2&sig=gZCzSWOW157Bm3imRMH19EtCPrQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- MacNeil, R.T., Mills, A. (2015). Organizing a precarious black box: an actor-network account of the Atlantic schools of business, 1980–2006. *Can. J. Adm. Sci.* , 10.1002/cjas.1317.
- Maldonado, E.A., Maitland, C.F. & Tapia, A.H. (2010). Collaborative systems development in disaster relief: the impact of multi-level governance. *Inf. Syst. Front.*, 12 (1) , pp. 9-27, 10.1007/s10796-009-9166-z.
- McKinsey Global Institute. (2013, January). *Infrastructure productivity: How to save \$1 trillion a year*. Retrieved from McKinsey&Company: <http://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/infrastructure-productivity>
- Mejía Mejía Viente Leoncio, G. S. (2015). Medición de la percepción sobre servicios básicos de la población más vulnerable de la ciudad de Cuenca - Ecuador 2010-2014. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana. Retrieved 2018, from <https://ipsec.blog.ups.edu.ec/wp-content/uploads/sites/4/2015/08/MEDICION-DE-LA-PERCEPCI%C3%93N-SOBRE-SERVICIOS-BASICOS-DE-LA-POBLACI%C3%93N-M%C3%81S-VULNERABLE-DE-LA-CIUDAD-DE-CUENCA-ECUADOR-2010-2014.pdf>
- Moore, A.T., Staley., S, Poole, R. (2010). The role of VMT reduction in meeting climate change policy goals. *Transp. Res. Part A*, 44 (8), 565-574.
- Nations, U. (2013). *Planning and design for sustainable urban mobility. Global report on human settlements* . Retrieved from United Nations: <https://unhabitat.org/planning-and-design-for-sustainable-urban-mobility-global-report-on-human-settlements-2013>
- Nations, U. (2017). *Member States*. Retrieved from United Nations: <http://www.un.org/en/member-states/>
- Nations, U. (2017). *Sustainable Development Goals*. Retrieved from United Nations: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

- Oppong, G. D. (2017). A review of stakeholder management performance attributes in construction projects. *International journal of project management*, , 35(6), 1037-1051.
- Program, O.-H. U. (2013). *Urban planning for city leaders, 2nd Edition*.
- Revista Opción S-Isaías Campaña. (2019). ¿A mayor contaminación ambiental, mayor mortalidad? *Opción S, Agosto 1*. Retrieved mayo 31, 2021, from <https://opcions.ec/portal/2019/08/01/a-mayor-contaminacion-ambiental-mayor-mortalidad/>
- Rezania, D., Ouedraogo, N. (2013). Organization development through ad hoc problem solving: a case of knowledge transfer capacity development in an ERP implementation project. *Int. J. Manag. Proj. Bus.*, 7 (1) , pp. 23-42.
- Sage, D., Dainty, A., Brookes, N. (2011). How actor–network theories can help in understanding project complexities. *Int. J. Manag. Proj. Bus.*, 4 (2) , pp. 274-293, 10.1108/17538371111120243.
- Sarker, R. I. (2019). Walking to a public transport station: empirical evidence on willingness and acceptance in Munich, Germany. *Smart and Sustainable Built Environment*.
- Tiwana, A., Keil, M. (2009). Control in internal and outsourced software projects. *J. Manag. Inf. Syst.*, 26 (3) , pp. 9-44, 10.2753/MIS0742-1222260301.
- Turner, R., Zolin, R. (2012). Forecasting success on large projects: developing reliable scales to predict multiple perspectives by multiple stakeholders over multiple time frames. *Proj. Manag. J.*, 43 (5) , pp. 87-99, 10.1002/pmj.21289.
- Universo, E. (2019, Enero 16). *Costo de subsidios llegaría a \$ 50.975 millones, según Ministerio de Finanzas* . Retrieved from El Universo: <https://www.eluniverso.com/noticias/2018/12/20/nota/7105821/mef-costo-subsidios-llegaria-50975-millones>
- Valderrama A. & Jrgensen U. (2008). Urban transport systems in bogot and copenhagen: an approach from STS. . *Built Environment*, 34(2), 200-217. 10.2307/23289806
- Wikipedia. (2019). *Tranvía de Cuenca*. . Retrieved from Wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Tranv%C3%ADa_de_Cuenca
- World Bank. (2021, 01 01). *International Statistical Institute*. Retrieved july 05, 2021, from International Statistical Institute: <https://www.isi-web.org/index.php/resources/developing-countries>

BIOGRAPHY



Patricia Cazorla, Master in Logistics, transit and intelligent transport systems by KU Leuven, Belgium, is a civil engineer from the University of Cuenca, has a diploma in Sustainable Urban Transport Systems at the Centro Internacional de Estudios Interdisciplinarios, Peru. She has 6 years of experience in preparing pre-contractual and contractual documents for public works and 10 years of experience in mobility systems. She previously served

as a coordinator of the integrated transportation system in the Mobility Department of the GAD Cuenca. Since 2017, she is a full-time research professor at University of Cuenca.

Estudio de la Catálisis Heterogénea con Disulfuro de Hierro (II) como Tratamiento de Emisiones Gaseosas Contaminadas con Tolueno Producidas en la Industria de Pintura

Cabrera, Marcelo^{1,*} ; Montenegro, Lucía² ; Mejía Stephanie² 

¹Universidad Internacional del Ecuador, Escuela de Gestión Ambiental, Quito, Ecuador

²Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Quito, Ecuador

Resumen: Esta investigación pretende desarrollar una alternativa para el tratamiento de las emisiones gaseosas contaminadas con tolueno producidas en la industria de pinturas, de modo que se minimice el riesgo de afectación a la salud de trabajadores y personas aledañas que mantienen contacto con dichas emisiones. Para simular el caudal del aire contaminado, se desarrolló a nivel de laboratorio un prototipo de un sistema fundamentado en el proceso de evaporación, a través del cual se obtuvo una concentración de tolueno igual a 108 partes por millón (ppm) en la corriente de aire. Consecutivamente, se diseñó y desarrolló un sistema para tratar la corriente, compuesto por el agente oxidante peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el catalizador disulfuro de hierro II (FeS_2). En una primera etapa, se estudió la eficacia del H_2O_2 como agente de tratamiento obteniéndose que a un flujo de 2 mL/min, se degrada el 10,1 % del tolueno presente en la emisión contaminada, mientras que a un flujo de 3 mL/min, se degrada el 10,5 %. A continuación, se trabajó con diferentes cantidades de disulfuro de hierro II en una concentración igual al 86 %. Se determinó que 10 g de FeS_2 degradan al tolueno en un 36,25 %, mientras que 20 gramos un 61,09% y 30 g un 70,39 %. Finalmente, se concluyó que la concentración de tolueno en el aire disminuye hasta 32 ppm, cuando se trabaja bajo las mejores condiciones determinadas de 2 mL/min de H_2O_2 y 30 g de FeS_2 .

Palabras clave: Tolueno, catálisis heterogénea, emisiones gaseosas, oxidación.

Study of Heterogeneous Catalysis with Iron (II) Disulfide as a Treatment in Gaseous Emissions Contaminated with Toluene from Paint Industries

Abstract: This research aims to develop an alternative for the treatment of gaseous emissions contaminated with toluene from paint industries, so that it minimizes the risk of affecting the health of workers and neighbors who come into contact with such emissions. To simulate the flow of contaminated air, a prototype of a system based on the evaporation process was developed at laboratory, through which a concentration of toluene equal to 108 parts per million (ppm) was obtained in the air stream. Consequently, a system was designed and developed to treat the stream, composed of the oxidizing agent hydrogen peroxide (H_2O_2) and the catalyst iron disulfide II (FeS_2). First, the effectiveness of H_2O_2 as a treatment agent was studied, obtaining that at a flow rate of 2 mL/min degraded a 10.1% of the toluene present in the contaminated emission, while a flow rate of 3 mL/min degraded a 10.5%. Next, the effect of the addition of different amounts of iron II disulfide at a concentration equals to 86 %, the degradation of toluene was analyzed. It was determined that 10 g of FeS_2 degrade toluene by 36.25 %, while 20 g degrades it by 61.09 % and 30 g degrades it by 70.39 %. Finally, it was concluded that the concentration of toluene in air decreases up to 32 ppm, when working under the best conditions determined of 2 mL/min of H_2O_2 and 30 g of FeS_2 .

Keywords: Toluene, heterogeneous catalysis, gaseous emissions, oxidation.

1. INTRODUCCIÓN

El tolueno, de fórmula química $C_6H_5CH_3$, es un hidrocarburo líquido de uso frecuente en las industrias como disolvente o como ingrediente en la fabricación de pinturas o pegamentos. El tolueno o metilbenceno forma parte de la lista de

compuestos orgánicos volátiles (COVs), cuyos efectos son negativos a nivel medioambiental y en la salud humana (INSHT, 2007, p. 1).

Investigaciones realizadas por el Department of Health and Human Service (HHS) de los Estados Unidos, indican que la

elaboración de pinturas genera aproximadamente 283 000 toneladas de emisiones gaseosas de tolueno por año en concentraciones de entre 99 y 200 partes por millón (ppm), motivo por lo cual esta industria es responsable de aproximadamente el 16 % de las fuentes contaminantes con tolueno. Las personas relacionadas con este tipo de industrias han reportado afecciones crónicas a su sistema nervioso central, fallas en sus riñones y problemas visuales y auditivos (INSHT, 2007, p. 2; DHHS, 2015, p. 302).

En la actualidad, el TULSMA del Ministerio del Ambiente del Ecuador, no regula el valor máximo de concentración de emisiones de los compuestos orgánicos volátiles, no obstante, se ha observado un incremento en la preocupación por controlar este tipo de emisiones. Por esta razón, se realizó un estudio de la calidad del aire atmosférico en la ciudad de Quito, y la vulnerabilidad a los compuestos orgánicos volátiles. En este estudio se concluyó que las personas cercanas a las fuentes de contaminación se ven afectadas por estos aspectos ambientales. Por este hecho, se propuso realizar una investigación que permita minimizar el impacto de los COV's en la salud de las personas (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015; IFA, 2007, p. 57).

Existen dos tipos de métodos para el tratamiento de COV's, los métodos fisicoquímicos y biológicos. El método fisicoquímico emplea agentes oxidantes para la degradación del tolueno, entre los agentes oxidantes más empleados está el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) el cual actúa junto al hierro como catalizador, para mejorar su eficacia (Cárdenas et al., 2003, p. 30; Castells, 2012, p. 114).

El FeS_2 o disulfuro de hierro II es un mineral de gran abundancia en la naturaleza, compuesto aproximadamente por un 46,6 % de hierro el cual es extraído para su uso en la industria (Klein y Hurbult, 2002 p. 339).

Esta investigación constituye una alternativa factible para el tratamiento de corrientes gaseosas contaminadas con tolueno procedentes de las industrias de pinturas, evitando así la afección a la salud de las personas cercanas a esta industria, así mismo, se podrán usar los resultados de esta investigación para su aplicación en las industrias quiteñas que presenten contaminación en el ambiente con tolueno (Cobo, 2013, p. 134).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Generación de un flujo constante con tolueno

2.1.1 Diseño y construcción del sistema

Considerando la volatilidad del tolueno, el sistema diseñado y desarrollado a nivel de laboratorio se basó en un proceso de evaporación (EPA, 2000, p.1).

Un caudal controlado de aire ingresó al sistema que contenía tolueno en estado líquido, el cual mantenía una evaporación constante. La mezcla del tolueno evaporado y el aire dieron como resultado una corriente contaminada.

Para mantener un flujo constante de tolueno en la corriente, se controlaron las siguientes variables: temperatura del líquido, temperatura y caudal del aire y, el espacio transversal expuesto del líquido.

Los procedimientos empleados para el control de los parámetros enunciados se presentan a continuación (Montoya, 2002, p. 12):

a. Establecimiento de la temperatura del aire

A fin de incrementar la temperatura ambiental del flujo de aire desde 16,9 °C a 20 °C, se implementó y usó un intercambiador de calor. La temperatura indicada inicial del aire es un valor registrado para el 2018, en la ciudad de Quito-Ecuador, por el INAMHI (INAMHI, 2018, p. 14)

Dada la facilidad de construcción y cálculo, el intercambiador tuvo un diseño de tubos concéntricos. Sus dimensiones fueron: espesor de vidrio 1 mm, longitud de 20 cm, diámetro externo del tubo exterior de 1,8 cm y 1,1 cm para el tubo interior. A través del área anular de este intercambiador de calor atravesaba agua procedente de un baño María y por los tubos concéntricos, aire (Incrópera et al., 2011, p. 706).

La temperatura del baño termostático requerida para incrementar la temperatura del ambiente hasta los 20 °C, fue calculada a través del modelado de un intercambiador de tubos concéntricos en contracorriente, empleando para ello, la metodología presentada por Kern. El cálculo se realizó para los valores de 10 °C y 19 °C como temperaturas ambientales y 0,5 L/min y 2,5 L/min como datos de caudales de aire. Se consideró que los valores escogidos de temperatura para el cálculo sean mayores a la temperatura mínima reportada por el INAMHI para la ciudad de Quito año 2018 (Kern, 1999; INAMHI, 2018, p. 19).

Con el dato teórico y datos experimentales de los valores de la temperatura del baño termostático requerida para incrementar a 20 °C, la temperatura ambiental se calculó el error existente.

Una vez controlada la temperatura del aire de entrada se desarrollaron mecanismos de control del proceso de evaporación, para ello se analizaron los parámetros del volumen en función del tiempo del aire de ingreso, la temperatura del tolueno líquido y el espacio transversal expuesto.

Los mecanismos empleados se presentan a continuación:

b. Control de la temperatura del tolueno, área de evaporación y flujo del aire

Para controlar el espacio transversal expuesto o área de evaporación, se tomaron dos envases de vidrio de una misma longitud, pero de distinto diámetro y se colocó tolueno dentro de los mismos. La sección transversal de los recipientes utilizados fue de 12,76 cm² y 2,97 cm².

Empleando un rotámetro de capacidad 8 L/min provisto de válvula reguladora, se controló el caudal de aire de ingreso. Esto fue necesario dado que bibliográficamente se halló que

existe mayor evaporación a mayor flujo de aire (Pozo, 2012, p. 22).

Los flujos de aire se establecieron a 0,5 L/min y 2,5 L/min. El valor más bajo escogido corresponde a un dato que puede ser medido por el rotámetro en ausencia de aire, mientras que el valor más alto corresponde a un valor cercano de una investigación similar al presente estudio (Bae et al., 2014, p. 32).

Con estos criterios se diseñó y desarrolló un medio con una columna de vidrio, cuyas medidas fueron: 6 cm de diámetro y 55 cm de alto. En la parte interna de la columna, se colocaron los recipientes de 12,76 cm² y 2,97 cm² llenos de tolueno (Wang et al., 2002, p. 63).

Pozo (2012) establece en su análisis de evaporación de tolueno y xileno, que las temperaturas óptimas para el tolueno se encuentran entre los 18 °C o 25 °C. Conforme a lo descrito, se revistió la columna de vidrio con una chaqueta de calentamiento por la cual circulaba agua proveniente de un baño termostático, alcanzado en la columna las temperaturas mencionadas (p. 43).

Posteriormente, aire a 20 °C ingresó por la sección baja de la columna de vidrio, mezclándose con el tolueno evaporado y obteniéndose un flujo constante de aire contaminado. El mecanismo de control de este proceso se presentó previamente.

Para validar la concentración de tolueno entre 99 ppm a 200 ppm en la corriente gaseosa, se estudió la influencia de la temperatura y área expuesta del líquido, junto con el caudal del aire de entrada, empleando para ello el método gravimétrico.

2.1.2 Análisis del efecto del flujo del aire, la temperatura del líquido y su área transversal, en el proceso de evaporación del tolueno

Los parámetros con influencia en el proceso de evaporación se controlaron bajo lo descrito previamente en la Sección 2.1.1. Para evaluar la influencia de los parámetros, se realizó un diseño experimental, en el cual las variables fueron: temperatura del tolueno, flujo del aire y el espacio transversal de los recipientes con tolueno.

En el recipiente de 2,97 cm² se introdujeron aproximadamente 40 g de tolueno. El recipiente se colocó en la columna, se fijó la temperatura de la chaqueta de calentamiento a 18 °C y el flujo del aire se fijó a 2,5 L/min. Posteriormente, se cerró la columna hasta que transcurran 30 min. Una vez alcanzado el tiempo de espera, se abrió la columna, se retiró el recipiente y se pesó en una balanza analítica. Este proceso se repitió por 3 ocasiones.

El flujo de evaporación del tolueno se determinó considerando la diferencia entre la cantidad evaporada y el valor inicial, dividido para el tiempo de realización de la prueba.

Para comprobar el error generado entre el valor teórico y el experimental, se empleó la Ecuación 1 (Incrópera et al., 2011, p. 453).

$$n_A = A * h * (\rho_{A,sat} - \rho_{A,aire}) \quad (1)$$

Donde:

n_A : Caudal de evaporación, (kg/s)

h : Coeficiente de transferencia de masa, (m/s)

A : Área del recipiente, (m²)

$\rho_{A,t}$: Concentración del tolueno saturado, (kg/m³)

Con los valores obtenidos del caudal de evaporación del tolueno y de aire contaminado, se empleó el modelo de Caja Fija para la determinación de la concentración del tolueno (De Nevers, 2010, p. 120). La Ecuación 2 describe el modelo de caja fija resultante para los parámetros establecidos:

$$\frac{q}{u} = c \quad (2)$$

Donde:

c : Concentración del tolueno en el flujo de salida, (kg/m³)

q : Flujo de emisión del contaminante, (kg/m²*s)

u : Velocidad del aire, (m/s)

De la aplicación de esta ecuación se obtuvieron 18 valores de concentración con los cuales se analizó si la concentración de tolueno es constante en el tiempo para ambas áreas (12,76 cm² y 2,97 cm²). Posteriormente, se precisó el flujo de evaporación de los recipientes de 2,97 y 12,76 cm² con una temperatura de la camisa de 25 °C. Por último, se fijó el flujo de aire a 0,5 L/min y se trabajó con las temperaturas de 18 °C y 25 °C y con las áreas mencionadas.

Tras los resultados obtenidos, se seleccionaron los parámetros que permitieron obtener una concentración de tolueno de 99 a 200 ppm, considerando que estos son los valores comunes en la industria de pintura, de acuerdo con Health and Human Service (DHHS, 2015).

Los valores obtenidos en este inciso provienen de un método gravimétrico. Considerando que el método es sujeto de errores, se midió la cantidad de tolueno en la corriente de aire a través del método de carbón activo/cromatografía de gases.

2.1.3 Determinación de la concentración de tolueno a través de adsorción en carbón activo / cromatografía de gases MTA/MA-030/A92

El procedimiento de adsorción en carbón activado es un método avalado por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) para la cuantificación de compuestos orgánicos volátiles. El procedimiento consiste en tomar con un tubo de carbón activo, una cierta cantidad de la corriente contaminada con COVs. Aquí se genera una desorción de la cual se obtiene como producto final el sulfuro de carbono (INSHT, 2005).

La solución obtenida se examinó en un cromatógrafo de gases equipado con un detector de ionización FID. El cromatógrafo empleado fue un Agilent 7890, con una columna HP PONA.

Los parámetros de análisis se detallan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones del análisis por cromatografía de gases

	Parámetro	Magnitud	Unidad
Temperatura	Horno	150	(°C)
	Detector	250	(°C)
	Inyector	230	(°C)
Flujo	Hidrógeno	45	(mL/min)
	Aire	450	(mL/min)
	Nitrógeno	5	(mL/min)
Volumen	Inyección	0,5	(μL)

Con el fin de cuantificar la eficiencia del método en mención, se analizó la muestra a través de celdas electroquímicas con un Equipo Dräger CMS. Este equipo analiza optoelectrónicamente los productos de la reacción química, y detalla la concentración presente del contaminante (Dräger, 2015, p. 352).

Una vez cuantificada la concentración de tolueno en el aire, se implementó un procedimiento para el tratamiento del aire contaminado.

2.2 Implementación de un sistema para el tratamiento de corrientes gaseosas con tolueno

En un contenedor hermético de vidrio de dimensiones: 15 cm de diámetro y 20 cm de alto se colocaron dos acoples, uno para la entrada del aire y otro para la salida del aire tratado. Las dimensiones del vidrio fueron escogidas para simular un estudio semejante al presente (Bae et al., 2014, p.32).

2.3 Valoración del efecto del peróxido de hidrógeno en la eliminación del tolueno

Al ser el H_2O_2 un oxidante débil, se analizó inicialmente el efecto de este compuesto en la corriente contaminada con tolueno. Para lo cual, se inyectó al sistema descrito previamente, un volumen de 20 mL de este oxidante en una concentración del 30 % (v/v), creando un flujo de 2 mL/min y 3 mL/min (Bae et al., 2014, p. 32).

Tras una hora en el reactor, se midió el porcentaje de remoción del tolueno de la corriente contaminada. El procedimiento se realizó tres veces.

2.4 Valoración del efecto del catalizador disulfuro de hierro II en la eliminación del tolueno

2.4.1 Caracterización y desarrollo del catalizador

Para determinar el grado de pureza del disulfuro de hierro II, se sometió al mineral a una difracción de rayos X. El análisis fue llevado a cabo en el equipo D8 Advance Bruker del Laboratorio de Metalurgia Extractiva de la EPN.

A continuación, se trituro, molió y tamizó al disulfuro hasta alcanzar los 150 μ m de diámetro de partícula. Se colocó el disulfuro tamizado en un vaso de precipitación que contenía alcohol etílico al 98 % y se sometió a ultrasonido por 5

minutos. Posteriormente se lavó con ácido nítrico en concentración 1N (Wang et al., 2002; Bae et al., 2014, p. 31).

2.4.2 Efecto de la concentración del catalizador disulfuro de hierro II en el tratamiento de la corriente contaminada

Con los datos obtenidos del efecto del H_2O_2 en la corriente contaminada y, una vez escogido el mejor tratamiento, se prosiguió a determinar el efecto del disulfuro de hierro II en el flujo de aire. Para ello, se preparó en 3 L de agua destilada una suspensión de disulfuro de hierro II, bajo un pH de 2,5. La suspensión se mantuvo en agitación constante durante 24 horas en el sistema descrito previamente. Posteriormente, se inyectó un volumen de 20 mL de H_2O_2 y se encendió la bomba para controlar el caudal de entrada del peróxido (Barriuso y Lévy, 2004, p. 117).

Del estudio de Zhang et al. (2014), se tomaron los valores sugeridos de 10 g, 20 g y 30 g del catalizador disulfuro de hierro II, para el tratamiento de la corriente de aire. De ello, se realizaron tres mediciones con cada valor del catalizador, y se evaluó la cantidad de tolueno en el aire de salida tras una hora en el reactor, para determinar el porcentaje de remoción (p.1).

Con los valores obtenidos se escogió la concentración de catalizador que generó un mayor porcentaje de eliminación del tolueno en el aire contaminado. Para descartar posibles variaciones en el tiempo, se tomó por triplicado los valores de pH, concentración final de tolueno, y temperatura del sistema cada 2 horas, durante un lapso de 8 horas y otra medida a las 12 horas.

2.4.3 Estudio de los productos obtenidos en el proceso

Tras un proceso de oxidación completa, se tiene como productos de la reacción agua (H_2O) y anhídrido carbónico (CO_2). Para verificar la formación de estos compuestos en este estudio, se tomaron tres muestras de 2 L del aire tratado en un envase impermeable dispuesto de una válvula antiretorno, y se analizaron en un cromatógrafo de gases (Perkin Elmer, Clarus 500). Las dimensiones de la columna fueron 35 cm de longitud, 0,32 mm de diámetro, modelo 19091H, marca Hp, rellena con material de 0,25 μ m (Colin, 2004, p. 505; ASTM D1945-03, 2010).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desarrollo de un medio constante de generación de aire contaminado con tolueno

3.1.1 Diseño y elaboración del sistema

a. Control de la temperatura del aire

Inicialmente, se empleó aire de temperatura variable procedente del laboratorio de Análisis Instrumental de la EPN. Con el fin de mantener constante la temperatura, se diseñó y desarrolló un sistema de control de temperatura.

Tomando la temperatura ambiental de la ciudad de Quito, y considerando que la temperatura mínima para el año 2015 fue

de 9 °C, se escogieron valores de 10 a 19 °C para la realización de los cálculos y alcanzar los 20 °C. En la Figura 1 se pueden visualizar los datos obtenidos para un caudal igual a 2,5 L/min.

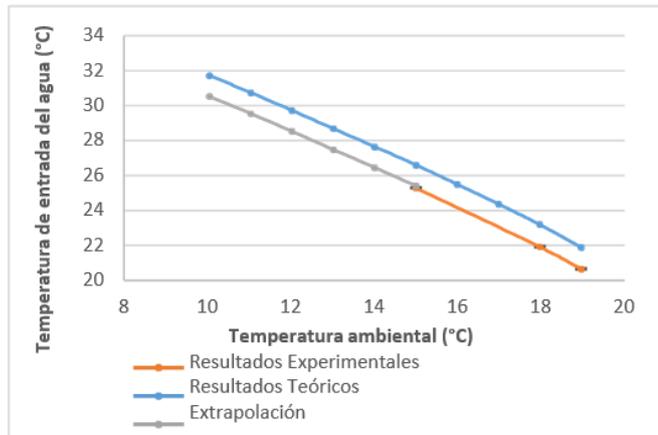


Figura 1. Temperatura ambiental en relación con la temperatura inicial del agua para el intercambiador (Caudal de aire = 2,5 L/min)

Del análisis de la Figura 1, se tiene que la máxima temperatura requerida, cuando la temperatura ambiental es 10 °C, es de 31,8 °C. Para alcanzar este valor, se requieren 0,42 W de energía (Perry, et al., 2001, p. 2).

Dada la variabilidad de la temperatura ambiental, se experimentó con 3 temperaturas: 15 °C, 18 °C y 19 °C. Los valores teóricos están simbolizados por la curva de color azul, mientras que la curva de color naranja muestra los resultados experimentales. Como se puede observar, las dos curvas se disponen paralelamente, con una variación aproximada de un grado centígrado entre ambos valores. Esta variación puede considerarse constante, por lo cual se pueden extrapolar los resultados y construir una curva como la que se muestra en color plomo.

Con la curva extrapolada, se pueden obtener datos en caso de variación de la temperatura en el rango de 10 a 15 °C.

b. Control del flujo de aire, temperatura del tolueno, y del área transversal expuesta del líquido

Con el fin de controlar el espacio transversal expuesto del líquido, se tomaron dos envases con una misma altura, pero distinto diámetro. Los valores de su área transversal fueron de 12,76 cm² y 2,97 cm². El caudal de aire se controló a través de una válvula de un rotámetro.

Tomando estos parámetros, se diseñó y desarrolló un sistema de una columna de vidrio de medidas 55 cm de altura y 3 cm de radio, dentro de la cual se insertaron los envases con tolueno.

En la Figura 2, se puede observar a la columna revestida por una chaqueta de calentamiento, dentro de la cual, circuló agua proveniente de un baño termostático, con la cual se logró mantener constante la temperatura del tolueno.

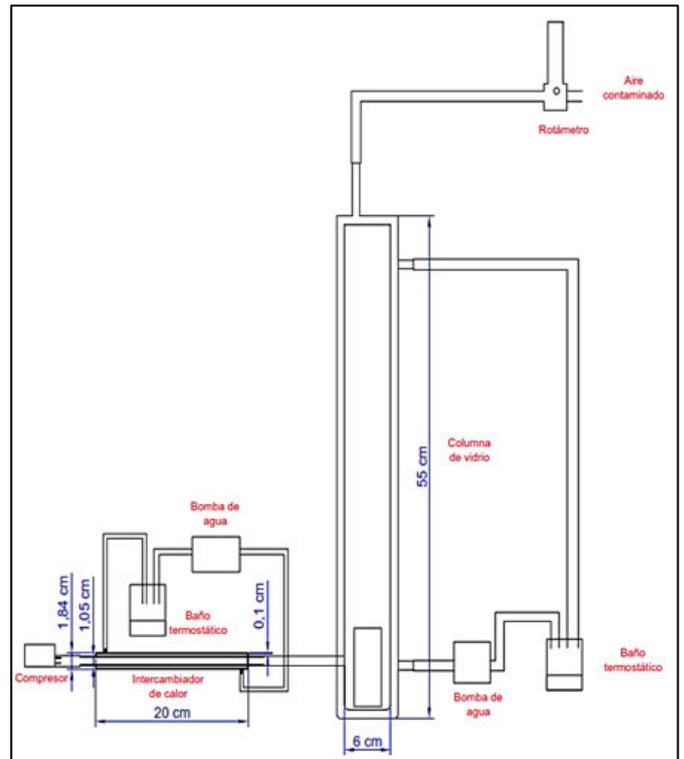


Figura 2. Bosquejo del sistema desarrollado de contaminación de aire con tolueno

3.1.2 Determinación del efecto del flujo de aire, la temperatura del líquido y su área transversal expuesta, en la evaporación del tolueno

En función de los análisis realizados, se determinó que el flujo de evaporación fue de 1,1 mg/min para un área de 2,97 cm², con una temperatura del líquido de 18 °C y 2,5 L/min de flujo de aire, mientras que a una temperatura de 25 °C fue de 3,6 mg/min. De acuerdo con lo expuesto, se considera que existe una relación directa entre la cantidad de tolueno evaporado y la temperatura del líquido. La evaporación está determinada tanto por la temperatura del líquido como la del aire, sin embargo, en este sistema la temperatura del aire permanece constante mientras que la temperatura del líquido aumenta. El incremento de temperatura genera un cambio en la presión del vapor del líquido, provocando una mayor transferencia de masa (Montoya, 2002, p. 12).

Los resultados obtenidos del análisis de la concentración de tolueno a diferentes áreas transversales y temperaturas se presentan en la Tabla 2. Al comparar los datos obtenidos, se determina una relación directa entre las áreas y la concentración de tolueno. Esto concuerda con lo expuesto por Incrópera et al. (2011), quien menciona que la evaporación aumenta su eficiencia en cuanto mayor es el área expuesta del líquido (p. 453).

Respecto al caudal de evaporación, se obtuvo que a 2,97 cm²; 18 °C y; 0,5 L/min se evaporaron 0,47 mg/min mientras que a 2,97 cm²; 18 °C y 2,5 L/min; se evaporaron 1,11 mg/min. Esto indica una relación directa entre el flujo de aire y la evaporación de tolueno, confirmando la proposición realizada por Pozo (2012, p. 22).

Tabla 2. Valores de la concentración inicial de tolueno a diferentes temperaturas del líquido, áreas de evaporación y flujos de aire

Flujo (L/min)	Área (cm ²)	Temperatura (°C)			
		18		25	
		2,97	12,76	2,97	12,76
0,5		243 ± 21	1002 ± 80	418 ± 7	1674 ± 13
2,5		115 ± 8	4044 ± 6	373 ± 6	8193 ± 2

Reconsiderando lo expuesto en el experimental, de estos resultados se eligió el flujo de aire, la temperatura y el área de exposición que permitió una concentración de tolueno de 99 ppm a 200 ppm en la corriente gaseosa. Los resultados obtenidos permitieron una concentración aproximada de 115 ppm a 18 °C de temperatura; 2,5 L/min de aire, y 2,97 cm² de área transversal.

Al relacionar los resultados experimentales con los teóricos, se determinó un error del 17,53 %. La diferencia hallada pudo haberse generado por la presunción del flujo paralelo al área de evaporación cuando el mismo es vertical, conforme se presenta en la Figura 2. Por ello, se desarrolló un procedimiento analítico para determinar cuantitativamente la presencia de tolueno en el aire.

3.1.3 Evaluación del proceso de adsorción de tolueno en carbón activo / cromatografía de gases MTA/MA-030/A92

Los resultados de la concentración de tolueno en la corriente de aire a través del procedimiento de adsorción con carbón activo/cromatografía de gases se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Concentraciones de tolueno en la corriente de aire, obtenidas a través de cromatografía de gases y celdas electroquímicas

Pruebas	Concentración obtenida por cromatografía de gases (ppm)	Concentración obtenida con celdas electroquímicas (ppm)	Error del método cromatografía de gases/celdas electroquímicas (%)
1	110	119	7,3
2	105	112	5,9
3	108	115	5,5
PROM	108 ± 2	115 ± 3	6,2 ± 0,8

La concentración determinada a través del método gravimétrico fue 115 ppm, mientras que a través de la cromatografía de gases fue 108 ppm. La diferencia entre ambos métodos es mínima por lo cual se considera que no hay variación.

De los valores alcanzados con los métodos señalados, se compararon con aquellos obtenidos a través del análisis de celdas electroquímicas con el Equipo Dräger CMS (Dräger, 2015, p. 352). Los resultados que se detallan en la Tabla 3, indican similitudes en los valores alcanzados, con apenas un 6.2% de diferencia. Esta variación era esperada dado que al desorber el tolueno del carbón activo, una mínima cantidad del mismo se queda adsorbido, como lo menciona la norma MTA/MA-030/A92 (INSHT, 2005). Conforme a la descrito, se acepta el método de carbón activado/cromatografía como confiable y se asume un 93.8 % de confiabilidad en la

adsorción y desorción del contaminante, y se utiliza para los análisis posteriores.

3.2 Desarrollo de un sistema para el tratamiento de aire contaminado con tolueno

En un sistema conformado por un envase hermético de vidrio de medidas 15 cm de diámetro y 20 cm alto, se insertó un acople para la entrada de aire contaminado y otro acople para la salida del aire tratado. Se llenó el recipiente con 3 L de agua destilada y se acondicionó a un pH de 2,5 por la adición de ácido sulfúrico (H₂SO₄) a concentración 1 N. Se añadió el catalizador al inicio del ensayo, y posteriormente por la parte superior del envase de vidrio se insertó H₂O₂ a un caudal controlado y finalmente se adaptó un sistema de agitación magnética (Bae, et al., 2014, p. 32).

El caudal de aire con tolueno a una concentración de 108 ppm, ingresó al sistema de tratamiento a 2,5 L/min. El caudal se difundió en el envase, atravesó el medio oxidante y salió por el acople, con un flujo determinado por un rotámetro. La cantidad empleada del oxidante y el catalizador se detalla en las Secciones 2.3 y 2.4.

3.3 Evaluación del uso del peróxido de hidrógeno en la remoción del tolueno de la corriente de aire contaminada

Previo a la utilización del catalizador, se estudió el efecto del peróxido de hidrógeno en el caudal contaminado con tolueno. Para lo cual, se inyectó al sistema, compuesto por un envase de vidrio, peróxido de hidrógeno al 30 % en dos caudales 2 mL/min y 3 mL/min.

De los resultados alcanzados se tiene que la degradación del tolueno con peróxido de hidrógeno es baja, con apenas el 10.1 % al usarse 2 mL/min y 10,5 % cuando se empleó un 3 mL/min.

Considerando que la diferencia de degradación entre los dos flujos es mínima, de apenas el 0,4%, se optó por el caudal de 2 mL/min.

3.4 Análisis del uso del catalizador disulfuro de hierro II en el porcentaje de remoción de tolueno de la corriente gaseosa contaminada

3.4.1 Caracterización y preparación del catalizador

Cómo un paso previo al análisis de la influencia del catalizador, se procedió a caracterizar al mineral a través de una difracción de rayos X. De acuerdo a los resultados, el mineral contiene un 86 % de disulfuro de hierro II y un 14 % de minerales como esfalerita, caolinita, phlogopita, butlerita; algo típico de hallar en las minas ecuatorianas (Prodeminca, 2000).

3.4.2 Análisis de la concentración de disulfuro de hierro II en el tratamiento

Tomando el caudal de 2 mL/min de peróxido de hidrógeno obtenido en pasos previos, se experimentó con los pesos de 10g, 20g y 30 g del catalizador disulfuro de hierro II, considerando como variable al porcentaje de remoción de tolueno. La concentración final de tolueno se midió tras 60 minutos en el reactor. Los valores obtenidos se detallan a continuación en la Tabla 4.

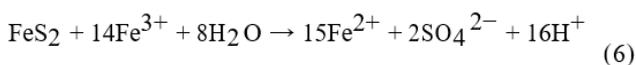
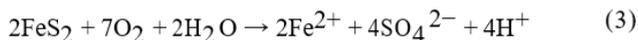
Tabla 4. Porcentajes de degradación y concentración final de tolueno en la emisión contaminada, tras tratamiento con catalizador

FeS ₂ (g)	Prueba	Concentración (ppm)	Media (ppm)	Degradación (%)
10	1	71	69 ± 3	36,25
	2	72		
	3	65		
20	1	41	42 ± 1	61,09
	2	43		
	3	42		
30	1	34	32 ± 1	70,39
	2	32		
	3	30		

Como se puede evidenciar, el porcentaje de degradación aumenta a mayor cantidad de disulfuro de hierro II, de modo que con 30 g de FeS₂ la remoción de tolueno fue del 70,39 %. Sin embargo, se pueden obtener porcentajes más altos como lo demostró Bae et al. (2014), al alcanzar en su investigación un 90% de degradación, considerando una concentración inicial de tolueno de 7900 ppm (p. 32).

La diferencia porcentual de degradación ente ambas investigaciones está ligada a la velocidad de reacción, la cual está relacionada con la concentración inicial de reactivos, de modo que, a menor concentración, menor velocidad de reacción (Fogler, 2001, p. 69).

A través del catalizador, se alcanzó una concentración final de tolueno en la emisión contaminada de 32 ppm. Con respecto a la temperatura, el sistema alcanzó los 25 °C con los 10, 20 y 30 g de FeS₂, no obstante, el valor del pH varió en función de la cantidad empleada de catalizador de modo que, con 30 g el valor de pH descendió de 2,5 a 2,07. Este comportamiento se relaciona con la presencia de pirita en el mineral, cuyo alcance del punto de equilibrio de pH entre 3 -2,5, produce la liberación de hierro e hidrógeno, mecanismo oxidativo descrito en las Ecuaciones 3,4,5,6 que se presentan enseguida. La presencia de hierro en los reactantes permite llegar al equilibrio de forma más rápida (Che, et al., 2011, p. 1360).



En la Ecuación 3 se muestra la reacción entre el disulfuro de hierro II (sólido), el oxígeno en estado gaseoso y el agua, cuyos productos de la reacción tiene, entre otros, al catión de hierro (Fe²⁺). La reacción entre el FeS₂ y el H₂O₂ se presenta en la

Ecuación 4, los cuales al reaccionar forman el catión Fe³⁺ y liberan hidrógeno y agua. El catión de hierro Fe²⁺, se combina con el H₂O₂ y produce radicales hidroxilos (OH), los cuales, en el paso de buscar el equilibrio, reaccionan con el compuesto orgánico degradándolo (Ecuación 5). Finalmente, el disulfuro de hierro II reacciona con el catión de hierro Fe³⁺ y como producto de esta reacción se genera nuevamente el catión Fe²⁺ (Ecuación 6) (Che, et al., 2011, p. 1356).

Con el fin de comprobar la estabilidad del sistema en función del tiempo, se dio seguimiento a los valores de concentración final de tolueno, temperatura y pH, recolectando información cada 2 horas durante 8 horas y una medición final a las 12 horas. Los resultados obtenidos se presentan en las Figura 3, Figura 4 y Figura 5.

En la Figura 3, se visualiza la concentración final de tolueno. Transcurridas las 12 horas la concentración se mantiene constante, concluyendo que el sistema es estable en el tiempo sin perder su eficiencia. El comportamiento descrito es similar al realizado por Bae et al. (2014), en el cual se determinó que un medio para el tratamiento con FeS₂ y H₂O₂ puede trabajar ininterrumpidamente por 61 días sin perder su eficiencia (p. 31).

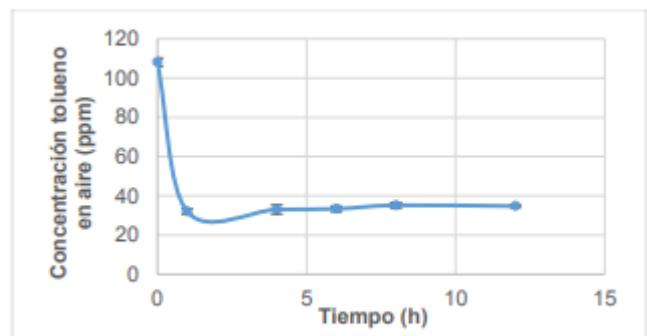


Figura 3. Detalle del comportamiento de la concentración de tolueno vs tiempo (FeS₂= 30 g)

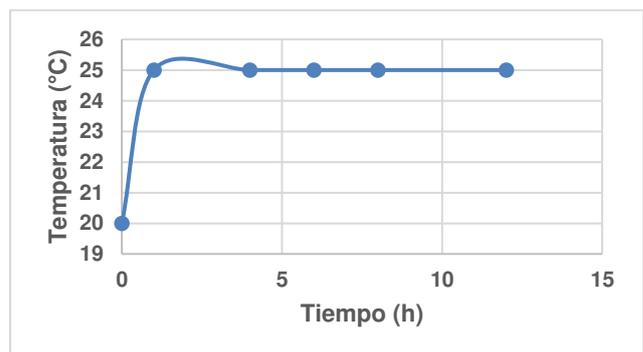


Figura 4. Temperatura sistemática vs tiempo (FeS₂= 30 g)

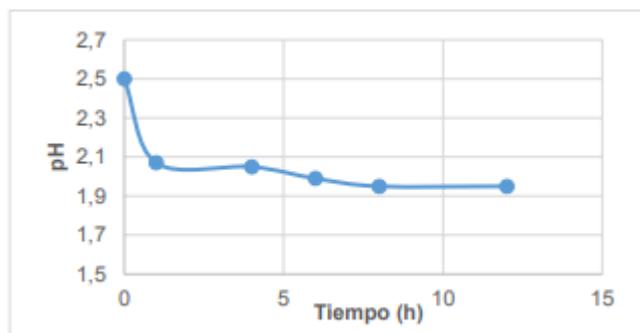


Figura 5. pH del medio vs tiempo ($\text{FeS}_2= 30 \text{ g}$)

En la Figura 4 se puede observar que la temperatura permanece constante a 25°C . El incremento en la primera hora se genera por la necesidad de la reacción de alcanzar el punto de equilibrio en cuanto a la formación de iones hidroxilos (Bae et al., 2014, p. 32).

En la Figura 5 se visualiza el comportamiento del pH en función del tiempo. Como se puede observar en la primera hora existe una caída en su valor hasta alcanzar el equilibrio, valor a partir del cual no existen variaciones sustanciales. Este resultado es similar al conseguido por Bae et al. (2014). Dada la estabilidad del sistema, el mismo resulta efectivo, pues si el pH aumentara por la presencia de radicales hidroxilos, se perdería completamente la eficiencia debido a la precipitación de los iones disueltos formando óxidos de hierro (Bae et al., 2014, p. 34).

3.4.3 Análisis de los productos del proceso oxidativo

Los productos de una oxidación completa son el agua y el dióxido de carbono. Para confirmar la formación de estos compuestos a partir del tolueno, se tomó por triplicado muestras del aire de salida tratado y se analizaron conforme la norma ASTM D1945-03 (ASTM, 2010).

Es menester la determinación de los componentes en el aire tratado, pues los mismos van en función del contaminante, de modo que si el contaminante está compuesto exclusivamente por moléculas de hidrógeno y carbono se obtendrán como productos agua y dióxido de carbono, de lo contrario, se formarán otros compuestos como óxidos de azufre, nitrógeno, o vapores ácidos (EPA, 2002, p. 2).

De los análisis se obtuvo que el componente en mayor porcentaje fue el nitrógeno en un 98,21 %, procedente del aire que ingresa al sistema de evaporación. La concentración del agua alcanzó un 1,57 %, considerado un valor bajo; su presencia se puede justificar por la humidificación de la corriente gaseosa al atravesar el lecho oxidante, o como resultado de la oxidación. En cuanto al porcentaje de dióxido de carbono, se encontró un 0,21 %, generado por el proceso de oxidación del tolueno (Colin, 2004, p. 505).

Existe una gran dificultad en cuantificar los valores de dióxido de carbono y agua formados por la oxidación, debido a que la columna empleada para detectar la presencia de nitrógeno y oxígeno arroja un solo pico.

Otras investigaciones similares de tratamientos con disulfuro de hierro II, han obtenido porcentajes del 38,8 % de presencia del dióxido de carbono en los productos. Esto podría suponer que en la presente investigación algunos compuestos no alcanzaron la oxidación completa (Bae, et al., 2014).

Considerando los resultados alcanzados en este trabajo, se considera que la acción de catálisis con disulfuro de hierro II, representa una alternativa viable y eficiente para gestionar las emisiones gaseosas con tolueno procedentes de industrias de pintura, evitando que la población que mantiene contacto con este contaminante vea afectada su salud (INSHT, 2007, p. 2; IDEAM, 2003).

4. CONCLUSIONES

Se alcanzó una concentración final de tolueno de 32,02 ppm, como resultado de una degradación del 70,39% del valor inicial, con el empleo de 30 gamos del catalizador de disulfuro de hierro II, con lo cual se disminuye el riesgo asociado a la salud, generado por la exposición a este contaminante.

Existe una relación directa entre la temperatura del líquido y la evaporación del tolueno, cuando se mantiene constante el flujo de aire y el área transversal, de modo que la cantidad evaporada fue de 1,1 mg/min a 18°C mientras que, a 25°C , el caudal de evaporación fue de 3,6 mg/min.

Al mantener constante la temperatura y el área transversal, se deriva una relación inversa entre el flujo de aire y la concentración final de tolueno, a manera que a 2,5 L/min se obtiene una concentración de 115 ppm de tolueno, y a 0,5 L/min, 373 ppm.

La concentración de tolueno en el flujo de aire determinado a través del método gravimétrico a condiciones de temperatura de 18°C , 0,5 L/min de caudal de aire y $12,76 \text{ cm}^2$ de área, fue de 1002 ppm, mientras que con un área de $2,97 \text{ cm}^2$ se determinó una concentración de 243 ppm. De acuerdo con lo expuesto se determina una relación directa entre la concentración y el área transversal.

El peróxido de hidrógeno por sí solo no es un método eficiente de degradación de tolueno, pues tras la experimentación, al tratar una corriente de 2 mL/min el porcentaje degradado fue del 10,1%, mientras que para un flujo de 3 mL/min fue 10,5%.

A través de una difracción de rayos X, se determinó en el mineral un 86% de disulfuro de hierro II y un 14 % de esfalerita, caolinita, butlerita y phlogopita.

Existe una relación inversa entre la concentración del catalizador y la cantidad final del contaminante, de modo que al emplear 10 g, 20 g y 30 g de disulfuro de hierro II, la concentración fue disminuyendo de 69 ppm, a 42 ppm y 32 ppm.

El tratamiento con 30 gramos de FeS_2 en la corriente contaminada con tolueno, genera un sistema estable en el tiempo, manteniendo constantes los parámetros de temperatura y pH, a 25°C y 2,07 respectivamente.

Se obtuvieron como productos finales del tratamiento de la corriente contaminada, al dióxido de carbono y agua, como resultado de una oxidación.

REFERENCIAS

- Acedo, J. (2006). *Instrumentación y control avanzado de procesos. Teoría y Práctica* (1). Madrid, España: Día Santos.
- ASTM. (2010). Standard Test Method for Analysis of Natural Gas by Gas Chromatography. (marzo, 2016).
- Bae, C., Choi, K., y Lee, W. (2014). Degradation of off-gas toluene in continuous pyrite Fenton system. *Journal of Hazardous Materials*, 280 (1), 31-37. doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.07.054
- Barriuso, F., y Lévy, E. (2004). *Diccionario de física (Ed. Económica)*. (1ra. ed.). España: Akal.
- Cárdenas, B., Revah, S., Hernández, S., Martínez, A., y Gutiérrez, V. (2003). *Tratamiento biológico de compuestos orgánicos volátiles de fuentes fijas*. (1ra. ed.). México: Cenica.
- Castells, X. (2012). *Reciclaje de Residuos Industriales: Residuos sólidos urbanos y fango de depuradora*. (2da. Ed.) España: Díaz Santos.
- Che, H., Bae, S., y Lee, W. (2011). Degradation of trichloroethylene by Fenton reaction in pyrite suspension. *Journal of Hazardous Materials*, 185(2-5) 1355-1361. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.10.055
- Cobo, J. (2013). Caracterización de la exposición a solventes en los preparadores de pintura en una comercializadora de pinturas (Tesis de Maestría no publicada). Universidad Tecnológica Equinoccial. Quito, Ecuador.
- Colin, B. (2004). *Environmental Chemistry*. (4ta ed.). New York: University Ontario.
- De Nevers, N. (2010). *Air pollution control engineering*. (2da ed.). Illinois, Estados Unidos de Norte América: Waveland press.
- Departamento de Salud y Servicios Humanos DHHS. (2015). Draft Toxicological Profile for Toluene. Recuperado de: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp56.pdf> (mayo, 2019)
- Dräger. (2015). Manual de Tubos Dräger/CMS. Recuperado de: [http://www.afalpi.com/images/Fichas%20Tecnicas/Deteccion%20de%20Gases Tubos%20Drager%20Manual.pdf](http://www.afalpi.com/images/Fichas%20Tecnicas/Deteccion%20de%20Gases%20Tubos%20Drager%20Manual.pdf) (marzo, 2019)
- EPA. (2000). Technical Overview of Volatile Organic Compounds. Recuperado de: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds#8> (marzo, 2019).
- EPA. (2002). Incineradores. Recuperado de: <https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs3-2ch2-s.pdf> (junio, 2019).
- EPA. (2004). Condesadores Refrigerados para el Tratamiento de Emisiones Gaseosas. Recuperado de <https://www3.epa.gov/ttn/catc/dir2/frefrigs.pdf> (junio, 2019)
- EPA. (2012). TOLUENE. Recuperado de <https://www3.epa.gov/ttn/atw/hlthef/toluene.html> (junio, 2019)
- Fogler, S. (2001). *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*. (3ra ed.). México: Pearson educación.
- IDEAM. (2003). *Guías para Manejo Seguro y Gestión Ambiental de 25 Sustancias Químicas Peligrosas y Guías Ambientales de Almacenamiento y Transporte por Carretera de Sustancias Químicas Peligrosas y Residuos Peligrosos*. Bogota, Colombia: El Ministerio.
- IFA. (2007). Valoración del Impacto en Salud en el DMQ. Recuperado de: <https://www.hitpages.com/doc/4511783318454272/3#pageTop> (marzo, 2019).
- INAMHI (2018). Boletín Climatológico Anual 2018. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, Quito, Ecuador.
- Incrópera, F., DeWitt, D., Bergman, T., y Lavine, A. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. (7ma ed.). Jefferson City, Estados Unidos de América: John Wiley & Sons.
- INSHT (2005). Determinación de hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno, p-xileno, 1,2,4-trimetilbenceno) en aire - Método de adsorción en carbón activo / Cromatografía de gases. Recuperado de: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/Fichas Tecnicas/Metodos Analisis/Ficheros/MA/MA_030_A92 .pdf (marzo, 2019).
- INSHT (2007). Tolueno: Documentación Toxicológica para el Establecimiento del Límite de Exposición Profesional del Tolueno. Recuperado de http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/Textos Online/Valores_Limite/Doc_Toxicologica/FicherosSerie2/DLEP%2039.pdf (junio, 2019).
- Kern, D. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*. (1ra ed.) México: CECSA.
- Klein, C., y Hurbur, C. (2002). *Manual de mineralogía* (4ta. ed.). Madrid: Reverté.
- Ministerio del Ambiente (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria Del Ministerio del Ambiente. Libro VI de la Calidad Ambiental, Anexo IV: Norma de Calidad del Aire Ambiente. Ecuador.
- Montoya, J. (2002). Efectos ambientales y socioeconómicos por el derrame de petróleo en el río Desaguadero (1ra. ed.). La Paz. Bolivia: Pieb
- Perry, R., y Green, D. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. Madrid, España: Mc Graw Hill.
- Pozo, C. (2012). *Pérdidas por Evaporación de Xileno y Tolueno* (Proyecto de titulación no publicado). Universidad Central, Quito, Ecuador.
- Prodeminca. (2000). Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador. Ministerio de Energía y Minas. Subsecretaría de Minas.
- Wang, k., Jehng, J., Hsieh, Y., y Chang, C. (2002). The reaction pathway for the heterogeneous photocatalysis of trichloroethylene in gas phase. *Journal of hazardous materials*, 90(1), 63-75. doi: 10.1016/S0304-3894(01)00331-4.
- Zhang, Y., Dai, C., Zhou, X., y Si, H. (2014). An enhanced Fenton reaction catalyzed by natural heterogeneous pyrite for nitrobenzene degradation in an aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*. 244(1), 438-445. doi: 10.1016/j.cej.2014.01.088.

BIOGRAFÍAS



Marcelo F. Cabrera J., nacido el 05 de marzo de 1986 en Quito-Ecuador, estudios completos de pregrado en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero Químico Aprobado Cum Laude. Título de posgrado en la Universidad Internacional SEK como Magíster en Gestión Ambiental. Ha trabajado en Incinerox, Chemeng, Unidad Educativa Jean Jacques

Rousseau, Escuela Politécnica Nacional y Universidad Internacional del Ecuador donde hasta la actualidad labora como docente en la Escuela de Gestión Ambiental en la UIDE y Coordinador del Laboratorio de Análisis Instrumental de la EPN. Ha realizado varias publicaciones en revistas LatinIndex y realizado varias conferencias sobre contaminación ambiental y cursos de perfeccionamiento docente.



Stephanie Salomé Mejía, Ingeniera de Química especializada en Petróleos y Polímeros graduada en el 2017 de la Escuela Politécnica Nacional Quito-Ecuador. Inicia su carrera en la Industria Petrolera como Ingeniera de Reservorios en el proyecto Samarang, Malasia-Kuala Lumpur Schlumberger-SPM. Trabajó en el área de Subsuelos enfocada en la simulación de Reservorios en proyectos de

recuperación primaria y EOR. En el 2018 fue asignada al proyecto Shaya Ecuador-Quito al grupo de Subsuelo Ingeniería de Reservorios, a cargo de la simulación de Reservorios con proyectos de recuperación secundaria. En el 2019 fue asignada al grupo de desarrollo como Ingeniería de Reservorios, a cargo del seguimiento y evaluación de proyectos de recuperación secundaria, identificación de oportunidades W.O, pozos nuevo y optimización producción. Posee 4 publicaciones internas en SLB.



Lucía Margarita Montenegro Aguas, Ingeniera Química, Magister en Ingeniería Ambiental ha sido docente por 24 años en la EPN de las cátedras de Transferencia de Calor, Control de la Contaminación del Aire, entre otras. Es miembro de Green Woman Internacional y cuenta con la Certificación de Evaluador de

la Norma ISO 17025 para laboratorios. En referencia a las publicaciones las ha realizado en la "Revista Politécnica" y en la "1st International Conference on Water and Sustainability" con temas relacionados al Tratamiento de aguas y Remediación de Suelos. Ha dictado más de 20 seminarios y conferencias de Monitoreo Ambiental; y dirigido más de 40 proyectos de titulación en temas de Transferencia de Calor, Refinación del Petróleo y Contaminación Ambiental.

Propuesta de Actualización del RAOHE Incorporando Tecnologías de Fracturamiento Hidráulico, Reinyección de Recortes y Revisión de Límites Permisibles en la Gestión de Descargas Líquidas

Castillo Castro, Daniel Sebastián^{1,2,*} ; Zambrano Carranza, Johnny Robinson¹ ; Rivera Parra, José Luis¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería en Petróleos, Quito, Ecuador

²National Cheng Kung University, Laboratorio de Eficiencia Energética y de Recursos, Tainan, Taiwán

Resumen: La legislación ambiental hidrocarburífera en el Ecuador inició en los 70 con el llamado pacto de caballeros y tuvo su momento cumbre con la expedición del RAOHE en 2001. En este punto, el RAOHE se consolidó como una herramienta para la explotación sustentable de los recursos hidrocarburíferos, y un garante de la estabilidad jurídica de una inversión extranjera que reactivase el sector petrolero. Sin embargo, 20 años después, con nuevos avances tecnológicos y garantías ambientales más restrictivas, se ha generado un desfase entre aquello que se encuentra regulado y la actual tecnología empleada en las operaciones de la industria. En este documento, se analizó esta discontinuidad normativa y de procesos desde el enfoque de la tecnología relacionada con el manejo y disposición de agua. Específicamente, en la revisión y análisis de límites permisibles en el manejo de descargas líquidas, reinyección de recortes y fracturamiento hidráulico. Este ensayo se apoyó en el estudio de fuentes de investigación primaria para la definición de sugerencias generales sobre la aplicación y gestión ante la entidad de gestión ambiental, a la espera de que esta información pueda aportar a la articulación de marcos técnicos más comprensibles.

Palabras clave: CRI, descargas líquidas, fracturamiento hidráulico, RAOHE, reinyección de recortes.

RAOHE Review Proposal that Considers Technologies of Hydraulic Fracturing, Cuttings Reinjection and Revision of Permissible Limits in the Handling of Liquid Effluents

Abstract: The Oil & Gas environmental legislation in Ecuador has had a brief history. Its current regulation body is the RAOHE (Substitute Regulation to the Environmental Regulation for Hydrocarbon Operations in Ecuador) from 2001. At that time, the RAOHE was a robust mechanism that could guarantee the sustainable exploitation of hydrocarbon resources, while providing a solid ground for foreign capitals aiming to invest in the oil sector. Nonetheless, the RAOHE cannot be considered fit anymore to new technological advances and current international environmental regulations standards. Two decades without any update has generated a knowledge gap inside the RAOHE about what is regulated and what could be regulated under best management practices available in the industry. This paper aims to address this operational regulatory gap by performing an extensive literature review focused on wastewater management and better management practices. Specifically, this study evaluates the permissible limits in the handling and treatment of liquid discharges, cuttings reinjection and hydraulic fracturing. This paper provides a set of general suggestions and findings on the aforementioned areas. It is expected that this information can become a tool for policymakers to articulate more comprehensive technical regulatory frameworks.

Keywords: CRI, cuttings reinjection, hydraulic fracturing, liquid effluents, RAOHE.

1. INTRODUCCIÓN

Desde los años 70, muchos países desarrollaron un conjunto de normativas ambientales que apuntan a proteger el medioambiente de los efectos nocivos de la actividad humana. En la actualidad, estas mismas naciones aún son las pioneras en la formulación de regulaciones comprensibles y ejecutables que garantizan que los controles promulgados sean aplicados

adecuadamente (Environmental Performance Index, 2018; WorleyParsons, 2014). Sin embargo, en Ecuador la realidad es muy distinta. A nivel cantonal (Gobiernos Autónomos Descentralizados), las ordenanzas pertinentes aún no disponen del nivel de madurez de otras instancias más avanzadas (Environmental Performance Index, 2018). El Reglamento Sustitutivo del Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador (RAOHE) (2001) se sustentó

*sebasdec@gmail.com
Recibido: 07/11/2019
Aceptado: 05/10/2021
Publicado: 01/11/2021
10.33333/rp.vol48n2.05
CC 4.0

sobre el artículo 86 de la Carta Magna de 1998 vigente hasta 2008 y marcó un referente en la regulación ambiental. El Reglamento se concibió bajo el ideal de constituirse como un mecanismo para la explotación racional de los recursos hidrocarburíferos y un garante de la estabilidad jurídica para la inversión extranjera; pero actualmente, el RAOHE se ha quedado muy por detrás de su objetivo principal: “superar las deficiencias del Reglamento Ambiental anterior” (Zehner, 2012). Transcurridas casi dos décadas desde su implementación, y sin ningún cambio sustancial evidente, existe un desfase entre lo que se encuentra regulado y la tecnología hoy empleada en las operaciones de la industria hidrocarburífera.

A partir de las oportunidades en I+D como mecanismo para la solución de problemas ambientales asociados a la industria del gas y petróleo, una importante proporción de esta discontinuidad corresponde a la tecnología relacionada con el manejo y disposición de agua de procesos. En este ámbito, en consideración del uso diversificado del agua durante las operaciones de Exploración y Producción (E&P), parte de los desafíos al respecto incluyen comprender los impactos de su extracción desde los sistemas superficiales y subterráneos. Y consecuentemente, evaluar su rol activo durante la fase productiva de una operación de petróleo y gas no convencionales (U.S. Environmental Protection Agency, 2004). A su vez, este desfase regulatorio se afrontó desde un conjunto de aspectos que no se han actualizado en un periodo considerable de tiempo o que aún no han sido regulados. Estos incluyen: a) los límites permisibles en el manejo y tratamiento de descargas líquidas, b) la reinyección de recortes como método “cero-emisiones” de disposición de residuos, y c) el conjunto de tecnologías y técnicas de extracción de petróleo y gas no convencionales conocidas colectivamente como fracturamiento hidráulico.

El análisis se enfocó en estudiar las regulaciones que rigen la operatividad de las tecnologías de: a) fracturamiento hidráulico, y b) reinyección de recortes de perforación; con el propósito de definir sugerencias generales para la aplicación y gestión de estos procedimientos. Por otra parte, se analizaron los parámetros de control en la administración de descargas líquidas expuestas en la literatura científica y legislativa para generar una propuesta de actualización de los límites permisibles en el manejo de descargas líquidas considerados en el RAOHE. Finalmente, se espera que esta información aporte a la articulación de marcos técnicos, que sirvan de ancla para afianzar el empleo de prácticas ecológicas más eficientes; al mismo tiempo que permitan normalizar la existencia de ciertos vacíos jurídicos, explícitamente el abuso del derecho y la indefensión jurídica.

2. FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO

En su artículo “*The Frackers and the Birth of an Energy Boom*”, Bryan Burrough (2013) menciona “uno podría argumentar que, exceptuando el internet, el fracturamiento hidráulico ha sido el avance tecnológico más importante en las últimas dos décadas”. Y una vez que se lo piensa, puede tener razón.

En medida de su relevancia, los esfuerzos por regular el fracturamiento hidráulico esencialmente han sido direccionados a normar una actividad mediáticamente descrita como agresora potencial de los cuerpos de agua (superficiales y subterráneos) y de la geología de sitios hidráulicamente fracturados (U.S. Environmental Protection Agency, 2004). Regularmente, la desavenencia sobre el fracturamiento hidráulico surge a partir de un desajuste en su concepto, una brecha en el lenguaje. En términos de ingeniería, el fracking conceptualiza una actividad específica de estimulación, limitada a la generación de grietas en la roca a partir de la inyección de fluido; mientras que para muchos grupos ambientalistas y ciudadanos preocupados, ha llegado a representar casi todas las fases del ciclo de desarrollo de un pozo. A fin de dilucidar los malentendidos sobre el tema, en esta sección se expone la dinámica del proceso de estimulación, consideraciones ambientales concomitantes y un sumario de los principales estándares manejados dentro de las operaciones de fracturamiento hidráulico (Alberta Energy Regulator, 2018; U.S. Geological Survey, 2014).

2.1 Estudio de Normativas Vigentes

El fracturamiento hidráulico consiste en el bombeo de un fluido de fracturación, compuesto por agua, aditivos y partículas apuntalantes, a una formación a una velocidad y presión calculadas y predeterminadas para generar fracturas o grietas en el estrato objetivo. El trabajo conjunto de estos compuestos permite que la fractura se abra paso dentro de la roca (Canadian Association of Petroleum Producers, 2017; Viswanathan et al., 2015). La primera etapa del fracturamiento hidráulico inicia con su diseño, el cual implica identificar las propiedades de la formación objetivo, incluida la presión de fractura y la longitud deseada de las fracturas (King, 2012). Una vez obtenido el modelo del fracturamiento, se continúa con la evaluación del pozo, equipo del pozo y equipo de fracturamiento hidráulico a las condiciones de presión y flujo a las cuales estarán sujetos durante la operación (ALL Consulting & Ground Water Protection Council, 2009). Las pruebas incluyen la evaluación del casing y cemento del pozo durante la perforación y completación, y la ejecución de pruebas de presión al equipo de fractura hidráulica (Harper, 2007).

Posteriormente, al llevar la operación al campo es importante notar que el fracturamiento hidráulico puede ejecutarse tanto en pozos horizontales como verticales. La diferencia residirá en las etapas del proceso, es decir, cada etapa de un tratamiento de fractura de un pozo horizontal es equivalente a un tratamiento de fractura para un pozo vertical.

El procedimiento estándar establece que en un inicio debe ejecutarse un procedimiento de “mini frac” –una prueba diagnóstica de inyección-admisión– seguida del bombeo secuencial de un tratamiento ácido, un bache de agua de baja fricción –*slick water*, que facilita el flujo del apuntalante– y varias sub-etapas de apuntalante y agua. La configuración de estas sub-etapas destaca puesto que se inicia con el bombeo de un gran volumen de agua con arena de malla fina, y continúa con el decremento gradual del volumen de agua y el aumento paulatino del tamaño de grano del apuntalante (Palisch et al., 2010). Después de la finalización de la sub-etapa final de

apuntalante grueso, el pozo y el equipo se lavan con la inyección de un volumen de agua dulce lo suficientemente grande para eliminar el exceso de apuntalante del equipo y del pozo.

Los fluidos de fractura consisten principalmente en agua y arena (alrededor del 98%), pero también incluyen una variedad de aditivos. La mayoría de estos aditivos cuentan con usos exclusivamente industriales, presentando riesgos para la salud sólo cuando son manipulados imprudentemente, al omitir los procedimientos de seguridad correspondientes (The Royal Society & Royal Academy of Engineering, 2012). Un tratamiento típico emplea concentraciones muy bajas de entre 3 y 12 aditivos dependiendo de las características del agua y la formación que se fracture. La perforación y la fracturación hidráulica de un pozo puede requerir típicamente de 2 a 4 millones de galones de agua (Gallegos et al., 2015; Satterfield et al., 2008). Sin embargo, aun cuando estos volúmenes de agua necesarios para perforar y estimular los pozos de gas de esquisto parecen inusualmente grandes, generalmente representan un pequeño porcentaje del uso total de agua en las cuencas correspondientes. No obstante, al requerirse en un período relativamente corto, su extracción puede afectar a la fauna marina, suministros de agua municipales y otras industrias (Kondash & Vengosh, 2015). Para ello, en consideración de las condiciones complejas en la obtención de agua, los estados y operadoras han ideado medidas compensatorias tales como la diferenciación de flujos estacionales y planes locales de administración del recurso hídrico (identificación de suministros de agua abundantes) (Weston, 2008).

La contaminación de los recursos hídricos es uno de los aspectos más preocupantes para la opinión pública. Esta podría darse debido a los químicos adicionados al fluido de fracturamiento hidráulico, tanto como a derrames, fugas o migración del fluido de fractura o agua de formación (Vengosh et al., 2014). A la fecha, dentro de la literatura científica aún no se ha reportado ninguna evidencia definitiva sobre la contaminación de acuíferos debido a la migración de los fluidos inyectados a los reservorios a lo largo de las fracturas creadas por el fracturamiento hidráulico (Gallegos et al., 2015; Mauter et al., 2014). Sin embargo, al haberse encontrado evidencia sobre la migración de gas a lo largo de pozos construidos precariamente (Vengosh et al., 2014), se infiere la posibilidad de la migración de otros fluidos por medio de los mismos mecanismos. Al mismo tiempo, también es cuestionado el impacto que tiene la inyección de grandes volúmenes de agua sobre la integridad del pozo (Vengosh et al., 2014).

Asimismo, en la industria existe incertidumbre alrededor de ciertos incidentes sísmicos que pueden estar asociados con la disposición del agua de producción extraída. Es propicio señalar que, previamente, la sismicidad inducida también ha sido vinculada a una serie de otras actividades humanas (proyectos geotérmicos, extracción minera y construcción). En

ese contexto, la sismicidad inducida puede ocurrir cuando existe una falla geológica bajo estrés. El aumento de la presión mientras se inyecta el fluido (agua de producción) puede liberar la falla y esto permitir el deslizamiento. Lo que a su vez resulta en ciertas liberaciones de energía muy similares a aquellas generadas por los terremotos, pero que debido a diferencias significativas en su frecuencia y magnitud, son catalogadas como eventos cizallamiento mas no pequeños sismos (Frohlich et al., 2010).

Por último, resulta importante considerar que debido a que el fracturamiento hidráulico no es una operación de procedimiento universal, las suposiciones y generalizaciones concernientes al uso del agua dentro de las operaciones de fracturamiento hidráulico y el potencial de los impactos ambientales deben tomarse con precaución.

2.2 Recomendaciones

A partir del trabajo conjunto entre industria, agencias reguladoras y público, se ha desarrollado una serie de documentos que abordan los problemas de gestión de riesgos que acompañan a la construcción y gestión de pozos no convencionales (e.g. “Shale Gas Extraction in the UK: a review of hydraulic fracturing”, “API’s Guidance Documents on Hydraulic Fracturing Operations”, “An Investor Guide to Disclosing Risks from Hydraulic Fracturing Operations”, etc...). Estas directrices proveen una fuente fiable de soluciones ambientales innovadoras ante los nuevos desafíos de la revolución tecnológica del fracking. A partir de su estudio y análisis, se presentó una propuesta técnica razonable a la regulación del fracturamiento hidráulico que propende a garantizar el desarrollo sostenible de la actividad industrial. El ámbito de la propuesta se encuentra direccionado a siete conjuntos de prácticas recomendadas, listando entre ellas: a) el aseguramiento de la integridad del pozo; b) la detección de contaminantes en el agua subterránea; c) la detección de fugas potenciales de gas; d) la mitigación de la sismicidad inducida; e) la gestión integral del agua y de los fluidos de fractura y de retorno; y, f) el manejo de riesgos ambientales.

La consecución del primer punto busca anular los incidentes por fugas accidentales de gases y fluidos peligrosos desde las locaciones. Su mecanismo principal es la implementación de una política estándar² sobre la construcción integral de pozos para eliminar virtualmente los riesgos de fugas de metano y químicos que surgen de la construcción deficiente (American Petroleum Institute, 2009).

Para el segundo y tercer objetivo, por una parte, se requiere identificar las condiciones de referencia en los cuerpos de agua vecinos y las fuentes para agua potable. Y por otra, monitorear de manera rutinaria su calidad durante la fracturación y la producción, incluyendo riesgos potenciales de metano biogénico cercano a la superficie (Canadian Association of Petroleum Producers, 2012a; Kiparsky & Foley, 2013). Se recomienda que los estudios sean conducidos por laboratorios

² La política basada en los estándares API incluye entre los principales lineamientos: i) Revisión mandatoria de los diseños del pozo, i.e. inspecciones *in situ*, según corresponda, para garantizar que los pozos se construyan de acuerdo con el diseño acordado; ii) Empleo de técnicas eficaces, e.g. método de bombeo y sello, en donde el cemento debe alcanzar una resistencia a la

compresión de 300 psi en 24 horas y 800 psi en 72 horas; iii) Asentamiento del revestidor superficial a una profundidad no menor a 150 pies por debajo del acuífero aprovechable más profundo.; y, iv) Testeo rutinario de pozos pre y post fractura (registros de cemento) (American Petroleum Institute, 2009).

independientes para garantizar la transparencia del reporte (ALL Consulting & Ground Water Protection Council, 2009).

Para el logro del cuarto punto, se establece que es deber del servicio geológico -o entidad análoga- realizar evaluaciones en el territorio nacional. Esto, a fin de caracterizar estreses, identificar fracturas en las formaciones de interés y establecer una base de datos nacional donde se identifique las zonas más apropiadas para las locaciones de pozos hidráulicamente fracturados (Rutqvist et al., 2007).

El quinto objetivo está parcialmente orientado a extraer el mínimo de agua necesaria para realizar operaciones de fracturamiento. Sus estrategias incluyen sacar ventaja de las diferencias estacionales en los cauces naturales (ALL Consulting & Ground Water Protection Council, 2009), emplear fuentes no potables (e.g. acuíferos salinos, aguas residuales tratadas o aguas de reflujó) (American Petroleum Institute, 2010; Kiparsky & Foley, 2013) e innovar en la utilización de fluidos de fractura no acuosos (e.g. gas licuado de petróleo gelificado, dióxido de carbono y espumas nitrogenadas) (The Royal Society & Royal Academy of Engineering, 2012).

Además, abarca la evaluación y gestión de aditivos en los fluidos de fractura y la divulgación de aditivos en los fluidos de fractura. Los requerimientos clave incluyen la eliminación casi absoluta de los productos químicos tóxicos utilizados en las operaciones de fracturamiento y la divulgación exhaustiva de los objetivos de reducción (Barrios, 2012; Kiparsky & Foley, 2013; Liroff et al., 2017). También, señala que las compañías se encuentran en la obligación de revelar públicamente, en bases individuales pozo por pozo, el nombre común y el número único de identificación química (CAS) de cada ingrediente químico de los fluidos de fracturación utilizados o planificados para uso en sus pozos (Canadian Association of Petroleum Producers, 2012b).

En lo referente al transporte, manipulación, almacenamiento y disposición de fluido de fractura, agua de producción, flujo de retorno y desecho del fluido de fractura, se recomienda el empleo de tanques de acero o sistemas de circuito cerrado siempre que sea posible. Con ello se mitiga el riesgo de contaminación (evitando el empleo de zanjas y piscinas de retención). Otro factor clave en esta materia incluye la evaluación de los flujos de retorno y agua producida para garantizar un tratamiento o eliminación seguros (American Petroleum Institute, 2009; Canadian Association of Petroleum Producers, 2012c).

Para el logro del sexto punto, los requerimientos resaltan lo señalado por el capítulo IV "Estudios Ambientales" del RAOHE. Indicando que, los estudios de impacto ambiental (EIA) deben ser mandatorios para todas las operaciones de fracturamiento hidráulico, considerando una participación activa por parte de la comunidad local. El EIA debe evaluar los riesgos a lo largo de todo el ciclo de exploración y producción, incluyendo la disposición de desechos, abandono de pozos y riesgos sísmicos (ALL Consulting & Ground Water Protection Council, 2009; American Petroleum Institute, 2013,

2014; The Royal Society & Royal Academy of Engineering, 2012).

De momento, aun cuando en Ecuador sólo se han realizado operaciones de fracturamiento en yacimientos convencionales, la existencia de reservas hidrocarburíferas no convencionales no se lo descarta (basados en las prospecciones de Cuervos y Cerrajón) (Andagoya & Pérez, 2013). Y fundamentados en las similitudes entre ambas aplicaciones del fracking, esta circunstancia no hace más que brindar más trascendencia a este estudio sin llegar a invalidar las recomendaciones aquí propuestas.

La discusión circundante al fracturamiento hidráulico toma mayor relevancia al sopesar los beneficios económicos frente a los posibles impactos en las personas y el medio ambiente. No existe duda que este juega un papel vital en el suministro de energía contemporáneo. Empero, los riesgos de salud, seguridad y ambiente asociados al fracturamiento hidráulico como un medio de extracción de recursos no convencionales pueden llegar a ser manejados efectivamente en Ecuador siempre que las mejores prácticas operacionales sean implementadas y aplicadas a través de la regulación apropiada. Ninguna de las propuestas de prácticas recomendadas es tan novedosa como para ser descartada de aplicarse por operadores prudentes (Mordick, 2012). El camino está a medio trazar, y es posible para las compañías ir más allá en términos de mejores prácticas a fin de mantener su credibilidad y deber con la preocupación pública.

3. REINYECCIÓN DE RECORTES

La gestión general de residuos está subordinada a la jerarquía de minimización, reducción, reciclaje y recuperación, tratamiento y su disposición o descarga final (Abou-Sayed & Guo, 2001). Así cuando en 1993 en Noruega se incrementaron obligatoriamente las regulaciones para la disposición de recortes de perforación en áreas marinas, la inyección de recortes de perforación (CRI o DCI), i.e., la disposición de los desechos asociados a la perforación dentro de una formación receptora hidráulicamente fracturada surgió como una tecnología emergente ambiental y económicamente fiable (Guo et al., 2005).

Su campo de aplicaciones es tan amplio que en la actualidad en Ecuador esta práctica ya se ha llevado a cabo exitosamente en contadas ocasiones, y tal ha sido su eficiencia, que ha permitido poner sobre la mesa la articulación de marcos técnicos que avalen estas operaciones (Romero et al., 2016). En este contexto, a continuación, se establece un sumario de las prácticas más relevantes recomendadas en el aseguramiento de CRI, por medio de una revisión detallada de los procedimientos operacionales, casos de estudios y reformas regulatorias internacionales.

3.1 Estudio de Normativas Vigentes

En un modo pragmático, todas las operaciones de inyección de recortes son procesos por baches, en los cuales se preparan periódicamente volúmenes moderados³ de lechada, i.e.

³ Aproximadamente 200 BPD inyectados en tasas de 1 a 6 BPM (Keck, 2002).

recortes triturados en presencia de agua, los cuales son inyectados con un determinado tiempo de separación o cierre entre cada inyección. (Guo & Abou-Sayed, 2003) Figurativamente, después de la primera inyección se crea una fractura planar dentro de la formación receptora, sobre la cual la lechada filtra al mismo tiempo que esta (la fractura) se cierra, atrapando los recortes y lodo dentro de la grieta generada. Con las inyecciones consiguientes se abren más fracturas derivadas de la fractura original. Estas conforman una red de fracturas interconectadas conceptualizadas como el dominio de eliminación (Moschovidis et al., 1994).

La reinyección de recortes se desarrolla bajo dos esquemas estándar, inyección anular e inyección en un pozo dedicado (completación de tubería de producción y empacador). La inyección anular es más común en locaciones remotas o ecológicamente sensibles, donde los recortes se inyectan en el anular del pozo que está siendo perforado. Del otro lado, el esquema de un pozo dedicado suele ser más típico de las operaciones de inyección permanente a largo plazo. Frecuentemente, estos pozos están en servicio durante varios años (Keck, 2002).

En la actualidad, en su mayoría, los programas de reinyección se desarrollan sin presentar contratiempos serios. Sin embargo, hay ocasiones en las que las operaciones de CRI se ven comprometidas por numerosos factores. Algunos casos incluyen el bloqueo de la trayectoria existente hasta el estrato de disposición por debajo de la tubería de revestimiento o del espacio anular. Asimismo, aunque su ocurrencia es rara y se limita a operaciones *offshore*, existen otros casos en los que las lechadas de inyección migran a través de fracturas naturales, fracturas inducidas hidráulicamente o secciones del pozo cementadas en forma deficiente, volviendo al lecho marino (Guo et al., 2005; Nagel & Strachan, 1998).

Análogamente, a fin evitar estas circunstancias existe un espectro metodológico aún más extenso que garantiza el éxito de una operación de CRI. El mismo que incluye la planificación cuidadosa del trabajo, diseño e ingeniería adecuados, monitoreo continuo, gestión de riesgos y procedimientos operacionales de contingencia (Guo et al., 2007). En primer lugar, el estudio de factibilidad identifica los posibles riesgos operacionales y propone las medidas de mitigación correspondientes. Sus requerimientos mínimos incluyen la descripción de la geología subsuperficial, caracterización de los recortes (tasa de generación, volumen total, propiedades químicas y físicas), detalle de las facilidades requeridas para la operación y, análisis de riesgos, opciones de mitigación y procedimientos operacionales.

En segunda instancia, el diseño y simulación de la operación permiten determinar la reología de la lechada, comportamiento de los estreses de formación y capacidad de almacenamiento. Finalmente, una vez que el diseño de la operación está en su lugar, es necesario monitorear las operaciones activamente. El control de calidad y los ajustes de propiedades reológicas y

físicas específicas del sitio son cruciales para mantener la integridad de la operación y completar con éxito el proyecto (Abou-Sayed & Guo, 2002; Saasen et al., 2001). Los parámetros que deben considerarse dentro del monitoreo incluyen, el registro continuo de las propiedades de la lechada inyectada (composición, concentración, densidad, etc...), de la presión de fondo y durante la inyección y en los periodos prolongados de cierre y el análisis del comportamiento de la formación y la fractura durante la inyección y cierre (Bruno et al., 2000).

3.2 Recomendaciones

El aseguramiento de una operación de reinyección de recortes es un objetivo complejo de alcanzar. No obstante, distintas experiencias operativas han demostrado que el seguimiento de un proceso bien planificado e integrado, dentro del que se consideren barreras y controles para evitar que los riesgos se propaguen y causen consecuencias inestimadas, contribuye de manera efectiva en la acometida de este tipo de operaciones (Abou-Sayed & Guo, 2002; Guo & Abou-Sayed, 2003). Una recopilación de las mejores estrategias para el aseguramiento de una operación de CRI, incluye: a) la contención de fluidos, b) el diseño del procedimiento operacional, y c) el monitoreo post-implementación. Estas recomendaciones proporcionan un mecanismo para afianzar la seguridad industrial y ambiental del procedimiento, en tanto que permanecen flexibles para su aplicación en distintos escenarios.

En primera instancia, la irrupción de la lechada en superficie y en acuíferos someros es el principal riesgo ambiental que plantea la CRI (Abou-Sayed & Guo, 2002). Al respecto, la mayor medida de mitigación consiste diseñar y modelar la operación de manera precisa para obtener una comprensión de las características principales que afectarán el crecimiento de la fractura y consideraciones asociadas a largo plazo (Guo & Abou-Sayed, 2003; Guo et al., 2007).

Como prácticas recomendadas para la selección de la formación de disposición se incluyen: a) la selección un estrato con estreses bajos (arcillas y lutitas) limitado por encima y por debajo de zonas con altos estreses (areniscas) y alejado de fallas o sus prospectos; y, b) la verificación de la integridad del pozo de inyección. Localmente, como resultado del estudio llevado en el campo Apaika, (Hernandez et al., 2015) concluyeron que las formaciones más adecuadas para albergar un proyecto de CRI son Tiyuyacu Superior, T superior e inferior, U superior e inferior y Hollín.

Con respecto a la integridad del pozo, la preferencia general es seleccionar pozos que provean un acceso adecuado a la formación de interés; con una buena calidad de cemento a lo largo de toda la zona de eliminación⁴; y una fecha de perforación lo más reciente posible para minimizar la reacción de la formación y deterioro de la inyectividad con el tiempo⁵ (Gumarov et al., 2014). Adicionalmente, se señala que el diámetro efectivo seleccionado debe proveer una velocidad y

⁴ Las mejores prácticas de cementación integran la buena centralización de los revestidores, colocación óptima, eliminación eficaz del lodo y espaciadores, definición apropiada de los topes de cemento para un aislamiento efectivo y rotación de la tubería durante la cementación (Abou-Sayed & Guo, 2002).

⁵ O a su vez, un pozo en el cual se haya dejado el espacio anular con una salmuera libre de sólidos que sea compatible con la formación, a fin de evitar la dispersión química y la potencial obstrucción de los poros (Abou-Sayed & Guo, 2001).

régimen de flujo óptimos dentro del pozo, minimizando la precipitación de sólidos.

Por otro lado, en correspondencia al diseño operacional, las consideraciones más importantes son el diseño de la reología de la lechada y el procedimiento operacional. Como regla general, la tasa de inyección debe ser igual o ligeramente mayor que la tasa de generación de recortes. Esto minimizará la necesidad de tanques de almacenamiento. Consideraciones adicionales incluyen: desplazar todo el volumen del anular o tubería de inyección después de cada bache para evitar el asentamiento de partículas y el taponamiento de la zona de eliminación. Adicionalmente, se recomienda diseñar el equipo de completación y superficie reconociendo su interacción directa con el sistema de inyección. El estándar incluye un cabezal y tuberías que se adapten a las necesidades de la operación, con materiales anticorrosivos superpuestos a las áreas de sellado y juntas extra gruesas a modo de evitar riesgos de falla del equipo ocasionados por el desgaste erosivo (Guo et al., 2007).

Las últimas recomendaciones corresponden a medidas de mitigación tales como el monitoreo y verificación de operaciones. Su estándar más valorado es el empleo del análisis de datos operativos (propiedades de la lechada, resultados de las pruebas de sedimentación y presión de inyección) para validar los resultados del modelo preparado durante la evaluación de factibilidad y simulación. De esta manera es posible la generación de alertas tempranas en miras a mejorar los procedimientos y parámetros operativos para evitar consecuencias no deseadas (Comisión OSPAR, 2001; Guo et al., 2007).

Las soluciones actuales sobre el manejo de desechos sólidos distan de la perfección, pero son mucho mejores que las disponibles hace algunas décadas. Por ello, es fundamental que las operaciones sigan las mejores prácticas de evaluación, diseño, implementación y monitoreo. Esto es particularmente importante para los proyectos de CRI en áreas remotas o ambientalmente sensibles ya que a menudo esta tecnología es la única opción económica y cualquier percance con la operación podría resultar muy costosa técnica, ambiental y socialmente.

4. REVISIÓN LÍMITES PERMISIBLES EN EL MANEJO DE DESCARGAS LÍQUIDAS

Uno de los desafíos del siglo XXI ha sido satisfacer la demanda energética mundial de una manera segura y sustentable. Para ello, las compañías de petróleo y gas y los organismos gubernamentales han implementado regulaciones en miras de mejorar la sostenibilidad de la industria (Doric & Dimovski, 2018). Así, debido a la creciente demanda del recurso hídrico, la regulación sobre el manejo y tratamiento de aguas es uno de los ejes en este ámbito (Grant et al., 2012). Sin embargo, cuando el conjunto de herramientas y directrices ambientales regulatorias son muy complejas, esto lleva a incoherencia entre políticas e incertidumbre para las empresas.

Localmente, cuando se propuso el Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarbúricas en el Ecuador (RAOHE), éste buscó superar las deficiencias de su antecesor, a través de

revisiones y adaptaciones en la metodología de trabajo. En este ámbito, uno de los aspectos más impactantes fue el cambio radical respecto al listado de parámetros para el monitoreo y control de descargas. Previamente, el número de parámetros de monitoreo correspondiente a aguas de producción era exorbitante en comparación de otras legislaciones, ocasionando que las rutinas de trabajos se volvieran poco operacionales (Zehner, 2012).

El RAOHE vigente condensa toda la materia de límites permisibles en el Capítulo XII, artículo 86, y dicta:

“Los sujetos de control y sus operadoras y afines en la ejecución de sus operaciones, para descargas líquidas [...], cumplirán con los límites permisibles que constan en los Anexos No. 1, 2 y 3 de este Reglamento, los cuales constituyen el programa mínimo para el monitoreo ambiental interno ...”.

Más allá, es primordial reconocer que las descargas provenientes de los sistemas de aguas residuales contienen contaminantes extensivamente persistentes, así como la existencia de problemas ambientales y salubres directamente derivados del tratamiento ineficiente de las mismas (Government of Canada, 2015). Sobre la base de este hecho, se propone la actualización de los límites permisibles y consideración de lineamientos sobre la administración de efluentes líquidos. Propuesta que tiene como objetivo la limitación de los efectos potencialmente dañinos que estas sustancias puedan tener sobre los ecosistemas y la salud humana.

4.1 Estudio de Normativas Vigentes

La metodología de trabajo empleada desarrolló un marco comparativo en base a fuentes bibliográficas secundarias y extrajo información de fuentes primarias como respaldo a aquella encontrada en primera instancia. En razón a esta mecánica, mediante el empleo de los indicadores EPI (Environmental Performance Index, 2018) y CAPP (WorleyParsons, 2014) fue posible recopilar la gran mayoría de aspectos relevantes respecto al manejo de descargas líquidas. Las metodologías empleadas por EPI y CAPP permiten analizar el desempeño (de la política ambiental) en diferentes niveles ecológicos y sociales y escalar razonablemente las políticas ambientales marco sobre la base de la realidad industrial correspondiente a cada nación. En la siguiente sección, la Tabla 1. expone los lineamientos estipulados en el RAOHE (Ministerio de Energía y Minas, 2001) frente a aquellos de otras naciones seleccionadas como sujetos de referencia, entre las que se incluye Australia (Department of Environment and Heritage Protection, 2014a, 2014b), Canadá (Alberta y Ontario) (Environment and Sustainable Resource Development, 2014; Minister of Fisheries and Oceans, 2002), Estados Unidos (Luisiana) (Louisiana Department of Environmental Quality, 2017) y Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Entre los justificativos pertinentes se encuentran los niveles de actividad en el sector de gas y petróleo de estas regiones, y la madurez y apertura comparativa que cada uno de estos gobiernos presenta.

Cabe acotar de manera enfática que los lineamientos de la Tabla 1 son generales, puesto que dentro del entorno natural existe una variabilidad inherente, la cual induce al empleo de información específica para el desarrollo de pautas e índices apropiados de calidad ambiental en determinadas ocasiones. Este razonamiento puede ser ampliamente sustentado bajo el amparo de la ecotoxicología, un estudio sobre cómo los químicos (usualmente de origen humano o antropogénico) se comportan dentro del medio ambiente y cómo afectan a los organismos que allí se desarrollan.

4.2 Recomendaciones

En la industria hidrocarburífera, existen sustancias que ocurren de forma natural o que se evidencian a través de procesos naturales, como el cadmio, el mercurio y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), cuya eliminación completa de emisiones, descargas y fugas de todas las fuentes potenciales resulta imposible (Burgess, 2013). Las concentraciones de estos químicos tóxicos y nutrientes biológicamente disponibles en exceso pueden derivar en diversos problemas como floraciones de algas tóxicas, pérdida de oxígeno, muerte de peces, pérdida de biodiversidad y pérdida de lechos de plantas acuáticas (Voutsas et al., 2001). Así, al momento de elaborar las directivas individuales pertinentes, el entendimiento apropiado de la toxicología de los contaminantes ambientales debe ser adecuadamente considerado y las medidas deben tener como objetivo el cese de las emisiones, vertidos y pérdidas en el agua de las sustancias peligrosas prioritarias que se derivan de las actividades humanas (Burgess, 2013).

Además, la naturaleza de estos elementos tóxicos también puede ser antropogénica o biogénica. Dentro de la literatura

existen muchas aproximaciones respecto al manejo y control de emisiones, mecanismos de atenuación, y herramientas de remediación. A continuación, se compilan criterios valiosos (pertinentes, relevantes y actuales) para establecer lineamientos idóneos para sostener la vida en un medio genérico.

- Un pH dentro de un rango de 6.5 a 9.0 es el más apropiado para el sostenimiento de comunidades de peces (Sparling, 2016a; U.S. Environmental Protection Agency, 2018).
- Jouanneau et al. (2014) y Safari et al., (2013) coinciden en que concentraciones menores a 60 mg/L en la descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce pueden ser tomadas como buenas señales de cumplimiento ambiental. Adicionalmente, se anota que bajas concentraciones de oxígeno disuelto, cuando combinado con la presencia de sustancias tóxicas pueden derivar en estrés de los ecosistemas acuáticos (puesto que la concentración de ciertos elementos se incrementa por bajas concentraciones de oxígeno disuelto). Asimismo, que las altas temperaturas del agua también incrementan los efectos adversos en la biota asociada con bajas concentraciones de oxígeno disuelto (Alabaster, 1982b, 1982a).
- La “Directiva de Nitratos”(Jarvie et al., 1998), señala que un cuerpo superficial de agua fresca puede ser clasificado como no contaminado cuando la concentración de amoníaco (como nitrógeno total) no excede los 11.3 mg/L.
- La Comisión Oslo – París (OSPAR) establece un objetivo límite de descarga de 30mg/L de hidrocarburos totales en el agua de producción (Commision OSPAR, 2014).

Tabla 1. Matriz comparativa del RAOHE frente a varias regulaciones ambientales internacionales

PARÁMETRO	UNIDADES	ECUADOR		COLOMBIA		ESTADOS UNIDOS (LOUISIANA)	CANADÁ	AUSTRALIA	
		VALOR LÍMITE PERMISIBLE ^a	PROMEDIO ANUAL ^b	EXPLORACIÓN	PRODUCCIÓN				
pH	Un. de pH	5,0 - 9,0	5,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	6,5 - 9,0	6,0 - 8,0	
DQO	mg/L	< 120,00	< 80,00	< 200,00	< 60,00	< 125,00	< 25,00*	< 120,00	
Sólidos totales (ST)	mg/L	< 1700,00	< 1500,00	< 1500,00	< 1500,00		Descriptivo **		
Fenoles	mg/L	< 0,15	< 0,10	< 0,20	< 0,20		< 0,004		
Conductividad Eléctrica	µS/cm	< 2500,00	< 2000,00					< 106,00	
HTP	mg/L	< 20,00	< 15,00	< 10,00	< 10,00	< 15,00	< 30,00		
Nitrógeno Total (N)	mg/L	< 20,00	< 15,00	< 10,00	< 10,00		Ecuación ^e	< 0,668	
Bario (Ba)	mg/L	< 5,00	< 3,00						
Cromo (Cr)	mg/L	< 5,00	< 0,40	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,10	< 0,10	
Plomo (Pb)	mg/L	< 0,50	< 0,40	< 0,20	< 0,20			< 0,20	
Vanadio (V)	mg/L	< 1,00	< 0,80	< 1,00	< 1,00			< 0,10	
HAPs	mg/L	< 0,0003*	< 0,0002*	< 0,01	< 0,01				
BTEX	mg/L			< 0,01 ^c	< 0,01 ^c	< 4,8675	< 0,20*		
Turbidez	NTU						Descriptivo ^f	2,0 - 200,0	
Temperatura	°C	Condición natural ± 3*						Descriptivo ^g	
Color	CU	Inapreciable en solución 1:20*						Descriptivo ^h	

Notas:

^a En cualquier momento

^b Promedio de las determinaciones realizadas en un año conforme a la frecuencia de monitoreo establecida en el Art. 11 del RAOHE

^c En los casos en que el vertimiento puntual de aguas residuales se realice en un cuerpo de agua superficial receptor o en un tramo de este, que tenga como destinación el uso del agua para consumo humano y doméstico, y pecuario la concentración de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) en el vertimiento puntual de aguas residuales deberá ser menor o igual a 0,01 mg/L para aquellas actividades que lo tienen definido como de análisis y reporte.

^d Durante flujos de aguas claras: Incremento máximo de 25 mg/L con respecto a la base para cualquier exposición corta (e.g. periodo de 24 horas). Incremento máximo promedio de 5 mg/L sobre los niveles base para periodos de exposición prolongados (mayores a 24 horas). Durante flujo altos o para aguas turbias: Incremento máximo de 25 mg/L con respecto a los niveles base, cuando estos se encuentran entre 25 y 250 mg/L. No deberá incrementarse más del 10% respecto a los niveles base, cuando la base ≥ 250 mg/L.

^e Total de NH₃ (como N) = 1,216*(0,019/[1/10(((0,09101821+(2729,92/T))-pH)+1)])*0,8224

^f Para flujos de aguas claras: Incremento máximo de 8 NTU sobre la base para periodos de exposición cortos (e.g. periodos de 24 horas). Incremento promedio máximo de 2 NTU a partir de los niveles base para exposiciones mayores a 24 horas. Para flujos turbulentos o de aguas turbias: Incremento máximo de 8 NTU sobre los niveles de base para cualquier tiempo en el que estos se encuentren entre 8 y 80 NTU. No deberá incrementarse más del 10% por sobre los niveles de base cuando la base > 80 NTU.

^g Las adiciones térmicas no deberán alterar la estratificación térmica, exceder el promedio máximo semanal de temperatura, ni exceder la temperatura máxima a corto plazo.

^h Incremento máximo de 20% en Unidades de Color (CU) por sobre sus condiciones naturales.

* Valor referencial al punto de control de inmisión en el cuerpo receptor

- La OMS marca límites individuales dentro de los BTEX (benceno, tolueno, etil-benceno y xileno): 10 µg/L para el benceno –probado como carcinogénico-, 700 µg/L para tolueno, 300 µg/L para etil-benceno y 500 µg/L para xileno (World Health Organization, 2004).
- Sparling (2016b) señala que, en sitios no contaminados, las concentraciones de cromo se encuentran en el intervalo de 5 a 800 µg/L para agua de mar y 26 µg a 5.2 mg/L para agua fresca.
- El Departamento de Energía estadounidense resalta que los cuerpos de agua relativamente limpios tienen hasta 50 µg/L de plomo disuelto. Se acota que, la concentración de sales disueltas en el agua y el pH influyen sustancialmente la cantidad de plomo soluble en aguas superficiales (US Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2007).
- Adicionalmente, en referencia a los metales solubles en agua, posterior al ajuste sobre los niveles de materia orgánica, el Instituto Nacional para la Salud Pública y el Ambiente de los Países Bajos (Lijzen et al., 2001) marca como límites de riesgo graves para los metales presentes en los cuerpos de agua superficiales los siguientes índices: bario (Ba) 7.1 mg/L, cromo (Cr) 0.22 mg/L y plomo (Pb) 0.15 mg/L.

La Tabla 2 incluye la propuesta de modificación a los parámetros de control y monitoreo de descargas líquidas detallados en el RAOHE, Art. 86, anexos correspondientes. Este estudio comparativo entre la directriz ambiental ecuatoriana para las operaciones del sector de gas y petróleo, reportes gubernamentales de agencias ambientales y publicaciones científicas en materia de ecotoxicología en cuerpos acuáticos provee un terreno firme sobre el cual es posible afirmar que una gran parte del RAOHE aún se encuentra vigente en relación con los requerimientos de varios estándares internacionales sobre el manejo y disposición de descargas industriales líquidas. Debido a que en el Ecuador las actividades de exploración y explotación de crudo se llevan a cabo en una zona geográficamente no muy extensa y ecosistémicamente similar, es oportuno brindar una mención especial al detalle en la elaboración de la mayoría de las directrices de 2001.

Además, es necesario hacer énfasis en determinadas características que destacan dentro de otros cuerpos legislativos internacionales. Entre ellas se menciona, desde Colombia, el establecimiento de lineamientos por actividad dentro de la industria (exploración, producción, refino, venta y distribución, y transporte y almacenamiento); y desde Australia y Canadá, el ordenamiento de sentencias narrativas o fórmulas en lugar de valores límite a las descargas, lo cual permite una aproximación a diversas realidades mediante el empleo de un solo mecanismo.

Tabla 2. Propuesta de modificación del RAOHE que contempla la actualización de límites permisibles en el manejo de descargas líquidas

PARÁMETRO	UNIDADES	LINEAMIENTO PROPUESTO ^a	FUENTE
pH	Unidades de pH	6,5 - 9,0	EPP Water (Canadá)
DQO	mg/L	< 60,00	Safari et al. / OMS / Geerdink et al.
Sólidos Totales (ST)	mg/L	Descriptivo ^b	Propuesta
Fenoles	mg/L	< 0,10	RAOHE
Conductividad Eléctrica	µS/cm	< 2000,00	RAOHE
HTP	mg/L	< 15,00	RAOHE
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Ecuación ^c	EPP Water (Canadá)
Bario (Ba)	mg/L	< 3,00	RAOHE
Cromo (Cr)	mg/L	< 0,40	RAOHE
Plomo (Pb)	mg/L	< 0,20	MADS (Colombia)
Vanadio (V)	mg/L	< 0,80	RAOHE
HAPs	mg/L	< 0,001	OMS
BTEX	µg/L	B-10,00 / T-700,00 E-300,00 / X-500,00	OMS
Turbidez	NTU	< 80,00	ARMCAZ & ANZECC / EPP Water (Canadá)
Temperatura	°C	Descriptivo ^d	EPP Water (Canadá)
Color	CU	Descriptivo ^e	EPP Water (Canadá)

Notas:

^a La propuesta promedia las determinaciones realizadas en un trimestre conforme a la frecuencia de monitoreo establecida en el Art. 11 del RAOHE

^b Durante flujos de aguas claras: Incremento máximo de 30 mg/L con respecto a la base para cualquier exposición corta (e.g. periodo de 24 horas). Incremento máximo promedio de 15 mg/L sobre los niveles base para periodos de exposición prolongados (mayores a 24 horas). Durante flujo altos o para aguas turbias: Incremento máximo de 150 mg/L con respecto a los niveles base, cuando estos se encuentran entre 150 y 1500 mg/L. No deberá incrementarse más del 10% respecto a los niveles base, cuando la base ≥ 1500 mg/L.

^c Total de NH₃ (como N) = $1,216 * (0,019 / [1/10^{((0,09101821 + (2729,92/T)) - pH) + 1}]) * 0,8224$

^d Las adiciones térmicas no deberán alterar la estratificación térmica, exceder el promedio máximo semanal de temperatura, ni exceder la temperatura máxima a corto plazo.

^e Incremento máximo de 20% en Unidades de Color (CU) por sobre sus condiciones naturales.

Es importante destacar que las consideraciones aquí detalladas y su respectivo empleo son una función de los procedimientos detallados en la política ambiental local, i.e. si no existen los mecanismos de ejecución adecuados, la implementación de estos límites no concertará resultados.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones relacionadas a las tecnologías de fracturamiento hidráulico y reinyección de recortes son:

- Los riesgos para la salud, la seguridad y el medio ambiente asociados con el fracturamiento hidráulico y con la reinyección de recortes, todos, pueden llegar a ser gestionados de manera efectiva en Ecuador siempre que las mejores prácticas operacionales sean implementadas y aplicadas a través de la regulación apropiada.
- La consideración más importante para todas las operaciones de inyección (incluyendo el fracturamiento hidráulico y la reinyección de recortes) es la protección del agua subterránea. Particularmente, es fundamental mantener la integridad mecánica a lo largo de todo el pozo y el aislamiento apropiado del espacio anular con cemento.
- En bases individuales, es de especial importancia considerar que debido a que el fracturamiento hidráulico no es una operación de procedimiento universal, las suposiciones y generalizaciones

concernientes al uso del agua dentro de las operaciones y el potencial de sus impactos ambientales deben tomarse con cautela.

- En tanto que, de otro lado, es necesario rescatar que aun cuando las condiciones necesarias para la implementación exitosa de la inyección de recortes en estratos subsuperficiales imposibilitan su aplicación cotidiana, la CRI continúa siendo la apuesta más segura para proyectos de perforación en áreas remotas o ambientalmente sensibles.

Respecto a la revisión de los límites permisibles en el manejo de descargas líquidas, se plantea las siguientes conclusiones:

- El trabajo comparativo, aquí presentado, entre la directriz ambiental ecuatoriana para las operaciones del sector de gas y petróleo, reportes gubernamentales de agencias ambientales y publicaciones científicas en materia de ecotoxicología en cuerpos acuáticos provee un terreno firme sobre el cual es posible afirmar que una gran parte del RAOHE aún se encuentra vigente en relación a los requerimientos de varios estándares internacionales sobre el manejo y disposición de descargas industriales líquidas.
- Las consideraciones sobre los límites respectivos a las descargas de efluentes líquidos y su respectivo empleo son una función de los procedimientos detallados en la política ambiental local, implicando que, si no existen los mecanismos de ejecución adecuados, la implementación de estos límites no concertará resultados.

4. RECOMENDACIONES

Para el fracturamiento hidráulico, primordialmente se recomienda evaluar a fondo el estado mecánico del pozo y la formación en cuestión, a fin de garantizar la apropiada contención y aislamiento de los fluidos inyectados y extraídos del estrato productor.

Para la reinyección de recortes, es relevante tomar en cuenta que aun cuando el devolver los rípios de perforación a su sitio de origen ha constituido un paso significativo en el cuidado del medio ambiente, la disposición o descarga de desechos no deja de ser el último eslabón en la gestión de residuos. Y por tanto, es relevante pensar prioritariamente en otros mecanismos que incluyan la minimización, reducción, reciclaje y recuperación, o tratamiento de los residuos.

En lo referente a la revisión de límites permisibles en el manejo de descargas líquidas, se recomienda mantener parámetros de control, con un número limitado de variables, que sean comprensibles para todas las partes involucradas en el control ambiental. Deberán evitarse parámetros que sean demasiado abstractos o sofisticados.

REFERENCIAS

- Abou-Sayed, A., & Guo, Q. (2001). Design Considerations in Drill Cuttings Re-Injection Through Downhole Fracturing. In *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference* (p. 9). Bahrain: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/72308-MS>
- Abou-Sayed, A., & Guo, Q. (2002). Drilling and Production Waste Injection in Subsea Operations—Challenges and Recommendations. In *Offshore Technology Conference 2002* (p. 8). Houston, TX: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.4043/14288-MS>
- Alabaster, J. S. (1982a). Dissolved Oxygen. In J. S. Alabaster (Ed.), *Water Quality Criteria for Freshwater Fish* (2nd ed., pp. 127–142). Stevenage: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-10849-2.50010-1>
- Alabaster, J. S. (1982b). Extreme pH value. In J. S. Alabaster (Ed.), *Water Quality Criteria for Freshwater Fish* (2nd ed., pp. 21–45). Stevenage: Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-10849-2.50006-X>
- Alberta Energy Regulator. (2018). Hydraulic Fracturing. Retrieved July 19, 2018, from <https://www.aer.ca/providing-information/by-topic/hydraulic-fracturing>
- ALL Consulting, & Ground Water Protection Council. (2009). *Modern Shale Gas Development in the United States: A primer*. Oklahoma City, OK.
- American Petroleum Institute. (2009). *HFI - Hydraulic Fracturing Operations — Well Construction and Integrity Guidelines*. Washington, DC. Retrieved from <https://www.energyindepth.org/wp-content/uploads/2009/03/API-HF.pdf>
- American Petroleum Institute. (2010). *HFI – Water Management Associated with Hydraulic Fracturing*. Washington, DC: American Petroleum Institute.
- American Petroleum Institute. (2013). *Guidance/Best Practices Supporting Hydraulic Fracturing*. American Petroleum Institute.
- American Petroleum Institute. (2014). *API Standards on Exploration and Production Operations*.
- Andagoya, K., & Pérez, H. (2013). *Estudio de la tecnología y el desarrollo para la explotación de gas metano de mantos carboníferos*. [Tesis ingeniería]. Escuela Politécnica Nacional.
- Barrios, P. (2012). CAPP's new guidelines for Canadian shale gas producers: A review of key requirements. *Shareholder Association for Research & Education*.
- Bruno, M., Reed, A., & Olmstead, S. (2000). Environmental Management, Cost Management, and Asset Management for High-Volume Oil Field Waste Injection Projects. In *IADC/SPE 2000 Drilling Conference* (p. 10). New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers.
- Burgess, L. C. (2013). Organic Pollutants in Soil. In E. C. Brevik & L. C. Burgess (Eds.), *Soils and Human Health* (2nd ed., pp. 83–106). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Canadian Association of Petroleum Producers. (2012a). *Baseline Groundwater Testing. CAPP Hydraulic Fracturing Operating Practice*.
- Canadian Association of Petroleum Producers. (2012b). *Fracturing Fluid Additive Risk Assessment and Management. CAPP Hydraulic Fracturing Operating Practice*.
- Canadian Association of Petroleum Producers. (2012c). *Water sourcing, measurement, and reuse. CAPP Hydraulic Fracturing Operating Practice*.
- Canadian Association of Petroleum Producers. (2017). *Understanding Hydraulic fracturing*. Canadian Association of Petroleum Producers.
- Comisión OSPAR. (2001). *Environmental aspects of on and off-site injection of drill cuttings and produced water*. Londres.
- Commission OSPAR. (2014). *Establishment of a list of Predicted No Effect Concentrations (PNECs) for naturally occurring substances in produced water (OSPAR Agreement 2014-05)*.
- Department of Environment and Heritage Protection. (2014). *Barron River Basin Environmental Values and Water Quality Objectives*. Queensland Government.
- Department of Environment and Heritage Protection. (2014). *Daintree and Mossman Rivers Basins Environmental Values and Water Quality Objectives*. Queensland Government.
- Doric, B., & Dimovski, V. (2018). Managing petroleum sector performance – a sustainable administrative design. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 31(1), 119–138. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2017.1421995>
- Environment and Sustainable Resource Development. (2014). *Environment Quality Guidelines for Alberta Surface Waters*. Canadá: AENV-Web.SWQ@gov.ab.ca.

- Environmental Performance Index. (2018). *Global metrics for the environment: Ranking country performance on high-priority environmental issues*, 1–4.
- Frohlich, C., Potter, E., Hayward, C., & Stump, B. (2010). Dallas-Ft Worth Earthquakes Coincident with Activity Associated with Natural Gas Production. *The Leading Edge*, 29(3), 270–275. <https://doi.org/10.1190/1.3353720>
- Gallegos, T. J., Varela, B. A., Haines, S. S., & Engle, M. A. (2015). Hydraulic fracturing water use variability in the United States and potential environmental implications. *Water Resources Research*, 51(7), 5839–5845. <https://doi.org/10.1002/2015WR017278>
- Government of Canada. (2015). Wastewater Systems Effluent Regulations, Government of Canada § Canada.
- Grant, S. B., Saphores, J.-D., Feldman, D. L., Hamilton, A. J., Fletcher, T. D., Cook, P. L. M., ... Marusic, I. (2012). Taking the “Waste” Out of “Wastewater” for Human Water Security and Ecosystem Sustainability. *Science*, 337(6095), 681–686. <https://doi.org/10.1126/science.1216852>
- Gumarov, S., Shokanov, T., Simmons, S., Anokhin, V., & Benelkadi, S. (2014). Good well design helps mitigate solids settling in cuttings re-injection - Drilling Contractor. Retrieved September 8, 2018, from <http://www.drillingcontractor.org/good-well-design-helps-mitigate-solids-settling-in-cuttings-re-injection-30549>
- Guo, Q., & Abou-Sayed, A. (2003). Worldwide Drill Cuttings Injection Permitting Requirements and Guidelines. In *SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference* (p. 8). San Antonio, TX: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/80587-MS>
- Guo, Q., Geehan, T., & Ovalle, A. (2007). Increased Assurance of Drill Cuttings ReInjection: Challenges, Recent Advances, and Case Studies. *SPE Drilling & Completion*, 22(6), 99–105. <https://doi.org/10.2118/87972-PA>
- Guo, Q., Geehan, T., & Pincock, M. (2005). Managing Uncertainties and Risks in Drill-Cuttings ReInjection in Challenging Environments: Field Experience from Sakhalin. *SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference*. Galveston, Texas: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/93781-MS>
- Harper, J. A. (2007). The Marcellus Shale - An Old “New” Gas Reservoir in Pennsylvania. *Pennsylvania Geology*, 38(1), 2–12.
- Hernandez, R. M., Torres, M., Leal, J., Abad, F., Lopez, B., & Bastidas, A. (2015). Drill Cutting ReInjection Feasibility Study in a Critical Environment, Apaika Field, Ecuador. *SPE Latin American and Caribbean Health, Safety, Environment and Sustainability Conference*. Bogotá, Colombia: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/174101-MS>
- Jarvie, H. P., Whitton, B. A., & Neal, C. (1998). Nitrogen and phosphorus in east coast British rivers: Speciation, sources and biological significance. *Science of The Total Environment*, 210–211, 79–109. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00109-0)
- Jouanneau, S., Recoules, L., Durand, M. J., Boukabache, A., Picot, V., Primault, Y., ... Thouand, G. (2014). Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. *Water Research*, 49, 62–82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.066>
- Keck, R. (2002). Drill Cuttings Injection: A Review of Major Operations and Technical Issues. In *2002 SPE Annual Technical Conference and Exhibition* (p. 12). San Antonio, TX: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/77553-MS>
- King, G. E. (2012). Hydraulic Fracturing 101: What Every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor and Engineer Should Know About Estimating Frac Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. The Woodlands, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/152596-MS>
- Kiparsky, M., & Foley, J. (2013). *Regulation of Hydraulic Fracturing in California: A Wastewater and Water Quality Perspective*. Berkeley, CA.
- Kondash, A., & Vengosh, A. (2015). Water Footprint of Hydraulic Fracturing. *Environmental Science & Technology Letters*, 2(10), 276–280. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00211>
- Lijzen, J. P. A., Baars, A. J., Otte, P. F., Rikken, M. G. J., Swartjes, F. A., Verbruggen, E. M. J., & Van Wezel, A. P. (2001). *Technical evaluation of the Intervention Values for Soil / Sediment and Groundwater*. Bilthoven.
- Liroff, R., Investor Environmental Health Network, Interfaith Center on Corporate, & Responsibility. (2017). *An Investor Guide to Disclosing Risks from Hydraulic Fracturing Operations*.
- Louisiana Department of Environmental Quality. (2017). Louisiana’s Water Quality Regulations Part IX: Water Quality
- Mauter, M. S., Alvarez, P. J. J., Burton, A., Cafaro, D. C., Chen, W., Gregory, K. B., ... Schnoor, J. L. (2014). Regional Variation in Water-Related Impacts of Shale Gas Development and Implications for Emerging International Plays. *Environmental Science & Technology*, 48(15), 8298–8306. <https://doi.org/10.1021/es405432k>
- Minister of Fisheries and Oceans. (2002). Metal Mining Effluent Regulations, Pub. L. No. SOR/2002-222
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución No. 0631. Bogotá, Colombia: MINAMBIENTE.
- Ministerio de Energía y Minas. (2001). Reglamento Sustitutivo del Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador. Ecuador.
- Mordick, B. (2012). Hydraulic Fracturing Best Management Practices: Mitigating Environmental Concerns. In *Hydraulic Fracturing | A Wyoming Energy Forum* (pp. 18–19). University of Wyoming.
- Moschovidis, Z., Gardner, D. C., Sund, G. V., & Veatch Jr., R. W. (1994). Disposal of Oily Cuttings by Downhole Periodic Fracturing Injections, Valhall, North Sea: Case Study and Modeling Concepts. *SPE Drilling & Completion*, 9(04), 256–262. <https://doi.org/10.2118/25757-PA>
- Nagel, N., & Strachan, K. (1998). Implementation of Cuttings ReInjection at the Ekofisk Field. *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering*. Trondheim, Norway: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/47218-MS>
- Palisch, T. T., Vincent, M., & Handren, P. J. (2010). Slickwater Fracturing: Food for Thought. *SPE Production & Operations*, 25(03), 327–344. <https://doi.org/10.2118/115766-PA>
- Romero, L., Ramirez, O., Hernandez, R., & Bastidas, A. (2016). First Successful Cuttings ReInjection CRI Operation in Ecuador: An Alternative to Help Minimize the Environmental Impact in a Protected Area. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference* (p. 8). Abu Dhabi, EAU: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/183150-MS>
- Rutqvist, J., Birkholzer, J., Cappa, F., & Tsang, C. (2007). Estimating maximum sustainable injection pressure during geological sequestration of CO₂ using coupled fluid flow and geomechanical fault-slip analysis. *Energy Conversion and Management*, 48(6), 1798–1807. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.01.021>
- Saasen, A., Tran, T. N., Jøranson, H., Meyer, E., Gabrielsen, G., & Tronstad, A. E. (2001). Subsea Re-Injection of Drilled Cuttings - Operational Experience. In *SPE/IADC Drilling Conference* (p. 6). Amsterdam, Países Bajos: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/67733-MS>
- Safari, G., Yetilmesoz, K., Mahvi, A., & Zarrabi, M. (2013). Post-treatment of secondary wastewater treatment plant effluent using a two-stage fluidized bed bioreactor system. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 11(1), 10. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-11-10>
- Satterfield, J., Mantell, M., Kathol, D., Hiebert, F., Patterson, K., & Lee, R. (2008). Managing Water Resource’s Challenges in Select Natural Gas Shale Plays. In *GWPC Annual Meeting* (p. 8). Ground Water Protection Council.
- Sparling, D. W. (2016a). Basics of Toxicity Testing. In D. W. B. T.-E. E. Sparling (Ed.), *Ecotoxicology Essentials* (pp. 21–44). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801947-4.00002-0>
- Sparling, D. W. (2016b). Metals. In D. W. B. T.-E. E. Sparling (Ed.), *Ecotoxicology Essentials* (pp. 225–275). San Diego: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801947-4.00008-1>
- The Royal Society, & Royal Academy of Engineering. (2012). *Shale gas extraction in the UK: a review of hydraulic fracturing*. Londres.
- US Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2007). *Toxicological Profile for Lead*. US Department of Health and Human Services (Vol. 1). Atlanta, Georgia.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2004). *Evaluation of Impacts to Underground Sources of Drinking Water by Hydraulic Fracturing of Coalbed Methane Reservoirs*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2018). Toxic and Priority Pollutants Under the Clean Water Act. Retrieved July 30, 2018, from <https://www.epa.gov/eg/toxic-and-priority-pollutants-under-clean-water-act#priority>

- U.S. Geological Survey. (2014). Hydraulic Fracturing (Fracking) FAQs. Retrieved from <https://web.archive.org/web/20141019024105/http://www.usgs.gov/faq/?q=categories%2F10132%2F3830>
- Vengosh, A., Jackson, R. B., Warner, N., Darrah, T. H., & Kondash, A. (2014). A critical review of the risks to water resources from unconventional shale gas development and hydraulic fracturing in the United States. *Environmental Science & Technology*, 48(15), 8334–8348. <https://doi.org/10.1021/es405118y>
- Viswanathan, H. S., Carey, J. W., Karra, S., Porter, M. L., Rougier, E., Currier, R. P., ... Hyman, J. D. (2015). Integrated Experimental and Computational Study of Hydraulic Fracturing and the Use of Alternative Fracking Fluids. *49th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. San Francisco, California: American Rock Mechanics Association.
- Voutsas, D., Manoli, E., Samara, C., Sofoniou, M., & Stratis, I. (2001). A Study of Surface Water Quality in Macedonia, Greece: Speciation of Nitrogen and Phosphorus. *Water, Air, and Soil Pollution*, 129(1), 13–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010315608905>
- Weston, R. T. (2008). *Development of the Marcellus Shale-Water Resource Challenges*.
- World Health Organization. (2004). *Guidelines for Drinking-Water Quality* (3rd ed.). Ginebra: SNPBT Typesetter.
- WorleyParsons. (2014). Environmental Regulation. *An International Comparison of Leading Oil and Gas Producing Regions*. Canadian Association of Petroleum Producers.
- Zehner, R. (2012). *Reglamento Sustitutivo del Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas en el Ecuador: Introducción, Enfoques y Objetivos*. Quito: Ministerio de Energía y Minas.



Johnny Robinson Zambrano Carranza, Profesor adscrito al Departamento de Petróleos, Escuela Politécnica Nacional. Las áreas de investigación son en Ingeniería Ambiental, Termoquímica y Química Física. Actualmente trabaja en métodos para la producción y recuperación de crudo pesado.



José Luis Rivera Parra, Biólogo de la PUCE y con un doctorado en Ecología y Evolución de la Universidad de Missouri en Saint Louis. Interesado en ecología de comunidades y en la mitigación de impactos ambientales causados por industrias extractivas en ecosistemas tropicales.

BIOGRAFÍAS



Daniel Sebastián Castillo Castro, Ingeniero en Petróleos de la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente, se encuentra cursando sus estudios de Máster en Ingeniería Ambiental en la National Cheng Kung University, Taiwán. Sus áreas de investigación incluyen: desarrollo sostenible, análisis de ciclo de vida, análisis de ciclo de vida y teledetección (remote sensing).

Elaboración de Briquetas a partir de Subproductos de Palma Africana (*Elaeis guineensis* J) y Arroz (*Oryza sativa* L)

León, Alain¹ ; Santacruz, Stalin^{1,*} 

¹Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, Facultad de Ciencias Agropecuaria, Manta, Ecuador

Resumen: El aumento global de la población ha traído como consecuencia mayor demanda de recursos, especialmente fuentes de alimento, influyendo directamente en el desarrollo agroindustrial y en la generación cada vez mayor de subproductos. Ecuador es el sexto país a nivel mundial en producción de aceite de palma africana, además, su producción de arroz es aproximadamente de 1 195 000 ton. Ambas industrias generan 678 000 ton de subproductos/año, los cuales se encuentran subutilizados y representan un problema de manejo para las empresas, trayendo como consecuencia un impacto medioambiental. El raquis de palma africana y la cáscara de arroz tienen una composición mayoritariamente de lignina y celulosa confiriéndole un alto potencial para ser usado como combustible en forma de briquetas. En el presente trabajo, la elaboración de briquetas se realizó a partir de mezclas de raquis de palma africana y cáscara de arroz con las siguientes composiciones: 100% raquis de palma africana; 75% raquis de palma africana y 25% cáscara de arroz; 50% de ambos subproductos, 25% raquis de palma africana y 75% de cáscara de arroz; y 100% cáscara de arroz. Las briquetas fueron analizadas en cuanto a friabilidad y dureza (textura instrumental), para posteriormente utilizar las briquetas con mejores resultados de ese estudio en la determinación de su poder calórico. Se obtuvieron valores de friabilidad entre 0,84% y 17,86% y de dureza entre 11,84 N y 29,44 N, sin que existan diferencias significativas ($p < 0,05$). El tratamiento escogido con mejores condiciones de friabilidad y dureza (50% raquis de palma africana y 50% cáscara de arroz) tuvo un poder calórico de 15,76 MJ/kg.

Palabras clave: biomasa; compactación; friabilidad; dureza; poder calórico.

Elaboration of Briquettes from By-products of African Palm (*Elaeis guineensis* J) and Rice (*Oryza sativa* L)

Abstract: The increase of population all over the world has led to a greater demand for resources, especially food sources, influencing the agro-industrial development and the generation of by-products. Ecuador is the sixth country in the world in palm oil production, besides, its rice production is approximately 1 195 000 tons. Both industries generate 678 000 tons/year of by-products, which are underutilized and represent a disposal problem for companies, resulting in an environmental impact. Palm rachis and rice husk are composed mainly by lignin and cellulose giving it a high potential to be used as a briquette fuel. In the present work, briquettes were made from mixtures of rachis of palm and rice husk with the following compositions: 100% palm rachis; 75% palm rachis and 25% rice husk; 50% of both by-products; 25% palm rachis and 75% rice husk; and 100% rice husk. The briquettes were analyzed for friability and hardness (instrumental texture). The briquettes with the best characteristics were analyzed for caloric power. The friability varied between 0,84% and 17,86% and hardness between 11,84 N and 29,44 N, without significant differences ($p < 0,05$). The selected treatment with the best friability and hardness (50% palm rachis and 50% rice husk) had a caloric power of 15,76 MJ/kg.

Keywords: biomass; compaction; friability; hardness; caloric power.

1. INTRODUCCIÓN

La población a nivel mundial crece de forma acelerada, con una demanda así mismo creciente por recursos limitados, tal es el caso de combustibles fósiles como: petróleo, hulla y sus derivados. Adicionalmente a ello, un aumento considerable de la contaminación ha derivado en una ola de

investigaciones destinadas a encontrar nuevas alternativas energéticas, sobre todo aquellas que disminuyan el impacto ambiental (Suárez et al., 2011).

En Estados Unidos y en la Unión Europea, es donde mayor desarrollo se ha alcanzado en el aprovechamiento de subproductos, los cuales han sido utilizados para generar

*stalin.santacruz@gmail.com

Recibido: 27/07/2020

Aceptado: 05/10/2021

Publicado: 01/11/2021

10.33333/rp.vol48n2.06

CC 4.0

energía eléctrica y se han aplicado a materiales de construcción, en estaciones de compostaje y en la generación de energía calorífica principalmente (Saval, 2012). Para el año 2009, el 18,3% de la energía primaria generada en la Unión Europea fue a partir de fuentes renovables (eólica, hídrica, solar y a partir de biomasa), de la cual casi en su totalidad provino de la biomasa (Berastegui et al., 2017).

El sistema agroindustrial genera gran cantidad de subproductos, los cuales se han incrementado de forma dramática en los últimos años, sobre todo en los países en vías de desarrollo. El impacto medioambiental de dichos subproductos es considerable, ya que en la mayoría de casos las empresas que los generan no tienen el conocimiento o la técnica necesaria para darles un valor agregado, lo que genera un problema de manejo aún sin solución. No obstante, en Latinoamérica se han visto esfuerzos direccionados a aprovechar estos subproductos (Saval, 2012), como materiales para la construcción (Alba et al., 2012) o fuente de energía renovable (Rodríguez y Zambrano, 2010).

La palma africana (*Elaeis guineensis* J) como su nombre lo indica es originaria del continente africano, sin embargo, su cultivo se ha extendido a otras zonas geográficas, como Asia y países del Sur y Centroamérica, particularmente en Ecuador se introdujo en el año de 1953 (Potter, 2011). En los últimos 20 años, en Latinoamérica se ha observado un crecimiento, tanto en la producción de aceite como en áreas de cultivo, liderados por Colombia con un 29% del total de la superficie sembrada, seguidos de Ecuador con un 24% y Honduras con un 12%, lo que convierte al Ecuador en el sexto país a nivel mundial en extracción de aceite de palma y el segundo en Latinoamérica región (INIAP, 2018).

La extracción de aceite de palma africana inicia con la separación de las nueces del raquis. Resultado de este proceso se obtiene entre un 70-74% de residuos sólidos, entre cuesco, fibra y tusas, dando un total anual de 421 672 ton. Las tusas son utilizadas en algunas empresas como combustible, debido a su composición que alcanza valores entre 95 y 98% de celulosa, hemicelulosa y lignina. Para la mayoría de las empresas, estas constituyen un problema de manejo por lo que generalmente desembocan en un problema de contaminación ambiental (Quintero y Torres, 2019).

A la llegada de los colonizadores españoles al nuevo mundo, las culturas nativas basaban su dieta casi en su totalidad en el maíz. Durante los años de conquista el arroz (*Oryza sativa* L) fue desplazando al maíz poco a poco hasta convertirse en plato principal de los pueblos Latinoamericanos. El Ecuador, para el año 2011 según datos del MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca), procesó 1 195 852 ton de arroz, las cuales produjeron 256 429 ton de cáscara. Del total de cáscara solo el 35% se utiliza en la industria florícola y en criaderos de animales. El material restante se utiliza de la siguiente forma: 50% es quemado en las piladoras; 15% es arrojado al borde de las carreteras; 15% es quemado en sitios aislados; 10% se quema a la orilla de las carreteras; 5% es vertida en ríos y el 5% restante se pierde por la acción de viento (Acero y Rodríguez, 2012).

La cáscara de arroz posee un elevado contenido de sílice, lo que se relaciona directamente con su poco uso en harinas y balanceados para consumo animal. Sin embargo, posee excelentes características para la combustión por su alto contenidos de celulosa (39,05%) y lignina (22,80%) (Acero y Rodríguez, 2012).

Bolivia, Venezuela y Ecuador son países productores de petróleo, por lo que no deja de ser llamativo que sus poblaciones sean grandes consumidores de leña, misma que se toma directamente de los bosques o selvas, sin que exista información real en cuanto a la cantidad consumida y al impacto que se genera en dichos ecosistemas. Uno de los problemas del uso de leña como combustible es su baja eficiencia calórica (4-6%), lo que repercute en el uso de grandes cantidades en procesos de combustión. Esto ha resultado en la búsqueda de nuevas alternativas energéticas en aras de reducir el impacto ambiental (De la Torre et al., 2008).

En el Ecuador se han identificado 226 especies diferentes de plantas que son utilizadas como combustible, las cuales se distribuyen de la siguiente forma: 165 se utilizan para fabricación de carbón; 24 como iniciadores de combustión; 29 como sustitutos del petróleo y 8 no han sido especificadas, siendo la Costa la región en la cual más especies se utilizan con 78, seguidas de la Sierra con 59 y la Amazonía con 43 (De la Torre et al., 2008).

Las briquetas, generalmente son productos 100% ecológicos y lignocelulósicos, clasificados como bioenergía sólida, obtenidos por procesos de densificación o compactación. Estas pueden ser fabricadas mediante bajas o altas presiones. En el primer caso generalmente se utiliza un aglomerante, el cual con frecuencia es de naturaleza biológica. Este tipo de briquetas normalmente presenta un diámetro mayor a 3 cm (un diámetro inferior es considerado pellet), siendo utilizadas como sustituto de la leña y el carbón vegetal (Martínez, 2015).

Las briquetas a partir de biomasa presentan una ventaja ambiental con respecto al uso de leña, ya que sus emanaciones de CO₂ son 50% menores, además de tener bajas concentraciones de azufre y nitrógeno, gases que influyen directamente sobre el aumento del efecto invernadero y que generan un impacto nocivo sobre el medio ambiente (Berastegui et al., 2017).

Con base en lo descrito anteriormente el objetivo del presente trabajo fue elaborar briquetas a partir de mezclas de subproductos de palma africana y arroz. Las briquetas se analizaron en cuanto a friabilidad y dureza (textura instrumental), y las briquetas con mejores características de friabilidad y dureza se analizaron en cuanto a su poder calorífico.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

El raquis de palma africana se obtuvo en la ciudad de Quinindé, provincia de Esmeraldas, mientras que la cáscara de arroz se consiguió en el cantón 24 de Mayo, provincia de Manabí.

2.2 Fabricación de las Briquetas

Para la fabricación de las briquetas se siguió el método de Berastegui et al. (2017) realizando algunas modificaciones. Con el objetivo de acondicionar el material para el proceso de molienda, tamizado y posterior fabricación de las briquetas, primero se secó la biomasa (solo el raquis de palma africana, ya que el arroz se obtuvo seco). Este secado se realizó con una estufa (Thermo, Electron Corporation, USA) a 70 °C durante 24 h. Luego del secado, las muestras se redujeron de tamaño en un molino manual (Corona Landersyca, Colombia). Del material molido se tomaron 200 g de muestra (raquis de palma y cáscara de arroz) y se tamizaron por 2 min con ayuda de una serie de seis tamices (ELE International Forney Inc., USA) con aberturas entre 7E-05 y 9,53E-0,3 m. Posterior al proceso de tamizado se pesaron las fracciones contenidas en cada tamiz y se almacenaron para futuros análisis. Del material tamizado se tomaron las fracciones de mayor cantidad para realizar cinco tratamientos a base de mezclas de raquis de palma africana y cáscara de arroz como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición de las mezclas de subproductos de palma africana y cáscara de arroz, utilizadas para la elaboración de briquetas

Tratamiento	Composición de la mezcla utilizada (%)
A1	100% raquis de palma africana
A2	75% raquis de palma africana 25% cáscara de arroz
A3	50% raquis de palma africana 50% cáscara de arroz
A4	25% raquis de palma africana 75% cáscara de arroz
A5	100% cáscara de arroz

Para la preparación del aglutinante se pesó 10,5 g de almidón y se lo mezcló con agua hasta completar 150 g. La mezcla se calentó con agitación constante hasta llegar a una temperatura de 90 °C con ayuda de una plancha de agitación (Fisher Scientific, USA). Posteriormente, la mezcla se dejó enfriar por 5 min y se le añadió agua para recuperar la pérdida por evaporación durante el calentamiento. Se tomó 40 g del material tamizado (Tabla 1) y se lo mezcló manualmente con la solución aglutinante de almidón previamente preparada. Las mezclas obtenidas se colocaron en moldes de hierro de 0,10 m de diámetro por 0,25 m de alto. Sobre los moldes, se colocó un disco de madera de 0,095 m de diámetro por 0,032 m de alto con el objetivo de facilitar la compactación del material. La compactación se realizó con un proctor (ELE International Forney Inc., USA) de 2,5 kg, que cayó desde una altura de 0,3048 m. Se aplicó una serie de 52 golpes a cada briqueta (Norma ASTM D-1557).

Los moldes con la biomasa compactada se colocaron en un horno (Humboldt, China) a 150 °C durante 72 h. Transcurrido dicho tiempo se procedió a sacar las briquetas de los moldes. La elaboración de briquetas se realizó por triplicado.

2.3 Análisis de Friabilidad

Para el análisis de friabilidad se consideró el estudio de Huanca (2017) con algunas modificaciones. Se determinó el peso por separado de tres briquetas, para luego colocar las mismas en un tambor giratorio artesanal, de 0,15 m de diámetro por 0,30 m de largo. El tambor se mantuvo girando durante 1 min a una velocidad aproximada de 132 r.p.m.,

luego de lo cual se volvió a pesar cada briqueta. La diferencia de peso permitió calcular el porcentaje de pérdida de peso. Los análisis se realizaron por triplicado.

2.4 Análisis de Dureza (Textura Instrumental)

Este análisis se basó en el estudio realizado por Huanca (2017) con modificaciones. Se realizó un análisis de penetración utilizando un texturómetro (Shimadzu, Japón) y una aguja de 0,2E-03 m de diámetro a una velocidad de 3,33E-04 m/s, alcanzando una profundidad de 2E-0,2 m. El análisis de penetración se realizó por triplicado a través de la superficie lateral de la briqueta cilíndrica. El resultado reportado fue la resistencia máxima a la penetración, expresada en Newton (N).

2.5 Cuantificación del poder calórico

La determinación del poder calorífico bruto se realizó por triplicado, basándose en la Norma ASTM D-240 (Pérez, 2012).

Se determinó el calor de combustión utilizando una bomba calorimétrica o calorímetro. Esta consiste en un recipiente (bomba) donde está contenida la muestra y donde se realizó la combustión. La bomba está sumergida en una cantidad conocida de agua. El sistema completo está contenido en una chaqueta adiabática que impide que el calor salga del sistema. Midiendo las diferencias de temperatura del agua antes y después de la combustión, es posible determinar el calor cedido por el combustible, tomando en cuenta que se tiene un sistema es adiabático, se tiene la siguiente ecuación:

$$\Delta Q_{com} = CH_2O(T_f - T_i) + \Delta Q_{cal} - \frac{\Delta Q_{ign}}{m} \quad (1)$$

Donde:

ΔQ_{com} : calor de combustión

CH_2O : calor específico del agua

T_f : Temperatura final del agua

T_i : Temperatura inicial del agua

ΔQ_{cal} : calor absorbido por el calorímetro

ΔQ_{ign} : calor de ignición

m : masa de muestra

2.6 Análisis estadístico

Para el análisis de resultados, se utilizó el paquete estadístico Infostat (versión 2017). Se hizo uso de un análisis de varianza y una prueba de medias de Tukey con un nivel de significancia del 5%.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico arrojó siete poblaciones para cada uno de los subproductos como se puede ver en las Tablas 2 y 3.

Se observó que para el caso del raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* J) la población más representativa estuvo retenida en el tamiz de abertura de 2E-03 m, con un 26,78% de la masa total de la muestra (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis granulométrico del raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* J). Fracciones retenidas

Abertura del tamiz (E-03 m)	Fracción porcentual respecto a la masa total (%)
9,53	22,18
4,75	10,34
2,00	26,78
1,80	14,55
0,59	8,78
0,30	10,09
Base	7,28

Por el contrario, el análisis granulométrico de la cáscara de arroz (*Oryza sativa* L) mostró que la fracción retenida en el tamiz de abertura 4,1E-04 m tuvo un porcentaje del 61,50% respecto a la masa total, valor que dobla a la segunda población, misma que fue retenida en el tamiz de abertura 4,75 E-03 m con 28,95% respecto a la masa total.

Tabla 3. Análisis granulométrico de la cáscara de arroz (*Oryza sativa* L). Fracciones retenidas

Abertura del tamiz (E-03 m)	Fracción porcentual respecto a la masa total (%)
4,75	28,95
0,41	61,50
0,25	6,35
0,18	1,37
0,15	0,81
0,07	0,81
Base	0,21

Las fracciones mayoritarias de raquis de palma africana y cáscara de arroz fueron escogidas para la elaboración de las briquetas.

3.2 Análisis de Friabilidad

El análisis de friabilidad mostró que no existió diferencia significativa entre tres tratamientos (A1, A2 y A3), sin embargo, la formulación A4 tuvo la mayor friabilidad y fue diferente significativamente con respecto a las tres anteriores. La quinta formulación (A5) no se analizó debido a que no se logró compactación del material. Aunque no existieron diferencias estadísticas entre los tres primeros tratamientos, se pudo observar un aumento en la friabilidad a medida que los tratamientos disminuían la cantidad presente de raquis de palma africana (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis de friabilidad de briquetas a base de mezclas de raquis de palma africana y cáscara de arroz

Tratamiento	Friabilidad (% de pérdida de peso)
A1	0,84 ^a
A2	3,64 ^a
A3	5,63 ^a
A4	17,86 ^b
A5 ¹	n.d.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$)

¹: No se pudo elaborar la briketa por lo que no hay data de friabilidad

n.d.: No hay datos

Los tres primeros tratamientos mostraron porcentajes de pérdida de peso menores al 10%, lo que evidencia un producto de buena calidad según la norma española CEN/TS 15210 (Berastegui et al., 2017).

De acuerdo con Berastegui et al. (2017), el tamaño óptimo de partícula para elaborar briquetas oscila entre 1,6E-04 y 6,3E-04 m. Sin embargo, en el presente trabajo solo la fracción escogida de cáscara de arroz estuvo dentro de ese rango de tamaño. A pesar de que las partículas de palma africana tuvieron un mayor tamaño al recomendado, posiblemente la forma de fibras largas de este material pudo contribuir a reducir la friabilidad de las briquetas, dando como resultado valores dentro del rango obtenido para briquetas elaboradas a base de tusa de maíz, carbón mineral y almidón de yuca, con friabilidades entre 2,7 y 96,93% (Berastegui et al., 2017) y similares a los de briquetas elaboradas con virutas y aserrín de dos tipos de madera, sin utilización de aglomerantes, con friabilidad promedio de 11,32% (Huanca, 2017).

3.3 Análisis de Dureza (Textura Instrumental)

El análisis de dureza mostró que no existieron diferencias significativas entre los cuatro tratamientos, obteniéndose valores medios de resistencia a la penetración que oscilaron entre 11,84 y 29,44 N. El quinto tratamiento no se analizó debido a que no se pudo formar las briquetas. Sin embargo, aunque el análisis estadístico no arrojó diferencias, se observó que a medida que el porcentaje de raquis de palma africana disminuyó, también lo hizo la resistencia a la penetración (Tabla 5). Al parecer la presencia de una mayor cantidad de material fibroso contribuyó a una mejor compactación y dio como resultado un aumento de la dureza de la briketa.

Valores de dureza entre 228,4 y 253,8 N fueron encontrados par briquetas elaboradas a base de tusa de maíz, carbón mineral y almidón de yuca como aglomerante (Mopoung y Udeye, 2017); y entre 32.2 y 327.3 N para briquetas de mezclas de fibra de centeno, trigo y colza (Rynkiewicz et al., 2013). La diferencia en resultados puede deberse a los diferentes materiales utilizados, a la diferente densidad de las briquetas o una combinación de ambos.

Tabla 5. Análisis de Dureza (textura instrumental) de briquetas a base de mezclas de raquis de palma africana y cáscara de arroz

Tratamiento	Dureza (Resistencia a la penetración en N)
A1	29,44 ^a
A2	28,16 ^a
A3	19,86 ^a
A4	11,84 ^a
A5 ¹	n.d.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p < 0,05$)

¹: No se pudo elaborar la briketa por lo que no hay data de friabilidad

n.d.: No hay datos

3.4 Cuantificación de poder calórico

Debido a la mayor abundancia de cáscara de arroz y por ende su mayor impacto al medio ambiente, y a que no existió diferencia en friabilidad y dureza entre los tratamientos en estudio, se escogió el tratamiento A3 para las pruebas de cuantificación de poder calórico. Las briquetas escogidas tuvieron un poder calórico de 15,76 MJ/kg, valor que se encuentra por encima de briquetas elaboradas a partir de aserrín y virutas cuyo poder calórico fue de 15,17 MJ/kg (Huanca, 2017), tusas de maíz: 15,07 MJ/kg (Boarini, 2006), bagazo de caña: 9,21 - 13,82 MJ/kg (Boarini, 2006), pero inferior a las elaboradas con madera: 18,88 MJ/kg (Agostinho-Da Silva et al., 2014) carbón vegetal: 27,63 MJ/kg (Boarini, 2006), mezcla de tallos de rosas y papel: 23,26 MJ/kg (Solórzano, 2017), mezcla de tusas de maíz y carbón mineral: 18,27 MJ/kg (Berastegui et al., 2017) y cáscara de arroz: 16,33 MJ/kg (Boarini, 2006). Cabe señalar que las briquetas fabricadas con tallos de rosas tenían hasta un 30% de papel en su formulación, material que pudo contribuir al mayor poder calórico. Así mismo las briquetas fabricadas a partir de tusa de maíz y carbón mineral, tuvieron un 40% de este último material, el cual sin duda contribuyó a incrementar el poder calórico. Si bien las briquetas elaboradas tuvieron un poder calórico menor al de la madera y al del carbón vegetal, es necesario recalcar que las briquetas son elaboradas a partir de material que no es utilizado, provoca contaminación del medio ambiente y produce menores emisiones de elementos contaminantes (azufre) que la quema de leña (Guzmán et al., 2020). La utilización de madera y carbón vegetal provoca afectación a los bosques del Ecuador, por lo que la elaboración de briquetas a partir de subproductos de palma africana y cáscara de arroz abre una posibilidad al uso de madera y carbón vegetal actualmente en uso en Ecuador.

4. CONCLUSIONES

Fue posible elaborar briquetas con cuatro de las cinco mezclas estudiadas de raquis de palma africana y cáscara de arroz, siendo la formulación hecha con 100% de cáscara de arroz la que no permitió formación de briquetas. No se observó diferencias significativas en la dureza entre los cuatro tratamientos evaluados, mientras que respecto a friabilidad solo un tratamiento presentó mayor friabilidad a los otros (25% raquis de palma africana y 75% cáscara de arroz). La formulación de la briqueta escogida (50% raquis de palma africana y 50% cáscara de arroz) tuvo un poder calórico de 15,76 MJ/kg, menor al de madera y carbón vegetal, pero similar al de las briquetas a base de subproductos del procesamiento de madera, maíz y caña de azúcar.

REFERENCIAS

- Acero, H., & Rodríguez, J. (2012). *Reemplazar el uso de diesel por cascarilla de arroz empleado para la generación de vapor. Aspectos técnicos y económicos*. [Tesis De grado] Repositorio de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Guayaquil, Ecuador.
- Agostinho-Da Silva, D.; Otomar-Caron, B.; Sanquetta, C.; Behling, A.; Schmidt, D.; Bamberg, R.; Eloy, E. & Dalla-Corte, A. (2014). Ecuaciones para estimar el poder calórico de la madera de cuatro especies de árboles. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 20(2), 177-186. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.09.035>. Obtenido de: <http://www.chapingo.mx/revistas>. (Enero, 2020).
- Alba, M., Marrero, M., Leiva, C., Montes, M. & Vilches, L. (2012). Empleo de paneles compuestos por subproductos de centrales térmicas en fachadas trasdosadas. *Informes de la Construcción* 64(526), 179-190. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.042>
- ASTM D-1557, J. Bowles (Experimento No. 9), MTC E 115-2000
- Berastegui, C., Ortega, J., Mendoza, J., González, Y., & Gómez, R. (2017). Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz, bioaglomerante de yuca y carbón mineral del departamento de Córdoba. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 25(4), 643-653. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052017000400643>
- Boarini, J. (2006). *Utilización del bagazo de caña de azúcar para la elaboración de briquetas de combustibles sólido para usos domésticos en la ciudad de Guatemala*. Repositorio Universidad Rafael Landívar, Facultad de Arquitectura y Diseño, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Mopoung, S. & Udeye, V. (2017). Characterization and Evaluation of Charcoal Briquettes Using Banana Peel and Banana Bunch Waste for Household Heating. *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 10(2), 353-365. <http://dx.doi.org/10.3844/ajeassp.2017.353.365>
- Quintero, L., & Torres, C. (2019). Análisis de residuos sólidos de palma africana, como alternativa de aprovechamiento de energías renovables en el departamento Cesar. *Ingenierías USBMED*. 10(1), 8-18. <https://doi.org/10.21500/20275846.3662>. Medellín, Colombia. Obtenido de: <https://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/articloe/view/3662/3256>. (Diciembre, 2019).
- Rodríguez, N. & Zambrano, D. (2010). Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. *Revista Cenicafé* 393, 1-8. Obtenido de: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>. (Mayo, 2021).
- Rynkiewicz, M., Trávníček, P., Krčálová, E. & Mareček, J. (2013). Influence of annealing temperature of straw briquettes on their density and hardness. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 61(5), 1377-1382. <http://dx.doi.org/10.11118/actaun201361051377>
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *Revista de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería* 16(2), 14-46.

Obtenido de:
https://www.academia.edu/23775116/Aprovechamiento_de_Residuos_Agroindustriales_Pasado_Presente_y_Futuro. (Noviembre, 2019)

Solórzano, S. (2017). *Elaboración de briquetas a partir de desechos de tallos de rosas y papel reciclado*. [Tesis ingeniería]. Repositorio de la Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química, Carrera de Ingeniería Química, Quito, Ecuador.

Suárez, J., Martín, G., Sotolongo, J., Rodríguez, E., Savrán, V., Cepero, L., Funes-Monzote, F., Rivero, J., Blanco, D., Machado, R., Martín C., & García, A. (2011). Experiencias del proyecto BIOMAS-CUBA. Alternativas energéticas a partir de la biomasa en el medio rural cubano. *Pasto y Forrajes* 34 (4), 473-496. Obtenido de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0864-03942011000400007&script=sci_arttext&tlng=pt. (Noviembre, 2019).

BIOGRAFÍAS



Lázaro Alain León Álvarez, graduado de Ingeniero Agroindustrial en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí y actualmente se desempeña en una empresa purificadora de agua.



Stalin Santacruz, graduado como Ingeniero Químico en la Escuela Politécnica Nacional, luego de lo cual se desempeñó como asistente de investigación en el entonces Instituto de investigaciones Tecnológicas (actual DECAB). Realizó su maestría en la misma institución, y luego de ello trabajó como investigador

en North East Wales Institute (UK). Seguidamente hizo sus estudios de doctorado en Swedish University of Agricultural Sciences, Suecia y en Lund University el postdoctorado. De regreso al Ecuador trabajó como docente en la Universidad San Francisco de Quito y actualmente labora como docente-investigador en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

Preparación de Artículos para la Revista Politécnica Utilizar Mayúsculas en cada Palabra en el Caso del Título

Apellido, Nombre¹; Apellido, Nombre²

¹Institución, Departamento o Facultad del Autor Principal, Ciudad, País

²Institución, Departamento o Facultad del Autor 2, Ciudad, País

Resumen: Las siguientes instrucciones establecen las pautas para la preparación de artículos para la Revista Politécnica. Los artículos pueden ser escritos en español o en inglés, pero tendrán un resumen de máximo 250 palabras en los dos idiomas. Los autores pueden hacer uso de este documento como una plantilla para componer su artículo si están utilizando Microsoft Word 2013 o superior. Caso contrario, este documento puede ser utilizado como una guía de instrucciones. El número mínimo de páginas será 6 y el máximo 15. Para el envío de los artículos, los autores deben seguir las instrucciones colocadas en el sistema de recepción de artículos del sitio web de la Revista Politécnica (revistapolitecnica.epn.edu.ec). En caso de que su artículo sea en inglés colocar el título y el resumen en los dos idiomas.

Palabras clave: Incluir una lista de 3 a 6 palabras.

Title of Manuscript

Abstract: These instructions give you guidelines for preparing papers for EPN Journal. Papers can be written in Spanish or English; however, an abstract of maximum 250 words and written in both languages is required. Use this document as a template to compose your paper if you are using Microsoft Word2013 or later. Otherwise, use this document as an instruction set. The minimum number of pages will be 6 and the maximum will be 15. For submission guidelines, follow instructions on paper submission system from the EPN Journal website(revistapolitecnica.epn.edu.ec).

Keywords: Include a list of 3 to 6 words.

1. SECCIÓN I

Este documento es una plantilla para versiones Microsoft Word 2013 o posteriores. Si está leyendo una versión impresa de este documento, por favor descargue el archivo electrónico, **revistapolitecnicaformato2020.docx**. En caso de que el autor desee enviar el artículo en formato LaTeX por favor comunicarse con la coordinación de edición (epnjournal@epn.edu.ec). *Por favor, no coloque numeración ni pie de página en el documento presentado.*

No cambie los tamaños de fuente o espaciado de renglones para ajustar el texto a un número limitado de páginas. Utilice cursiva o negrita para dar énfasis a un texto, no subrayado.

2. SECCIÓN II

Para las pautas de presentación, siga las instrucciones emitidas por el sistema del sitio web de la revista de la EPN.

La presentación inicial debe tomar en cuenta todas las indicaciones que se presentan en la plantilla, para de esta manera tener una buena estimación de la longitud del artículo

a publicarse. Además, de esta manera el esfuerzo necesario para la presentación final del manuscrito será mínimo.

Como sugerencia, es importante tomar en cuenta que, el primer autor es el investigador que hizo la mayor parte del trabajo, mientras que el último autor suele ser el profesor quien es el líder intelectual y, a menudo edita y presenta el borrador final del documento.

La Revista Politécnica pondrá en marcha un sistema de transferencia electrónica de derechos de autor en su momento. Por favor, "no" enviar formularios de derecho de autor por correo o fax. A continuación, se detallan las consideraciones que se deben tener en cuenta para la presentación final del artículo.

3. SECCIÓN III

3.1 Figuras, tablas y márgenes

Todas las figuras deben ser incorporadas en el documento. Al incluir la imagen, asegúrese de insertar la actual en lugar de un enlace a su equipo local. Los archivos de: figuras, dibujos, fotografías, etc., deberán enviarse en formato png, con al

menos 1200 puntos (resolución) en uno de sus ejes, con leyendas legibles y de tamaño adecuado. El artículo debe contener entre tablas y figuras un máximo de 10.

Las etiquetas de los ejes de las figuras son a menudo una fuente de confusión. Utilice las palabras en lugar de símbolos. Por ejemplo, escriba la cantidad "Magnetización," o "Magnetización M" no sólo "M".

Las figuras y tablas deben estar en la parte superior e inferior de las columnas. Evite colocarlas en medio de ellas. Las figuras y tablas grandes pueden extenderse a lo largo de ambas columnas. Las leyendas de las figuras deben estar centradas debajo de las figuras, los títulos de las tablas deben estar centrados sobre ellas. Evite colocar figuras y tablas antes de su primera mención en el texto. Para la mención de figuras, tablas o ecuaciones utilice las palabras completas con la primera letra en mayúscula, por ejemplo "Figura 1".

Coloque las unidades entre paréntesis. No etiquete los ejes sólo con unidades. Por ejemplo, escriba "Magnetización (A/m)" o "Magnetización (Am⁻¹)", no sólo "Magnetización A/m." No etiquete los ejes con una relación de cantidades y unidades. Por ejemplo, escriba "Temperatura (K)", no "Temperatura K".

Los multiplicadores pueden ser especialmente confusos. Escriba "Magnetización (kA/m)" o "Magnetización (103A/m)". No escriba "Magnetización (A/m) x 1000" porque el lector no sabrá si la etiqueta del eje de arriba significa 16000 A/m o 0,016 A/m. Las etiquetas de las figuras deben ser legibles, con un valor de 8 y sin espacio de separación con la figura.

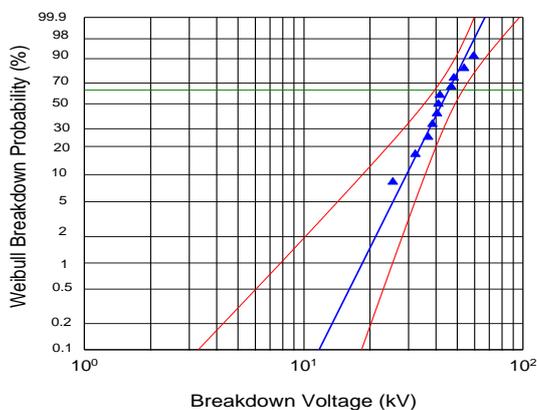


Figura 1. Distribución Weibull de 60 Hz voltajes de ruptura de cables $\alpha = 45,9$ kV $\text{pico}\beta = 5,08$. Intervalo de Confidencia 95%

Los autores deben trabajar activamente con los márgenes solicitados. Los documentos de la revista serán marcados con los datos del registro de la revista y paginados para su inclusión en la edición final. Si la sangría de los márgenes en su manuscrito no es correcta, se le pedirá que lo vuelva a presentar y esto, podría retrasar la preparación final durante el proceso de edición.

Por favor, no modificar los márgenes de esta plantilla. Si está creando un documento por su cuenta, considere los márgenes

que se enumeran en la Tabla 1. Todas las medidas están en **centímetros**.

Tabla 1. Márgenes de página

Página	Superior	Inferior	Izquierda/ Derecha
Primera	2,0	2,5	1,5
Resto	2,0	2,5	1,5

3.2 Ecuaciones

Si está usando MSWord, sugerimos utilizar el *Editor de ecuaciones de Microsoft* o el *MathType* add-on para las ecuaciones en su documento (*Insertar/Objeto/Crear Nuevo/Microsoft Ecuación o Ecuación MathType*). La opción "flotar sobre el texto" no se debe elegir.

Enumere las ecuaciones consecutivamente con los números de la ecuación en paréntesis contra el margen derecho, como en (1). Utilice el editor de ecuaciones para crear la ecuación y esta debe estar localizada en el margen derecho, como se muestra en el ejemplo siguiente:

$$\int_0^{r_2} F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma r_2 / (2\mu_0)] \quad (1)$$

Asegúrese de que los símbolos en su ecuación han sido definidos antes de que aparezcan en la ecuación o inmediatamente después. Ponga en cursiva los símbolos (T podría referirse a la temperatura, pero T es la unidad tesla). Para referirse a la ecuación se escribe por ejemplo "Ecuación (1)"

3.3 Unidades

Utilice el SI como unidades primarias. Otras unidades pueden ser utilizadas como unidades secundarias (en paréntesis). Por ejemplo, escriba "15 Gb/cm² (100 Gb/in²)". Evite combinar las unidades del SI y CGS, como la corriente en amperios y el campo magnético en oerstedios. Esto a menudo lleva a confusión porque las ecuaciones no cuadran dimensionalmente. Si tiene que usar unidades mixtas, aclare las unidades para cada cantidad en una ecuación.

Por ejemplo, en el SI la unidad de fuerza de campo magnético Hes A/m. Sin embargo, si desea utilizar unidades de T, o bien se refiere a la densidad de flujo magnético B o la fuerza del campo magnético simbolizadas como $\mu_0 H$. Use un punto en el centro para separar las unidades compuestas, por ejemplo, "A·m²."

3.4 Abreviaturas y Siglas

Defina las abreviaciones y acrónimos la primera vez que se utilizan en el texto, incluso después de que ya han sido definidos en el resumen. No utilice abreviaturas en el título a menos que sea inevitable.

3.5 Otras recomendaciones

- Para expresar valores decimales se usarán comas, por ejemplo 3,45. Use un cero antes del decimal.

- Se incluirá un espacio entre números para indicar los valores de miles, por ejemplo 463 690.
- Utilice notación científica para expresar números con más de 3 cifras hacia la derecha o izquierda, es decir, mayores a 2,50E+05 o menores a 4,8E-03.
- Finalmente, de ser necesario y de manera opcional, se pueden incluir conclusiones, recomendaciones y agradecimiento.

REFERENCIAS

La lista de **referencias debe estar en Formato APA ordenada alfabéticamente** de acuerdo con el apellido del primer autor del artículo. El agregado et al no debe ir en cursiva. Por favor nótese que todas las referencias listadas aquí deben estar directamente citadas en el cuerpo del texto usando (Apellido, año). Las notas al pie deben evitarse en la medida de lo posible.

El artículo debe contener un mínimo de 6 referencias.

Seguir el formato indicado a continuación de acuerdo al tipo de referencia a:

Formato básico para referenciar libros:

Apellido, Inicial Nombre. (Año). *Título del libro*. Ciudad, País: Editorial.

- **Libros con un autor:**

En las referencias:

King, M. (2000). *Wrestling with the angel: A life of Janet Frame*. Auckland, New Zealand: Viking.

Cita en el texto:

(King, 2000) o King (2000) argumenta que ...

- **Libros con dos autores:**

En las referencias:

Treviño, L. K., y Nelson, K. A. (2007). *Managing business ethics: Straight talk about how to do it right*. Hoboken, NJ: Wiley

Cita en el texto:

(Treviño y Nelson, 2007) o Treviño y Nelson (2007) ilustran...

- **Libros con dos o más autores:**

En las referencias:

Krause, K.-L., Bochner, S., y Duchesne, S. (2006). *Educational psychology for learning and teaching* (2nd ed.). South Melbourne, VIC., Australia: Thomson.

Cita en el texto:

De acuerdo con Mezey et al. (2002) o ... (Mezey et al., 2002).

Formato básico para referenciar artículos científicos

Apellido, Inicial Nombre. (Año). Título del Artículo. *Título/Iniciales de la Revista*. Número de Volumen (Tomo), páginas

- **Artículos en revistas:**

En las referencias:

Sainaghi, R. (2008). Strategic position and performance of winter destinations. *TourismReview*, 63(4), 40-57.

Cita en el texto:

(Sainaghi, 2008) o Sainaghi (2008) sugiere ...

- **Artículos con DOI**

En las referencias:

Shepherd, R., Barnett, J., Cooper, H., Coyle, A., Moran, J., Senior, V., & Walton, C. (2007). Towards an understanding of British public attitudes concerning human cloning. *Social Science & Medicine*, 65(2), 377-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.socscimed.2007.03.018>

Cita en el texto:

Shepherd et al. (2007) o Shepherd et al. (2007) resaltan la...

- **Artículos sin DOI**

En las referencias:

Harrison, B., & Papa, R. (2005). The development of an indigenous knowledge program in a New Zealand Maori-language immersion school. *Anthropology and Education Quarterly*, 36(1), 57-72. Obtenido de la base de datos Academic Research Library

Cita en el texto:

(Harrison y Papa, 2005) o En su investigación, Harrison y Papa (2005) establecieron...

- **Artículos en línea**

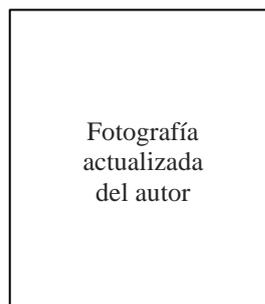
En las referencias:

Snell, D., & Hodgetts, D. (n.d.). The psychology of heavy metal communities and white supremacy. *Te Kura Kete Aronui*, 1. Obtenido de: <http://www.waikato.ac.nz/wfass/tkka>. (Mayo, 2015).

Cita en el texto:

(Snell y Hodgetts, n.d.) o Snell y Hodgetts (n.d.) identificaron "..."

BIOGRAFÍA



Mini biografía del primer autor con un máximo de 100 palabras.

Fotografía
actualizada
del autor

Mini biografía del segundo autor con un máximo de 100 palabras.

INDEXACIONES



Matriz de Información para el
Análisis de Revistas



REVISTA
POLITÉCNICA



revistapolitecnica.epn.edu.ec



INDEX  COPERNICUS
I N T E R N A T I O N A L



revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



REVISTA
POLITÉCNICA

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec



EPN
editorial