

ENFOQUE

UTE
REVISTA



Facultad Ciencias de la Ingeniería e Industrias
eISSN:13906542



Volumen 12 • N°2 • Abril 2021

Sumario

DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE PLOMO EN SANGRE EN TRABAJADORES DE FÁBRICAS DE BATERÍAS UBICADAS EN GUAYAQUIL-ECUADOR (Determination of lead levels in blood in workers of battery factories located in Guayaquil-Ecuador) <i>Kathya Rivera, Beatriz Pernía</i>	1
ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE MICRORREDES ELÉCTRICAS CON ALTA PENETRACIÓN DE RECURSOS RENOVABLES EN ZONAS URBANAS: CASO DE ESTUDIO CONDOMINIOS RESIDENCIALES (Viability of micro electrical networks with high penetration of renewable resources in urban areas: Case study of residential condominiums) <i>Danny Javier Trujillo Sandoval, Fabricio Ismael Mosquera Velásquez, Edwin Marcelo García Torres</i>	19
ENSAYOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA ESTRUCTURA DEL MATERIAL COMPUESTO ALTERNATIVO PARA LA REPARACIÓN DE SUPERFICIES DE VUELO EN AERONAVES (Experimental tests and numerical analysis of the structure of the alternative composite material for the repair of flight surfaces in aircraft) <i>César Arroba Arroba, Manuel Telenchana Flores, Juan Paredes Salinas Salomón Fiallo Ortega y Henry Vaca Ortega</i>	37
MODELOS DE VELOCIDAD DE OPERACIÓN DE CARRETERAS RURALES EN TERRENO LLANO EN COSTA RICA (Speed profile prediction model of rural roads in flat terrain in Costa Rica) <i>Domingo E. Delgado Martínez, Liosber Medina García, José M. Ulate Zárate, René A. García Depestre</i>	52
POLÍTICAS BASADAS EN LA ISO 27001: 2013 Y SU INFLUENCIA EN LA GESTIÓN DE SEGURIDAD DE LA INFORMACIÓN EN MUNICIPALIDADES DE PERÚ (Policies based on ISO 27001: 2013 and its influence on information security management in municipalities of Peru) <i>Shonerly Bustamante García, Miguel Ángel Valles Coral, Immer Elías Cuellar Rodríguez, Danny Lévano Rodríguez</i>	69
EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE LOMBRIFILTROS (<i>EISENIA FOETIDA</i>) EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS PARA ZONAS RURALES (Efficiency in the removal of organic matter by wormfilters (<i>Eisenia foetida</i>) in domestic wastewater for rural areas) <i>Jonathan Gustavo Castillo Sánchez, Jessica Estefanía Chimbo Solórzano</i>	80

Determinación de los niveles de plomo en sangre en trabajadores de fábricas de baterías ubicadas en Guayaquil-Ecuador

(Determination of lead levels in blood in workers of battery factories located in Guayaquil-Ecuador)

Kathya Rivera¹, Beatriz Pernía²

Resumen

El plomo es uno de los metales pesados más tóxicos y la exposición humana, por razones laborales, a este metal, puede causar plumbemia. El objetivo de la investigación fue generar una línea base sobre las concentraciones de plomo en sangre de un grupo de trabajadores de fábricas de baterías en Guayaquil-Ecuador y de un grupo control no expuesto laboralmente al metal, con el fin de establecer la existencia de riesgo ocupacional entre sexos, edades y puestos de trabajo. Para ello, se procedió a tomar muestras de sangre a los trabajadores y al grupo control. Las muestras fueron analizadas por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito. El 100 % de los trabajadores presentaron Pb en una concentración promedio de 16.22 ± 6.82 $\mu\text{g}/\text{dL}$ superior al valor de la Organización Mundial de la Salud, pero inferior al límite establecido por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de 40 $\mu\text{g}/\text{dL}$; además, el valor fue superior al del grupo control (0.68 ± 0.15 $\mu\text{g}/\text{dL}$). Los hombres presentaron mayores niveles de Pb que las mujeres, y estos valores variaron dependiendo del puesto de trabajo en la fábrica. En conclusión, el 100 % del grupo control y el 4.55 % de los trabajadores no presentaron riesgo de intoxicación por plomo, un 13.64 % presentó riesgo bajo, 78.79 % riesgo medio y solo un 3.00 % riesgo alto.

Palabras clave

Contaminación, plomo, fábricas de batería, riesgo ocupacional.

Abstract

Lead is one of the most toxic heavy metals and its occupational exposure can generate plumbemia. For this reason, the objective of this investigation was to generate a baseline of lead concentrations in the blood of a group of battery factory workers in Guayaquil-Ecuador and of a control group not exposed to the metal at work, to establish the existence of occupational risk between sexes, ages, and jobs positions. For this, blood samples were taken from the workers and the control group. The samples were analyzed by atomic absorption spectrophotometry with a graphite furnace. 100 % of the workers presented Pb in an average concentration of 16.22 ± 6.82 $\mu\text{g}/\text{dL}$ higher than the World Health Organization value, but lower than the limit established by Occupational Health and Safety Assessment of 40 $\mu\text{g}/\text{dL}$, also, the value was higher than of the control group (0.68 ± 0.15 $\mu\text{g}/\text{dL}$). Men presented higher levels of Pb than women and these values varied depending on the job in the factory. In conclusion, 4.55 % of the workers did not present a risk of lead poisoning, 13.64 % low risk, 78.79 % medium risk, and only 3.00 % high risk.

Keywords

Contamination, lead, battery factories, occupational risk.

1 Facultad de Ciencias Naturales. Universidad de Guayaquil, Guayaquil-Ecuador [kathyavanina@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5272-6036]
2 Instituto de Investigaciones de Recursos Naturales. Universidad de Guayaquil, Guayaquil-Ecuador [beatriz.pernias@ug.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-2476-7279]

1. Introducción

El plomo (Pb) es un metal que los seres humanos han utilizado desde hace más de 9000 años. Sin embargo, debido a su naturaleza no biodegradable y su uso generalizado, se ha convertido en un contaminante omnipresente (Devóz et al., 2017; Himani et al., 2020). Este se ha usado para elaborar baterías, balas, escudos de radiación, joyas de plata, soldaduras, remedios caseros, aditivos de gasolina, tuberías de distribución de agua, esmaltes de cerámica y se ha reconocido como un contaminante ambiental y ocupacional (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 2020; Ballantyne et al., 2018). Además, el plomo se encuentra en los entornos urbanos y, en especial, en zonas residenciales cercanas a las industrias (Dean et al., 2020; Fry et al., 2020).

Las personas adultas están expuestas principalmente al plomo en sus lugares de trabajo, ya sea a través de la inhalación de partículas cargadas de plomo, la falta de higiene personal o el consumo de agua y alimentos contaminados (Basit et al., 2015; Stojsavljevi et al., 2019). Tras la exposición, el plomo se absorbe fácilmente en el tracto gastrointestinal y se transporta rápidamente a la sangre y a los tejidos blandos con una vida media de 28-36 días y luego se acumula en los huesos con una vida media de 27 años (ATSDR, 2020).

Una vez que el Pb ingresa en el organismo, causa numerosos efectos adversos para la salud, incluidos daños en los riñones y en los sistemas reproductivo, nervioso, cardiovascular y hematopoyético (Chen et al., 2019; Gottesfeld & Pokhrel, 2011). También ocasiona disrupciones endócrinas, genotoxicidad, inhibición de la actividad enzimática, muerte celular y problemas inflamatorios (Devóz et al., 2017). La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer ha clasificado al plomo y a los compuestos de plomo dentro del Grupo 2A de probables carcinógenos humanos (Nersesyan et al., 2016). Sin embargo, según Steenland y Boffetta (2000) la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer clasificó el plomo en el año 1987 como un "posible carcinógeno humano" basándose en que existían suficientes datos sobre su efecto en los animales, pero insuficientes datos en humanos. En la actualidad, hay numerosas investigaciones que demuestran la correlación entre los niveles de plomo y el cáncer.

En este sentido, Ahn et al. (2020) realizaron un metaanálisis donde analizaron 222 publicaciones y concluyeron que existe evidencia de asociación entre el plomo en sangre y la incidencia de tumores cerebrales, y observaron un mayor riesgo ante la exposición laboral a este metal. De igual manera, Steenland y Boffetta (2000) y Steenland et al. (2019) demostraron asociación entre los niveles de plomo en sangre con cáncer de pulmón y de cerebro (Chowdhury et al., 2014), y Meng et al. (2020) determinaron que el plomo puede ser un factor de riesgo de meningiomas y cáncer de cerebro. También se ha encontrado correlación entre el contenido de plomo y cáncer de laringe (Barry y Steenland, 2019), de estómago (Rousseau et al., 2007), de vejiga (Awadalla et al., 2020) y de mama en mujeres (Alatise y Schrauzer, 2010).

En adición, en los niños, la concentración de plomo en la sangre se asocia con una disminución significativa en el rendimiento académico y puntuaciones más bajas en las pruebas de coeficiente intelectual y está relacionado con el comportamiento hiperactivo y violento (Gaza et al., 2017). Este metal se elimina del cuerpo de forma lenta, principalmente a través de la orina, las heces, el cabello, las uñas y el sudor, y por ello se va acumulando con los años (Yabe et al., 2018).

La industria de las baterías es la mayor consumidora de plomo y se estima que aproximadamente el 80 % de la producción mundial de plomo se utiliza para fabricar las baterías, y aproximadamente el 50 % de esa producción se deriva del reciclaje de las mismas baterías

(Gottesfeld & Pokhrel, 2011). La fabricación de baterías de plomo implica preparar óxido de plomo, fundición de rejillas, pegado, corte de placas, formación, carga y ensamblaje; y, para ello, se utilizan productos químicos peligrosos tales como óxido de plomo, plomo esponjoso y ácido sulfúrico (Kalahasthi et al., 2019).

Esta industria se está expandiendo rápidamente en países con mercados emergentes y aumenta por el incremento en la demanda de vehículos. Se estima que, entre 60 000 y 70 000 personas están empleadas a nivel mundial en la fabricación de baterías de plomo, y la gran mayoría de estos trabajadores vive en países en vía de desarrollo, donde las medidas de control de metales pesados no son tan estrictas (Nouioui et al., 2019). Es por ello que para monitorear el contenido de plomo en estos trabajadores se utiliza como marcador biológico predominante la determinación de los niveles de plomo en sangre, que es utilizado en la evaluación clínica, el control del lugar de trabajo, la vigilancia de la salud pública y las decisiones de las autoridades reguladoras (Baloch et al., 2020; Stojšavljevi et al., 2019).

En este contexto, a nivel mundial se han descrito niveles promedio de plomo en sangre de trabajadores de fábrica de baterías de 47 $\mu\text{g}/\text{dL}$ en las plantas de fabricación de baterías y 64.00 $\mu\text{g} / \text{dL}$ en las instalaciones de reciclaje (Gottesfeld & Pokhrel, 2011). De acuerdo con el Centro de Control y Prevención de Enfermedades de Estados Unidos, el valor a partir del cual se consideran niveles elevados de Pb en todos los grupos de la población es 5 $\mu\text{g}/\text{dL}$; según la OMS, el límite máximo permisible es 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Téllez-Rojo et al., 2017). En el caso de exposición laboral, la Conferencia Americana de Industria Gubernamental propone un límite máximo de 30 $\mu\text{g}/\text{dL}$ y la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional indica que el límite de tolerancia en personas adultas expuesta a Pb es de 40 $\mu\text{g}/\text{dL}$. Con base en estos valores y a la revisión hecha por Gottesfeld & Pokhrel (2011) en trabajadores de fábricas de batería a nivel mundial, se evidencia que el personal presenta altos niveles de Pb, los cuales pueden ser peligrosos para su salud.

En Ecuador, se ha reportado que el 46 % de los trabajadores de una fábrica de batería en Quito presentaron niveles altos de plomo en sangre (Cevallos, 2013). En la investigación de Cevallos (2013) se encontraron niveles de plomo entre 5.40 a 79.50 $\mu\text{g}/\text{dL}$ Pb. Así mismo, Cruz (2015) reportó en otra fábrica de baterías, en Quito, que el 71 % de la población analizada presentaba niveles altos de plomo en sangre de 3.30 a 79.90 $\mu\text{g}/\text{dL}$. Sin embargo, se desconoce el nivel de plomo de los empleados de las fábricas de baterías de Guayaquil.

Guayaquil es la segunda ciudad más poblada de Ecuador, después de Quito, con una población de 2,7 millones de habitantes y es el principal centro económico, de recursos culturales y financieros de Ecuador (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2015). En esta ciudad se hallan numerosas industrias dentro de las que se encuentran fábricas de baterías.

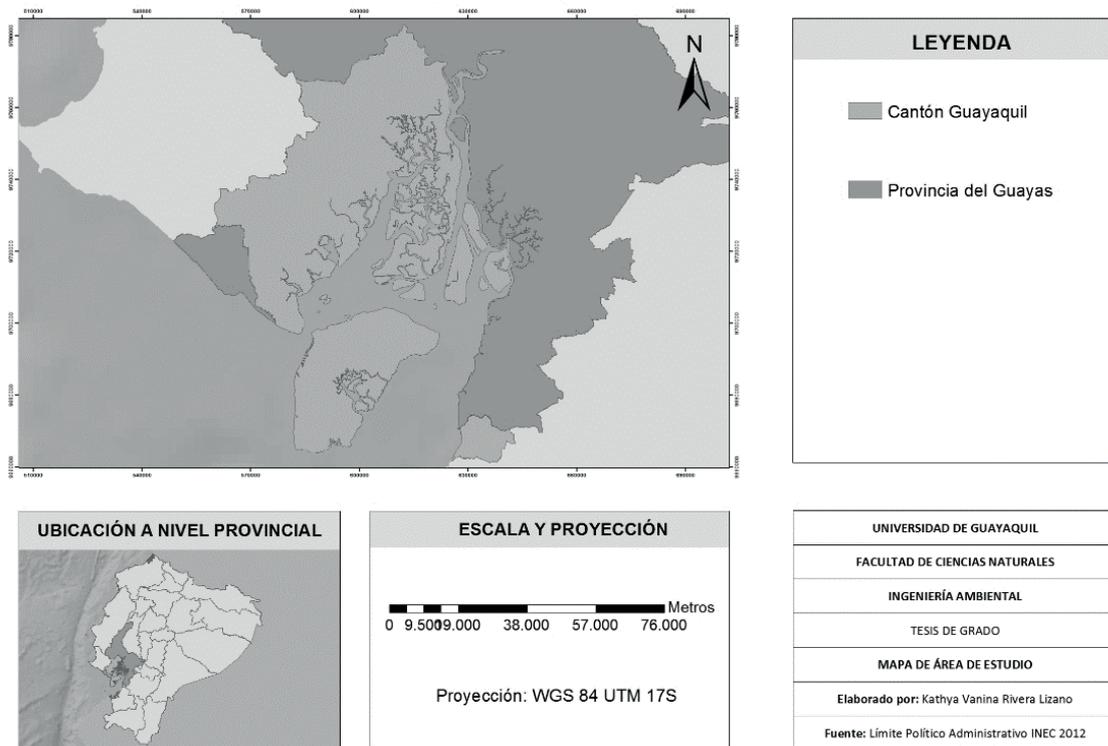
El objetivo de la investigación fue generar una línea base de concentraciones de plomo en sangre de trabajadores de fábricas de baterías en Guayaquil-Ecuador y de personas no expuestas laboralmente al metal; comparar los niveles de Pb según el sexo, edad, años de exposición y puestos de trabajo en la empresa para analizar los posibles riesgos asociados, y proponer algunas recomendaciones para mitigar los riesgos de exposición al Pb. La hipótesis planteada fue que las personas expuestas laboralmente al plomo muestran mayores concentraciones de plomo en sangre que las no expuestas y presentan un mayor riesgo de sufrir intoxicación por plomo.

2. Metodología

Área de estudio

Ecuador se encuentra en Suramérica, en la zona ecuatorial y en las costas del Océano Pacífico (Torres Del salto et al., 2017). La segunda ciudad más poblada y la más importante a nivel comercial de este país es Guayaquil, ubicada en la provincia de Guayas, en la Costa ecuatoriana, situada en la zona de vida bosque muy seco tropical (Figura 1). Guayaquil está ubicada en el margen occidental del río Guayas ($79^{\circ}50' - 79^{\circ}59'W$ y $2^{\circ}02' - 2^{\circ}18'S$). Es la ciudad más grande del país, con 1800 km² de área total y una población estimada de 2,69 millones. El clima de Guayaquil es tropical húmedo, con una temperatura media anual de 26 °C y una precipitación media de 1030 mm (Johansson et al., 2018).

Figura 1. Área de estudio en el cantón Guayaquil



Sujetos de estudio

La presente investigación de línea base fue de tipo exploratoria, con muestreo discrecional. Para elegir a los sujetos, se utilizó como criterio de inclusión que los trabajadores tuvieran dos o más años laborando en la empresa, y como criterio de exclusión que no fueran fumadores. Las muestras se tomaron en época laboral, con exposición mínima al plomo de un día. Se tomaron muestras de 198 trabajadores de 3 fábricas de baterías ubicadas en Guayaquil, con un rango

de edad de entre los 17 a los 62 años; dichos trabajadores fueron divididos en grupos según sus áreas de trabajo (Tabla 1).

Tabla 1. Puestos de trabajo de los empleados de las fábricas de baterías

Puesto de trabajo	Número de trabajadores por puesto de trabajo
Bodega de reciclaje	3
Bodega Materia Prima	11
Control de Calidad	16
Empastado mezcladora	10
Formación de baterías	46
Fundición	11
Ingeniería de mantenimiento	32
Montaje	47
Oficina	1
Recursos Humanos	2
Seguridad Industrial	4
Supervisión	11
Vicepresidencia	4
Total	198

Para la población control de trabajadores, el criterio de inclusión fue tener edades en el rango de 20 a 60 años. En cuanto a los criterios de exclusión, deben estar expuesto laboralmente al plomo y ser fumador. 21 voluntarios cumplieron con los criterios. La muestra se tomó en noviembre de 2019. Se siguió el protocolo de Helsinki y se obtuvo el consentimiento informado por escrito de cada uno de los sujetos antes de participar en el estudio.

Análisis de laboratorio

En un laboratorio acreditado con la norma ISO 17025 se tomaron 5 mL de sangre venosa de los trabajadores de las fábricas de batería y el grupo control. 2 mL de sangre se guardaron en viales con EDTA para estimar el nivel de plomo en sangre y se almacenaron a -20 °C hasta su análisis. Se digirieron 2 mL de sangre completa con 2 mL de ácido nítrico (HNO₃, Merck) y 0.2 mL de peróxido de hidrógeno (H₂O₂, Merck) en un microondas marca Sineo (MDS-15) a la potencia, temperatura y tiempo adecuados. Las muestras digeridas se enrasaron hasta 5 mL con agua triple destilada. Las muestras debidamente rotuladas, se leyeron en un espectrofotómetro Perkin Elmer, modelo AAnalyst 400, con horno de grafito HGA 900 y auto muestreador AS 800. Además, se digirió y analizó una concentración conocida de solución estándar de plomo para el control de calidad interno.

Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos se hicieron con el programa R versión 4.0.2. Se determinó la normalidad de los datos con la prueba de Kolmogorov-Sminorv, y el test de Levene se utilizó para determinar la igualdad de las varianzas entre los grupos. Para evidenciar si los hombres y mu-

jeros de la población presentaban mayores concentraciones de Pb, se llevó a cabo una prueba T-Student para varianzas desiguales ($p < 0.05$).

A fin de comparar los niveles de plomo por edades, tiempo de exposición o puestos de trabajo de las personas laboralmente expuestas, se realizó una ANOVA de una vía y test a posteriori de Tukey ($p < 0.05$).

3. Resultados

En el grupo perteneciente a trabajadores de las fábricas de baterías, el 100 % presentó plomo en sangre (Figura 2). En el grupo control, solo el 62 % de los voluntarios mostraron Pb en sangre. Además, el promedio de Pb en sangre de los trabajadores de las fábricas de batería fue de $16.22 \pm 6.82 \mu\text{g/dL}$ significativamente mayor al grupo control ($0.68 \pm 0.15 \mu\text{g/dL}$) según T de Student ($T = -30.68$; $P < 0.001$).

En cuanto al sexo, en el grupo de trabajadores de las fábricas, el sexo femenino presentó un menor nivel de Pb que el masculino, con diferencias estadísticamente significativas según T de Student ($T = -19.05$; $P < 0.001$). Las mujeres mostraron concentraciones de plomo en sangre de $2.10 \pm 2.34 \mu\text{g/dL}$ menores en comparación con los hombres ($15.99 \pm 7.16 \mu\text{g/dL}$). Asimismo, en los hombres se mostraron valores atípicos de 37.00 y 38.30 $\mu\text{g/dL}$ (Figura 3).

En el grupo control también se comprobó que los hombres presentaron mayores valores de plomo que las mujeres ($T = -2.89$; $P = 0.010$). En el sexo masculino se observó una media de $1.10 \pm 0.56 \mu\text{g/dL}$ y en el femenino $0.38 \pm 0.58 \mu\text{g/dL}$ (Figura 3). Se encontraron valores máximos de Pb de 1.50 $\mu\text{g/dL}$ en mujeres y 2.20 $\mu\text{g/dL}$ en hombres, los que son menores a los límites máximos permisibles de 10 $\mu\text{g/dL}$ y menores al valor de la CDC de 5 $\mu\text{g/dL}$, lo que indica que las personas no expuestas laboralmente a plomo no están en riesgo de sufrir envenenamiento por plomo.

Figura 2. Porcentaje de personas con plomo en sangre no detectable y detectable en la fábrica de baterías y el grupo control no expuesto ocupacionalmente

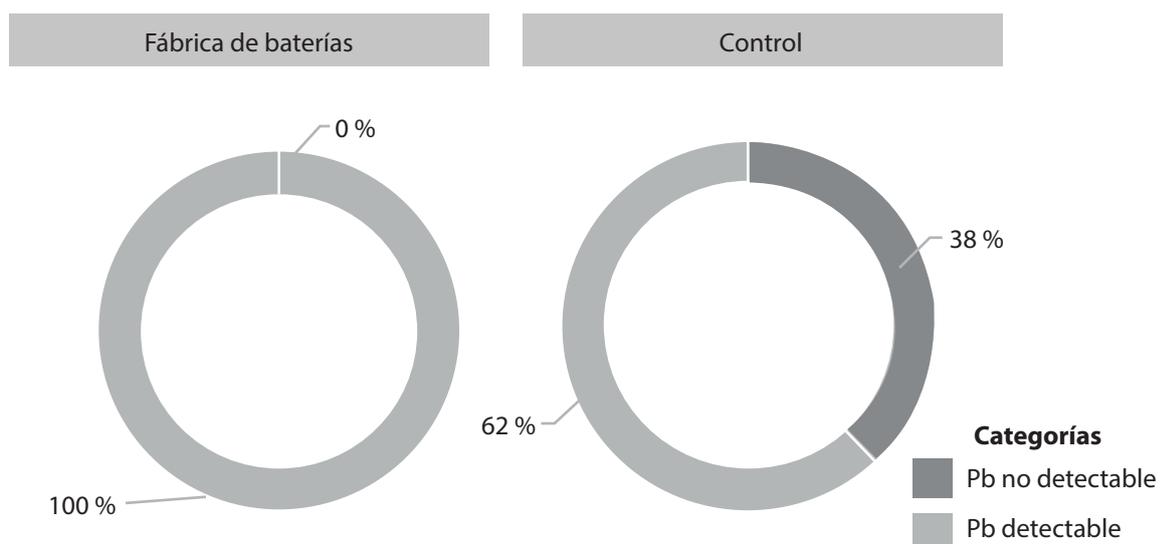
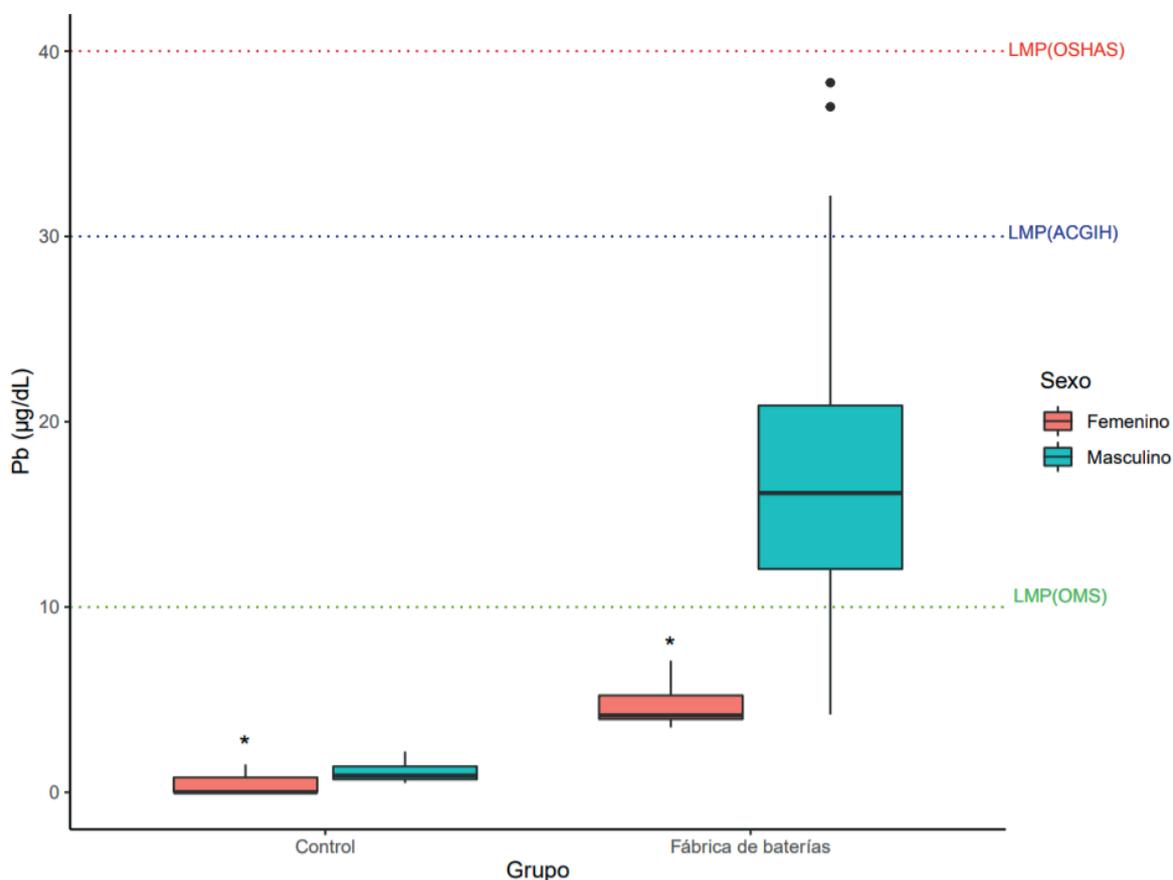


Figura 3. Concentración de plomo en sangre según el sexo en el grupo control y en los trabajadores de fábricas de baterías



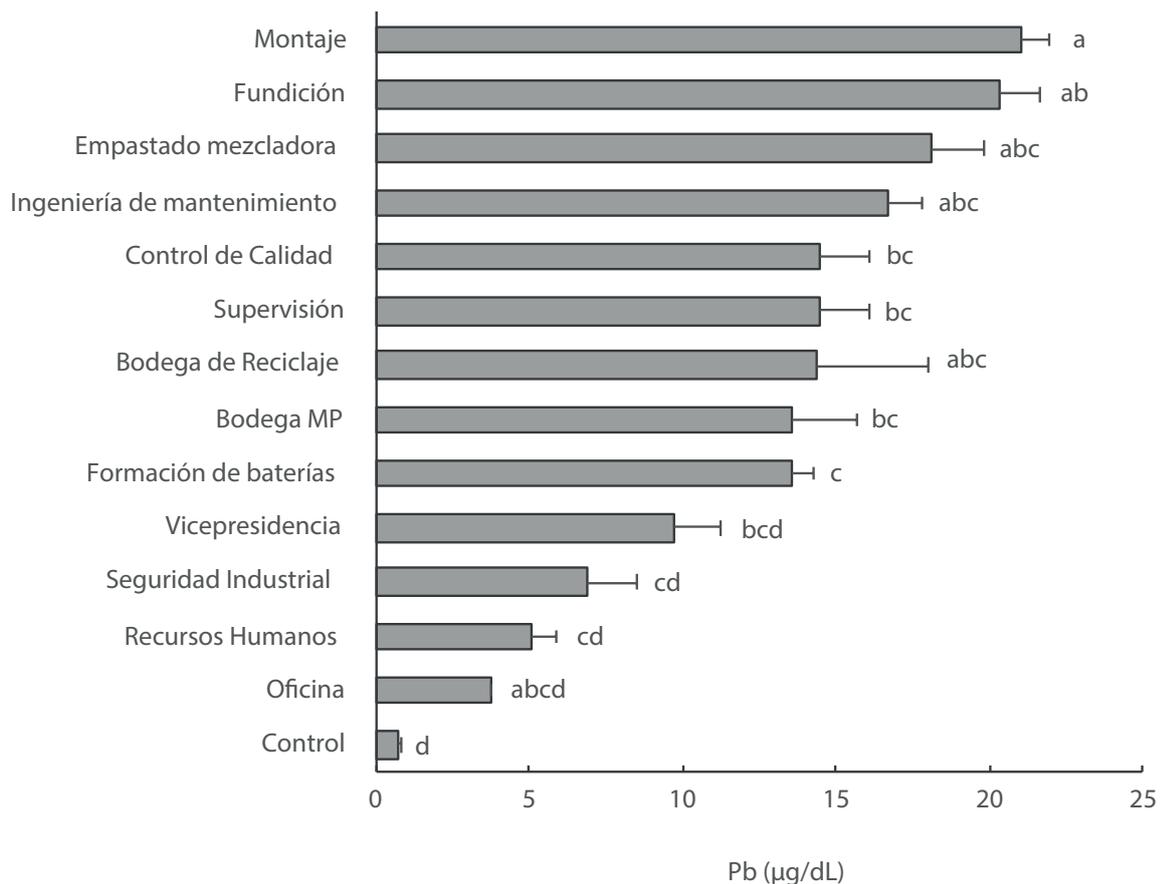
Nota: Línea verde: límite máximo permisible según la OMS (10 µg/dL); línea azul: límite máximo permisible según la American Conference Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) es de 30 µg/dL; línea roja: límite máximo permisible según la OSHA es de 40 µg/dL. El * indica que existen diferencias significativas según T de Student ($P > 0.05$).

Además del sexo, se comprobó que el puesto de trabajo es determinante en la contaminación por plomo en los trabajadores (Figura 4). Los niveles de Pb del personal de los diferentes puestos de trabajo se compararon con la población control, donde se observó que aquellos que trabajan en oficinas no presentaron diferencias significativas con las personas no expuestas, según la prueba de Tukey. Las personas del grupo control tuvieron un promedio de plomo en sangre de 0.69 ± 0.15 µg/dL, seguido por el personal de la fábrica de baterías que se encontraba en las oficinas con 3.80 ± 0.00 µg/dL; recursos humanos, 5.10 ± 0.80 µg/dL, y las que laboraban en seguridad industrial, 6.92 ± 1.62 µg/dL. Estos grupos se encontraron dentro de los límites máximos permisibles de la OMS (10 µg/dL).

Por el contrario, los individuos con elevadas concentraciones de Pb se encontraban en el área de montaje de baterías con un promedio de 21.00 ± 0.97 µg/dL, proceso de fundición, 20.33 ± 1.33 µg/dL; empastado mezcladora, 18.09 ± 1.71 µg/dL, y en el área de ingeniería de mantenimiento, 16.70 ± 1.13 µg/dL; además, se constataron diferencias significativas con el control

($F = 15.73$; $P < 0.001$). Este grupo presentó un riesgo para su salud porque supera los límites máximos permisibles de la OMS, sin embargo, se encuentran dentro de los límites admisibles según la OSHA (10-40 $\mu\text{g/dL}$) para personas expuestas laboralmente al plomo.

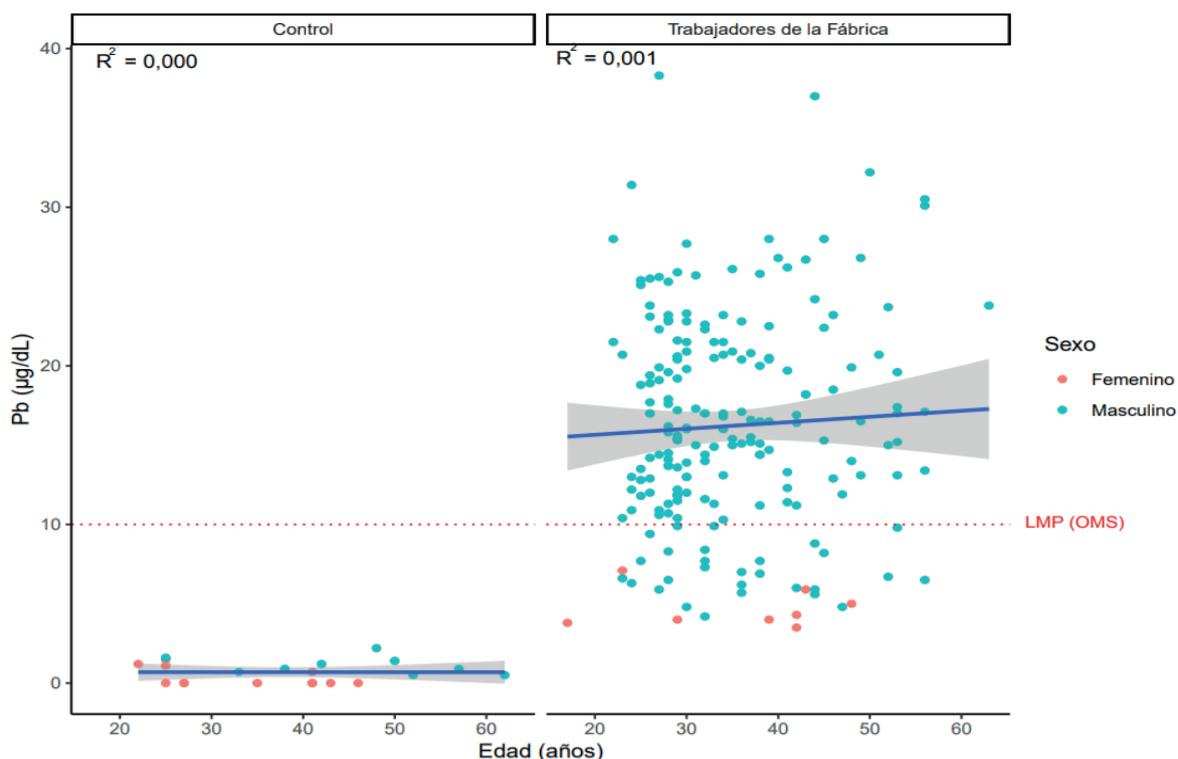
Figura 4. Concentración de plomo en sangre de la población no expuesta al Pb (control) y en trabajadores de fábricas de baterías según su puesto de trabajo



Nota: Los resultados se muestran como media \pm desviación estándar. Letras iguales indican que no existen diferencias significativas según Anova de una vía y test a posteriori de Tukey ($P > 0.05$).

Con respecto a la edad del personal, en la Figura 5 se comprueba que no existe un patrón en la concentración del metal pesado por edades. La correlación lineal mostro un valor de R^2 de 0.001, lo que indica que no existe correlación entre estas variables. De la misma manera, se aplicó un análisis de correlación de Pearson, que dio un valor de $r = -0.026$, por lo tanto, confirma que no existe correlación entre la edad y la concentración del metal pesado en sangre.

Figura 5. Concentración de plomo en sangre según la edad (puntos) y sexo (rosado: femenino; azul: masculino)

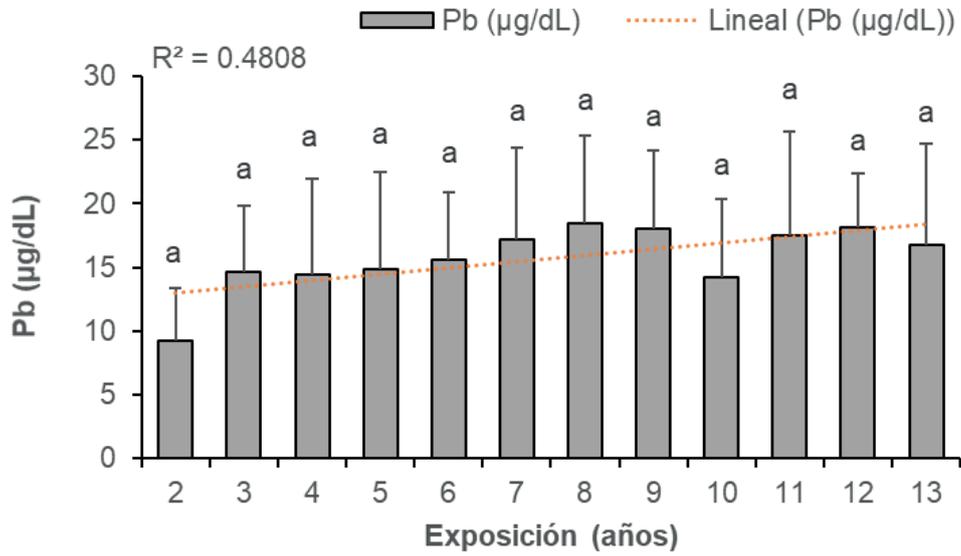


Nota: Línea azul: regresión lineal y línea roja: límite máximo permisible de plomo en sangre según la OMS.

Los años de exposición al Pb tampoco fueron determinantes porque no se encontraron diferencias significativas entre la concentración de plomo en sangre con respecto a los años de trabajo en la fábrica de baterías ($P > 0.05$). Sin embargo, en la Figura 6 se observa que el promedio de plomo en sangre en los trabajadores con 2 años de exposición fue de $9.26 \pm 4.08 \mu\text{g/dL}$ (min = 3.50, máx = 13.00 $\mu\text{g/dL}$ Pb) y los más antiguos en la compañía tenían 13 años de exposición y una concentración promedio de $16.79 \pm 7.86 \mu\text{g/dL}$ (min = 4.30, máx = 37.00 $\mu\text{g/dL}$). También se apreció una correlación lineal moderada con un R^2 de 0.48 entre la concentración del metal y los años de exposición (Figura 6).

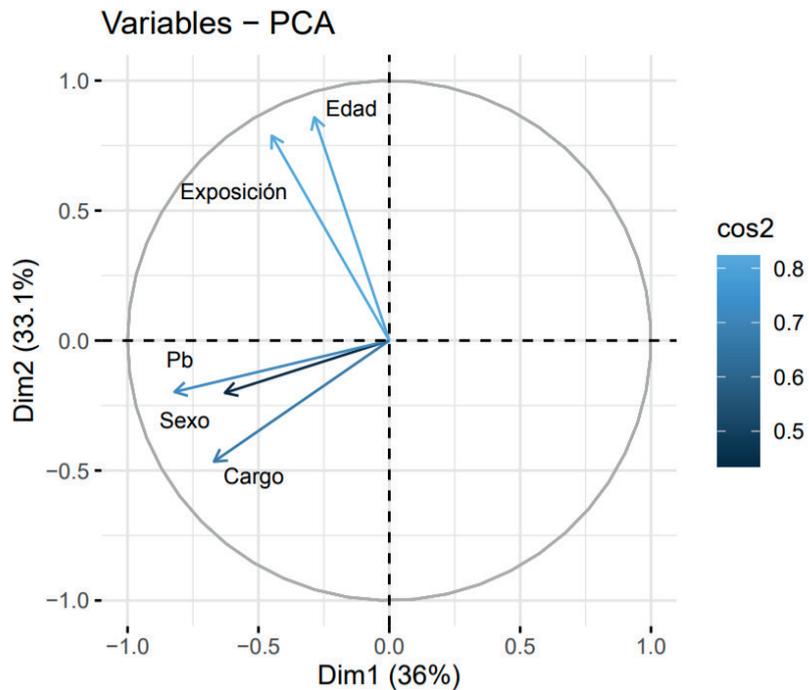
En la Figura 7 se aprecia un análisis de componentes principales donde se observó que cuatro de los componentes explicaron el 93 % de la correlación entre las variables. El primer componente (Dim1) mostró la correlación entre plomo en sangre con el cargo y el sexo, y el segundo componente (Dim2) una correlación entre los años de exposición y la edad de los trabajadores, lo que indica que existe mayor asociación entre altos niveles de Pb con el cargo y el sexo.

Figura 6. Concentración de plomo en sangre por años de exposición en los trabajadores de las fábricas de baterías



Nota: Letras iguales indican que no existen diferencias significativas según Anova de una vía y test a posteriori de Tukey ($P > 0.05$).

Figura 7. Análisis de componentes principales entre las variables concentración de plomo en sangre (Pb), sexo de los trabajadores, cargo, edad y años de exposición al Pb en los trabajadores de las fábricas de baterías



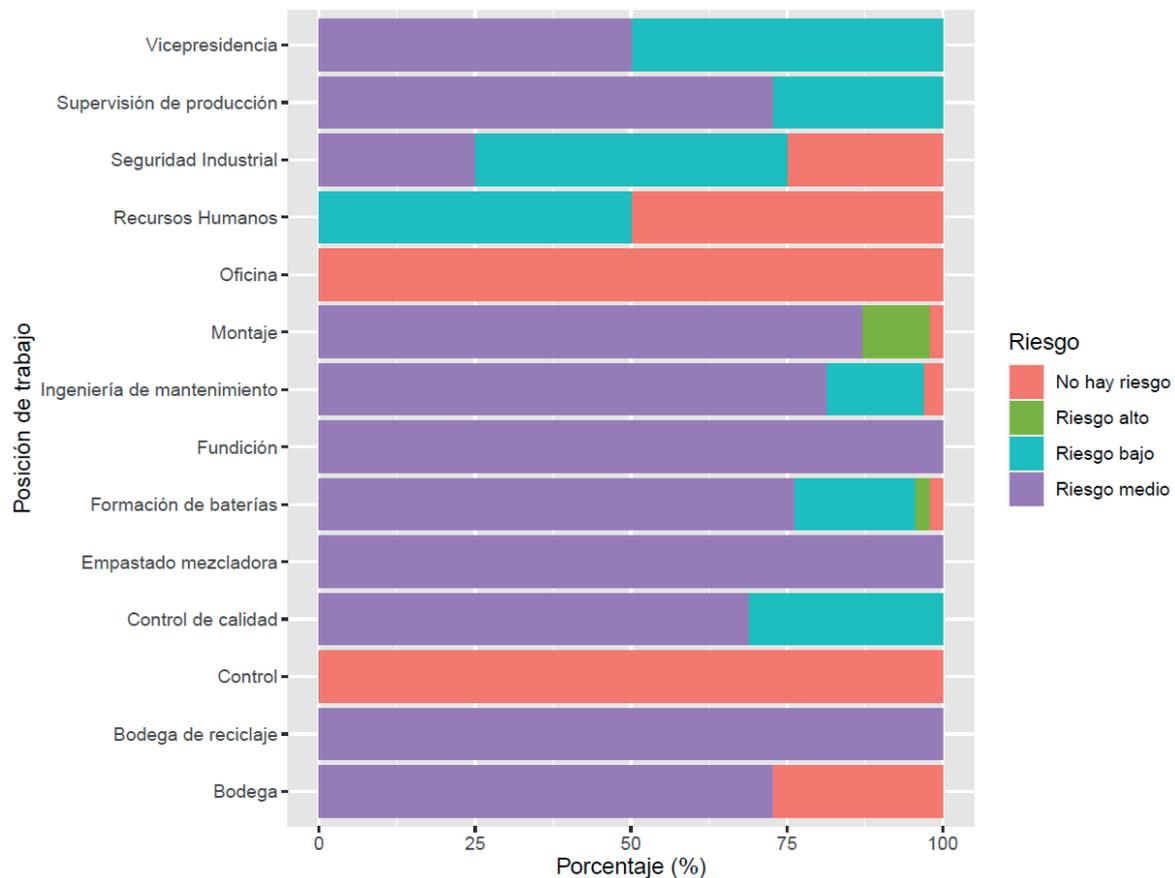
Con respecto a los riesgos a los cuales están expuestos los trabajadores en estudio, en la Tabla 2 se muestra, según el rango de Pb en sangre, cuáles son los riesgos y posibles efectos para los empleados de las fábricas de baterías. Solo el 4.55 % de los empleados no presentó riesgo por envenenamiento; un 13.64 % mostró un riesgo bajo y la mayor parte de los empleados (78.79 %) se encontraron en riesgo medio, solo en un 3.33 % se observó alto riesgo, quienes podrían sufrir de cáncer, daños renales y anomalías en el esperma. Afortunadamente, no se observaron casos de 70 $\mu\text{g}/\text{dL}$, por lo que se descarta la plumbemia en la población.

Tabla 2. Análisis de riesgo y posibles efectos sobre la salud de los trabajadores de las fábricas de baterías y el grupo control según la concentración de Pb en sangre

Rangos de Pb ($\mu\text{g}/\text{dL}$)	Norma de referencia	Frecuencia	Porcentaje (%)	Análisis de riesgo	Posibles efectos sobre la salud
Trabajadores de las fábricas de baterías					
Menos de 5	Valor de referencia para adultos según la CDC	9	4.55 %	No hay riesgo de envenenamiento por plomo	Solo afectaría a mujeres embarazadas con reducción en el crecimiento de los fetos si el valor supera 2.5 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Xie et al., 2013).
De 6 a 10	Límite máximo permisible según la OMS	27	13.64 %	Riesgo bajo de envenenamiento por plomo	Trastornos del estado de ánimo, aumento de riesgo de sufrir enfermedades cardiovasculares (ASTDR, 2020).
De 11 a 30	Límite máximo para exposición laboral según ACGIH	156	78.79 %	Riesgo medio de envenenamiento por plomo	Pérdida de audición, problemas de equilibrio, daño en el esperma, pérdida de funcionamiento neuronal, disminución de la función cognitiva, anemia y daño renal (ASTDR, 2020).
De 30 a 40	Límite de tolerancia en personas adultas expuesta a Pb según las normas OSHAS	6	3.03 %	Riesgo alto de envenenamiento por plomo	Aumento en el riesgo de cáncer de riñón, sistema nervioso, hígado, estómago y esófago (Nersesyan et al., 2016) y anomalías en el esperma.
Control					
Menos de 5	Valor de referencia para adultos según la CDC	21	100 %	No hay riesgo de envenenamiento por plomo	No hay efectos

Los riesgos según el puesto de trabajo evidenciaron que solo el personal de montaje (10.64 %) y el de formación de baterías (2.17 %) presentan un alto riesgo de envenenamiento por plomo (Figura 8). Por el contrario, el único puesto que no presenta riesgo de intoxicación es el de oficina al igual que el grupo control y el de Recursos Humanos con riesgo bajo (50.00 %) a nulo (50.00 %).

Figura 8. Riesgos de envenenamiento por plomo en los trabajadores de las fábricas de baterías según el puesto de trabajo y en el grupo control



4. Discusión

Se determinaron los niveles de plomo en sangre en trabajadores de fábricas de baterías ubicadas en Guayaquil-Ecuador, donde se detectó el metal en el 100 % de los empleados, con un rango de 3.50-38.00 $\mu\text{g}/\text{dL}$ Pb. Dentro de las causas de la contaminación por plomo en los trabajadores se encuentran la falta de higiene, problemas de ventilación en la empresa, no utilizar la ropa adecuada, la ingestión de alimentos en las áreas contaminadas y la falta de capacitación sobre los impactos del plomo en la salud. También se conoció que algunos trabajadores llevan la ropa usada durante la jornada laboral a sus hogares, lo que podría contaminar a sus familiares; asimismo, algunos empleados no utilizaban las máscaras porque les molestaban o les generaban calor. Las vías de ingreso del Pb en estos trabajadores fue la inhalación de partículas de plomo, la ingesta de alimentos en las zonas contaminadas y el contacto con la ropa impregnada con plomo.

Comparativamente, las concentraciones de Pb en los trabajadores de las fábricas de baterías de Guayaquil fueron semejantes a los resultados encontrados en Argentina 19.23 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Bilotta, Merodo, & Anibal, 2013), y menores a las reportadas en trabajadores de fábricas de Quito, donde se registraron niveles de 79.90 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Cruz, 2015) y a las reportadas en otros

países, tales como Perú 37.70 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Ramírez, 2008), Brasil 59.40 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Gottesfeld & Pokhrel, 2011), Venezuela 45.80 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Gottesfeld & Pokhrel, 2011), India 26.20-36.80 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Mishra et al., 2019), Siria 20.50-94.00 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Ramadan et al., 2009) y Pakistán 48.67-116.05 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Basit et al., 2015). Es importante mencionar que las fábricas de baterías analizadas en este trabajo cuentan con licencia ambiental en Ecuador y cumplen con las medidas de seguridad y salud ocupacional, lo que se refleja como menores niveles de plomo en su personal. Por el contrario, se han registrado altos niveles de Pb en trabajadores de fábricas informales de reciclado de baterías ubicadas en el sur del Perú, donde las concentraciones de Pb está entre 13.50 a 72.60 $\mu\text{g}/\text{dL}$, debido a las precarias condiciones de higiene y seguridad ocupacional tienen estas fábricas (Ramírez, 2008).

En cuanto a la exposición ocupacional, la máxima concentración de los trabajadores del presente estudio fue de 38.30 $\mu\text{g}/\text{dL}$ superando las concentraciones establecidas por la ACGIH, donde el valor límite en sangre es de 30 $\mu\text{g}/\text{dL}$. Sin embargo, según la OSHAS sus valores de exposición permitida están entre 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$ a 40 $\mu\text{g}/\text{dL}$.

Es preocupante que los límites laborales sean tan elevados tomando en cuenta que a partir de 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$ se considera que existe envenenamiento por plomo e incluso se ha demostrado que aun a menores concentraciones algunas personas pueden sufrir de aumento de la presión arterial, temblores y disfunción renal (Devóz et al., 2017), y después de los 30 $\mu\text{g}/\text{dL}$ aumenta el riesgo de padecer de cáncer (Nersesyan et al., 2016). Además, Instituto de Sanimetría y Evaluación Sanitaria reporta que la contaminación por Pb causó 1,06 millones de defunciones en el año 2017 y estimó que este metal pesado ocasionó el 10.30 % de las cardiopatías hipertensivas, el 6.20 % de los accidentes cerebrovasculares y el 5.60 % de las cardiopatías isquémicas a nivel mundial (OMS, 2019). Es por ello que se propone disminuir los límites permisibles para los trabajadores en Ecuador, mediante una norma que dicte que los trabajadores no superen los 25 $\mu\text{g}/\text{dL}$ de plomo.

En lo referente al puesto de trabajo, se demostró que el riesgo de contaminación es mayor en las áreas de montaje, formación de batería y fundición de plomo, probablemente porque se trabaja directamente con el plomo y este se une al material particulado y es inhalado por los trabajadores; y por el contrario, en las zonas de oficinas, recursos humanos y seguridad industrial, los niveles de plomo de los trabajadores no superaron los límites máximos permisibles de la OMS, por no estar en contacto directo con las áreas de trabajo contaminadas. Al igual que en esta investigación se ha descrito que el proceso de fundición del plomo genera un riesgo importante de intoxicación ocupacional por plomo y afecta tanto al trabajador como a su familia (Ramírez, 2008); de igual manera, en otras fábricas de baterías, los niveles de plomo en sangre son significativamente mayores en las secciones de pulido, corte y montaje en comparación con la sección de administración (Ravichandran et al., 2005). Asimismo, Ramadan et al. (2009) encontraron diferencias en el contenido de plomo en sangre en los diferentes sitios de trabajo en una fábrica de batería.

El sexo también fue determinante en los niveles de plomo porque muestra una tendencia a presentar mayores cantidades de plomo los hombres tanto en el grupo control como en los trabajadores de las fábricas de baterías. La explicación en la fábrica es que los hombres son los que trabajan en las áreas más contaminadas, mientras que las mujeres trabajan en las áreas de oficina donde la exposición al Pb es muy baja. En el grupo control podría deberse a otra fuente de contaminación como la contaminación atmosférica y a la ingesta de alimentos contaminados.

En líneas generales, los hombres ingieren mayor cantidad de alimentos que las mujeres y por ello podrían acumular mayores concentraciones del metal pesado.

Respecto al grupo control, el 62.00 % presentó plomo en sangre a pesar de que esta concentración está por debajo del límite establecido por la OMS, y, al no estar expuestos ocupacionalmente al Pb, se comprueba que existen otras vías alternas de contaminación. Una de las fuentes de contaminación podría ser de origen atmosférico por el polvo que se genera en las calles de Guayaquil. En este sentido, se ha descrito que el polvo es uno de los portadores más importantes de metales pesados (Padoan et al., 2017) y se ha demostrado que está constituido por tierra, materiales de construcción depositados, partículas en el aire, hollín y humos producidos por las industrias y los vehículos (Hou et al., 2019). Satián (2019), en su estudio realizado en Guayaquil, mostró la contaminación por plomo en el hollín procedente de la Metrovía (131.00 mg/kg y 127.00 mg/kg), el que puede ser inhalado como material particulado.

Del mismo modo, un estudio hecho en México por Morán (2012) demostró la concentración de plomo en sangre en personas no expuestas ocupacionalmente, donde la mayor concentración fue de 9.21 $\mu\text{g}/\text{dL}$, superior a la presente en el grupo control de Guayaquil. Por esta razón, se puede afirmar que sí existen otras fuentes de contaminación como la contaminación atmosférica. Otra vía de exposición a este metal pesado es a través de los alimentos. Un estudio realizado por Pernía et al. (2015) demostró que la leche en polvo puede contener hasta 7.77 mg/kg de Pb. También se ha encontrado plomo en el arroz, soya, cacao y café, alimentos de alto consumo en Ecuador, pueden representar una fuente importante de plomo (Benavides et al., 2021), así como en el agua potable de la ciudad de Guayaquil (Cipriani-Ávila et al., 2020).

Los valores hallados en el grupo control son bajos en comparación a los valores mundiales registrados en los años ochenta (mayor a 10 $\mu\text{g}/\text{dL}$), gracias a los esfuerzos para eliminar el plomo de la gasolina, la pintura y el agua potable, lo que se ha reflejado como una reducción sustancial en los niveles de plomo en la sangre humana (Hwang et al., 2019).

Para futuros estudios se recomienda analizar, además, del contenido de Pb en sangre algunos bioindicadores del daño generado por el metal pesado, tales como las coproporfirinas, ácido aminolevulínico en la orina, pirimidina-5-nucleotidasa, protoporfirina y actividad deshidratasa del ácido δ -aminolevulínico (ALAD) en eritrocitos (Sudjaroen & Suwannahong, 2017). También se recomienda incrementar el número de muestras en el grupo control para obtener un valor representativo de la población guayaquileña.

5. Conclusiones y recomendaciones

Esta investigación encontró concentraciones de Pb en sangre en un rango de 3.50 $\mu\text{g}/\text{dL}$ a 38.30 $\mu\text{g}/\text{dL}$ en los trabajadores de fábricas de baterías de Guayaquil. En cuanto a la comparación de Pb en sangre frente a la normativa internacional, se demostró que el 81.82 % de los trabajadores exceden el límite máximo establecido por la OMS, y el 3.03 % exceden el valor de la ACGIH, sin embargo, en relación con la normativa OSHAS se encuentran por debajo del límite.

Asimismo, se determinaron los valores bases de Pb en sangre de los voluntarios no expuestos a este metal pesado en la ciudad de Guayaquil, que variaron de 0.00 a 2.20 $\mu\text{g}/\text{dL}$ dando como valor promedio 0.68 $\mu\text{g}/\text{dL}$. Además, se confirmó la hipótesis, debido a que las concentraciones de Pb en sangre de los trabajadores fueron significativamente mayores con respecto a las personas no expuestas ocupacionalmente a este metal pesado, lo que indica un riesgo ocupacional para las personas que laboran en esta actividad.

Comparativamente, los hombres presentaron mayores concentraciones de Pb que las mujeres; aparte, se constató que los puestos de trabajo donde existe un alto riesgo de envenenamiento por plomo fueron el área de montaje y formación de baterías. Por el contrario, no se encontró correlación entre la edad y la concentración de plomo en sangre de los trabajadores de baterías ni en la población control y una correlación moderada entre los niveles de Pb y los años de exposición al metal.

Con la finalidad de proteger la salud de los trabajadores de fábricas de baterías, se enumeran a continuación unas recomendaciones para mitigar los riesgos a exposición al Pb:

1. Aislar los procesos para evitar que los gases volátiles afecten al personal, y, de manera continua, revisar y cambiar los filtros de aire.
2. En toda el área industrial es necesario usar extractores de aire para eliminar el material particulado que contiene Pb y causa problemas de salud en los trabajadores.
3. Capacitar al personal sobre los peligros del envenenamiento por plomo y el uso apropiado de los equipos de protección.
4. El personal debe utilizar ropa adecuada: camisas con mangas largas, pantalón largo y botas de seguridad.
5. El personal debe utilizar equipos de protección personal, tales como guantes, lentes de seguridad, mascarillas de doble filtro. Se recomienda la 3m 6200 filtro 7093, que deberá ser cambiado cada 2 meses. En el caso de no utilizar las mascarillas, se debe amonestar al personal. Además, todos los equipos deben ser lavados, cambiados regularmente y deben guardarse en compartimientos separados de la ropa limpia.
6. Se recomienda que todo el personal consuma diariamente zinc, hierro, magnesio y vitamina C para disminuir la absorción del Pb por competencia.
7. Rotar al personal de sus puestos de trabajo cuando los trabajadores muestren plomo en la sangre en una concentración superior a 25 $\mu\text{g}/\text{dL}$.
8. Vigilar que el personal no ingiera alimentos en el área de procesos.
9. A la hora de la comida, el personal debe cumplir con las medidas de higiene, tales como lavado de manos y cambio de uniforme.
10. No fumar en el trabajo. También debe prohibirse la tenencia del tabaco en el lugar de trabajo porque este puede contaminarse. Aunque se fume luego, constituye una vía de exposición potencial.
11. Debe ser obligatorio el uso de las duchas diariamente, al término de la jornada, con el fin de evitar que este agente químico se deposite en la piel, uñas y cabello del trabajador.
12. Al término de la jornada, la ropa del trabajador se debe lavar dentro de las instalaciones. El trabajador no podrá llevarse el uniforme para su hogar para evitar que sus familiares se contaminen con Pb.
13. Instalar duchas y lavaojos en los sectores donde se trabaje con plomo y ácido sulfúrico.
14. Realizar monitoreos de aire de forma bimensual para salvaguardar a los trabajadores y que el área de trabajo esté por debajo de los límites establecidos en aire $< 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Referencias

- Ahn, J., Park, M. Y., Kang, M. Y., Shin, I. S., An, S., & Kim, H. R. (2020). Occupational Lead Exposure and Brain Tumors: Systematic Review and Meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113975>
- Alatise, O. I., & Schrauzer, G. N. (2010). Lead Exposure: A Contributing Cause of The Current Breast Cancer Epidemic in Nigerian Women. *Biological Trace Element Research*, 136(2), 127–139. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8608-2>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2020). *Toxicological Profile for Lead*. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp13.pdf>
- Awadalla, A., Mortada, W. I., Abol-Enein, H., & Shokeir, A. A. (2020). Correlation between Blood Levels of Cadmium and Lead and The Expression of microRNA-21 in Egyptian Bladder Cancer Patients. *Heliyon*, 6(12), e05642. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05642>
- Ballantyne, A. D., Hallett, J. P., Jason, D., Shah, N., Payne, D. J., & Payne, D. J. (2018). Lead Acid Battery Recycling for The Twenty-first Century. *R. Soc. Open Sci.*, 5, 171368. <https://doi.org/10.1098/rsos.171368>
- Baloch, S., Kazi, T. G., Baig, J. A., Afridi, H. I., & Arain, M. B. (2020). Occupational Exposure of Lead and Cadmium on Adolescent and Adult Workers of Battery Recycling and Welding Workshops: Adverse Impact on Health. *Science of the Total Environment*, 137549. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137549>
- Barry, V., & Steenland, K. (2019). Lead Exposure and Mortality Among U.S. Workers in A Surveillance Program: Results from 10 Additional Years of Follow-up. *Environmental Research*, 177, 108625. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108625>
- Basit, S., Karim, N., & Munshi, A. B. (2015). Occupational Lead Toxicity in Battery Workers. *Pakistan Journal of Medical Sciences*, 31(4), 775–780. <https://doi.org/10.12669/pjms.314.7066>
- Benavides, A., Romero, B., Pérez, I., Pernía, B. (2021). Contaminación por metales pesados en alimentos de origen vegetal en Ecuador: Una propuesta para su mitigación. *Granja*, In Press.
- Bilotta, M. C., Merodo, P., & Godoy Ortiz, A. (2013). Exposición a la contaminación con plomo en taller de ensamble de baterías. *Ciencia & Trabajo*, 15(48), 158–164. <https://doi.org/10.4067/s0718-24492013000300009>
- Cevallos, F. (2013). *Evaluación y correlación clínica de los niveles de plumbemia, en los trabajadores que elaboran acumuladores eléctricos, para la implementación de medidas de control*. [Tesis de licenciatura, Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador. Repositorio Universidad Internacional SEK Ecuador. <https://bit.ly/38VX3eD>
- Chen, X., Zhu, G., Wang, Z., Zhou, H., He, P., Liu, Y., & Jin, T. (2019). Ecotoxicology and Environmental Safety The association between Lead and Cadmium Co-exposure and Renal Dysfunction. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 173, 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.121>
- Chowdhury, R., Ebel Sarnat, S., Darrow, L., McClellan, W., & Steenland, K. (2014). Mortality among Participants in A Lead Surveillance Program. *Environmental Research*, 132, 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.03.008>
- Cipriani-Avila, I., Molinero, J., Jara-Negrete, E., Barrado, M., Arcos, C., Mafla, S., Custode, F., Vilaña, G., Carpintero, N., & Ochoa-Herrera, V. (2020). Heavy metal assessment in drinking waters of Ecuador: Quito, Ibarra and Guayaquil. *Journal of Water and Health*, 18(6), 1050–1064. <https://doi.org/10.2166/wh.2020.093>
- Dean, J. R., Amaibi, P. M., Okorie, A., & Entwistle, J. A. (2020). A Critical Evaluation of The Use and 'Misuse' of As and Pb Bioaccessibility Data in Human Health Risk Assessments. *Environmental Research*, 189, 109915. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109915>
- Devóz, P. P., Gomes, W. R., Araújo, M. L. De, Ribeiro, L., Pedron, T., Maria, L., Antunes, G., Lemos, B., Jr, F. B., Rafael, G., Barcelos, M., Ribeiro, D. L., Pedron, T., Maria, L., Antunes, G., Batista, B. L., Jr, F. B.,

- Rafael, G., Barcelos, M., & Pb, L. (2017). Lead (Pb) Exposure Induces Disturbances in Epigenetic Status in Workers Exposed To This Metal. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 80(19–21), 1098–1105. <https://doi.org/10.1080/15287394.2017.1357364>
- Fry, K. L., Wheeler, C. A., Gillings, M. M., Flegal, A. R., & Taylor, P. (2020). Anthropogenic Contamination of Residential Environments from Smelter As, Cu and Pb Emissions: Implications for Human Health. *Environmental Pollution*, 262, 114235. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114235>
- Gaza, M. A., Hakim, L., Sabarudin, A., & Bambang, S. (2017). Evaluation on Mercury, Cadmium, and Lead in the Hair Sample as an Indicator of Autism for Children. 9(12), 710–715. <https://bit.ly/3b0EQS6>
- Gottesfeld, P., & Pokhrel, A. K. (2011). Review: Lead Exposure in Battery Manufacturing and Recycling in Developing Countries and Among Children in Nearby Communities. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8(9), 520–532. <https://doi.org/10.1080/15459624.2011.601710>
- Himani, Kumar, R., Ansari, J. A., Mahdi, A. A., Sharma, D., Karunanand, B., & Datta, S. K. (2020). Blood Lead Levels in Occupationally Exposed Workers Involved in Battery Factories of Delhi-NCR Region: Effect on Vitamin D and Calcium Metabolism. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 35(1), 80–87. <https://doi.org/10.1007/s12291-018-0797-z>
- Hou, S., Zheng, N., Tang, L., Ji, X., Li, Y., & Hua, X. (2019). Pollution Characteristics, Sources, and Health Risk Assessment of Human Exposure to Cu, Zn, Cd and Pb Pollution in Urban Street Dust Across China between 2009 and 2018. *Environment International*, 128(julio), 430–437. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.046>
- Hwang, Y., Kate, C., & Lin, P. (2019). Globally Temporal Transitions of Blood Lead Levels of Preschool Children across Countries of Different Categories of Human Development Index. *Science of the Total Environment*, 659(17), 1395–1402. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.436>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2015). *Compendio estadístico 2016*. <https://www.ecuadorcencifras.gob.ec/compendio-estadistico-2016/>
- Johansson, E., Yahia, M. W., Arroyo, I., & Bengs, C. (2018). Outdoor Thermal Comfort in Public Space in Warm-humid Guayaquil, Ecuador. *International Journal of Biometeorology*, 62(3), 387–399. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1329-x>
- Kalahasthi, R., Bagepally, B. S., & Tapu, B. (2019). Association of Musculoskeletal Disorders and Inflammation Markers in Workers Exposed to Lead (Pb) from Pb - Battery Manufacturing Plant. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 23(2), 68–72. https://doi.org/10.4103/ijjem.IJOEM_192_18
- Meng, Y., Tang, C., Yu, J., Meng, S., & Zhang, W. (2020). Exposure to Lead Increases The Risk of Meningioma and Brain Cancer: A Meta-analysis. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 60(December 2019), 126474. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126474>
- Mishra, S., Kannan, S., Manager, C., Statistics, A., Comments, R., & Alert, E. (2019). Association of Musculoskeletal Disorders and Inflammation Markers in Workers Exposed to Lead (Pb) from Pb-battery Manufacturing plant. *Indian Journal of Occupational and International Medicine*, 23(1), 8–13. https://doi.org/10.4103/ijjem.IJOEM_192_18
- Morán, J. (2012). La contaminación ambiental y ocupacional por plomo y sus efectos en la salud reproductiva masculina, evidencia de daño al ADN. *Revista Iberoamericana de Las Ciencias de La Salud*, 1(2), 1–36. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5045746>
- Nersesyan, A., Kundi, M., Waldherr, M., Setayesh, T., Misik, M., Wultsch, G., Filipic, G., & Siegfried, B. (2016). Results of Micronucleus Assays with Individuals Who Are Occupationally and Environmentally Exposed To Mercury, Lead And Cadmium. *Mutation Research-Reviews in Mutation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2016.04.002>
- Nouioui, M. A., Araoud, M., Milliand, M., & Bessueille-barbier, F. (2019). Biomonitoring Chronic Lead Exposure among Battery Manufacturing Workers in Tunisia. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(8), 7980–7993. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04209-y>

- Organización Mundial de la Salud. (2019). *Intoxicación por plomo y salud*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- Padoan, E., Romè, C., & Ajmone-Marsan, F. (2017). Bioaccessibility and Size Distribution of Metals in Road Dust and Roadside Soils along A Peri-Urban Transect. *Science of the Total Environment*, 601–602, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.180>
- Pernía, B., Mero, M., Bravo, K., Ramírez, N., López, D., Muñoz, J., & Egas, F. (2015). Detección de cadmio y plomo en leche de vaca comercializada en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. *Rev. Cient. Cien. Nat. Ambien.*, 8(2), 81–86. <https://bit.ly/38YWDUT>
- Ramadan, A. A., Mandil, H., & Ismail, M. H. (2009). Determination of Lead Pollutants in Acid Batteries and Liquid Gases in Aleppo-Syrian Company Using Total Suspended Particulate and Chemical Trap Methods. *Asian Journal of Chemistry*, 21(8), 6562–6568. <https://bit.ly/3iqN6Jn>
- Ramírez, A. (2008). Exposición a plomo en trabajadores de fábricas informales de baterías: Workers' Lead Exposure in Informal Batteries Factories. *An Fac Med.*, 69(2), 104–107. <https://bit.ly/3isPteq>
- Ravichandran, B., Ravibabu, K., Raghavan, S., Krishnamurthy, V., Rajan, B. K., & Rajmohan, H. R. (2005). Battery Manufacturing Unit in India. *Journal of Occupational Health*, 47(4), 350–353. <https://doi.org/10.1539/joh.47.350>
- Rousseau, M. C., Parent, M. E., Nadon, L., Latreille, B., & Siemiatycki, J. (2007). Occupational Exposure To Lead Compounds and Risk of Cancer Among Men: A Population-based Case-control Study. *American Journal of Epidemiology*, 166(9), 1005–1014. <https://doi.org/10.1093/aje/kwm183>
- Steenland, K., & Boffetta, P. (2000). Lead and Cancer in Humans: Where Are We Now? *American Journal of Industrial Medicine*, 38(3), 295–299. [https://doi.org/10.1002/1097-0274\(200009\)38:3<295::AID-AJIM8>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/1097-0274(200009)38:3<295::AID-AJIM8>3.0.CO;2-L)
- Steenland, K., Barry, V., Anttila, A., Sallmen, M., Mueller, W., Ritchie, P., McElvenny, D. M., & Straif, K. (2019). Cancer Incidence Among Workers With Blood Lead Measurements in Two Countries. *Occupational and Environmental Medicine*, 76(9), 603–610. <https://doi.org/10.1136/oemed-2019-105786>
- Stojisavljevi, A., Borkovi, S., Vujoti, L., Gruji, D., Gavrovi, M., & Manojlovi, D. (2019). Ecotoxicology and Environmental Safety. The Human Biomonitoring Study in Serbia : Background Levels For Arsenic, Cadmium, Lead, Thorium And Uranium In The Whole Blood Of Adult Serbian Population. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169, 402–409. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.043>
- Sudjaroen, Y., & Suwannahong, K. (2017). Biomarker Related Lead Exposure of Industrial Battery's Workers. *Annals of Tropical Medicine and Public Health*, 10(1), 194–198. <https://doi.org/10.4103/1755-6783.196523>
- Téllez-Rojo, M. M., Bautista-Arredondo, L., Leng, L., Richardson, V., Estrada-Sánchez, D., Ávila-Jiménez, L., Ríos, C., Cantoral-Preciado, A., Romero-Martínez, M., Flores-Pimentel, D., Melo-Zurita, M. C., Romero-Ramírez, A., León-Mazón, M. A., Montes, S., Fuller, R., & Hernández-Ávila, M. (2017). Intoxicación por plomo y nivel de marginación en recién nacidos de Morelos, México. *Salud Pública de México*, 59(3), 218–226. <https://doi.org/10.21149/8045>
- Torres Del salto, R., Constante, M., Torres, B., & Rendón, I. (2017). Evaluación climática para determinar las estrategias bioclimáticas de una vivienda dúplex en la ciudad de Durán. *Dominio de Las Ciencias*, 3(3), 865–883. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6244038>
- Xie, X., Ding, G., Cui, C., Chen, L., Gao, Y., Zhou, Y., Shi, R., & Tian, Y. (2013). The Effects of Low-Level Prenatal Lead Exposure on Birth Outcomes. *Environmental Pollution*, 175, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.12.013>
- Yabe, J., Nakayama, S. M. M., Ikenaka, Y., Yohannes, Y. B., Bortey-sam, N., Nketani, A., Ntapisha, J., Mizukawa, H., Umemura, T., & Ishizuka, M. (2018). Chemosphere Lead and Cadmium Excretion in Feces and Urine of Children from Polluted Townships Near A Lead-Zinc Mine in Kabwe, Zambia. *Chemosphere*, 202, 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.079>

Análisis de viabilidad de microrredes eléctricas con alta penetración de recursos renovables en zonas urbanas: caso de estudio condominios residenciales

(Viability of micro electrical networks with high penetration of renewable resources in urban areas: Case study of residential condominiums)

Danny Javier Trujillo Sandoval¹, Fabricio Ismael Mosquera Velásquez², Edwin Marcelo García Torres³

Resumen

El presente estudio aborda la implementación de microrredes eléctricas en zonas urbanas como respuesta a la necesidad de inserción de energías renovables en las sociedades. En una primera fase se caracteriza el perfil de consumo de energía de un condominio con carga de tipo residencial, comercial y comunitaria, abordando la construcción de este perfil mediante levantamiento de cargas reales y criterios estadísticos de factores de uso y coincidencia. En la segunda fase se analizan los recursos naturales velocidad del viento y radiación solar disponibles en la zona de estudio a través del *software* especializado Homer Pro con coordenadas de latitud y longitud. Posteriormente se analiza y define la viabilidad de los elementos de generación eléctrica renovable por emplear, también se plantea un posible grupo electrógeno y su uso de combustible con el fin de complementar la microrred en aspectos de inercia y estabilidad. Con la demanda de energía y recursos de generación planteados se diseñan alternativas de arquitectura de una potencial microrred para el condominio, se hacen simulaciones para los casos aislado e interconectado con valores reales del entorno y un análisis económico de la implementación, para obtener la viabilidad de la microrred.

Palabras clave

Energía renovable, microrred, fotovoltaico, residencial, eólico.

Abstract

This study addresses the implementation of electrical micro-grids in urban areas as a response to the need for the insertion of renewable energies in different societies. In a first phase, the energy consumption profile of a condominium with a residential, commercial type load is characterized. and community, addressing the construction of said profile by lifting real loads and statistical criteria of use and coincidence. In the second phase, the natural resources, wind speed and solar radiation available in the study area are analyzed through the specialized software Homer Pro with latitude and longitude coordinates, subsequently the viability of the renewable electricity generation elements is analyzed and defined use, a possible generator set and its use of fuel are also proposed in order to complement the micro-grid in aspects of inertia and stability. With the energy demand and generation resources raised, architectural alternatives of a potential micro-network for the condominium are designed, simulations are carried out for isolated and interconnected cases with real values of the environment and an economic analysis of the implementation, obtaining the viability of the micro network.

Keywords

Renewable energy, micro-grid, photovoltaic, residential, wind.

1 Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Quito, Ecuador [trujillos2@aest.ups.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-8098-3614>].
2 UPS, Quito, Ecuador [fmosquerav@aest.ups.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-0375-7407>].
3 UPS, Quito, Ecuador [egarcia@ups.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-3102-6919>].

1. Introducción

El desarrollo de las sociedades y sus diferentes elementos conlleva en la actualidad al pensamiento sostenible, con el fin de garantizar el bienestar futuro del ser humano y del medio que lo rodea, recordando que existe un vínculo claro entre el desarrollo institucional del país y el contexto propicio para el desarrollo de energías renovables (Recalde et al., 2015), por lo tanto, la seguridad energética involucra la revisión y vigilancia de todos los países (Umbarila Valencia et al., 2015). Además, la generación de energía eléctrica a través de combustibles fósiles llegará en pocas décadas a su fin, pues se estimó, hace algunos años, que las reservas de petróleo con el ritmo de consumo actual durarán aproximadamente 5 décadas (Khaligh & Li, 2010). Las fuentes hídricas para producción de energía también han ocasionado inconvenientes como sequías y cambios en el clima (Guacaneme et al., 2018) que cada vez son inciertos debido al cambio climático global. Estos escenarios presentan a las energías renovables como una de las valiosas alternativas (Guacaneme et al., 2018), con tasas de crecimiento promedio en generación renovable al 2018 de 5.3 % (IEA, 2019), y que contribuirán al bienestar del ser humano y su entorno. Es así que ya en muchas zonas del mundo se utilizan en hogares e industrias las energías a base del viento, radiación solar, biocombustibles, entre otras; y varios organismos y empresas han centrado sus esfuerzos para desarrollar soluciones tecnológicas asociadas.

El desafío de cualquier compañía de servicios energéticos es proporcionar energía limpia y adecuada con una forma conveniente para el consumidor, ya que tiene una relación directa con los estándares de vida, aliviar la pobreza y garantizar la seguridad energética. Los países desarrollados están reduciendo su dependencia del combustible fósil e invierten proactivamente y en montos considerables, en combustibles alternativos para proteger el sistema ecológico para el desarrollo sostenible (Sivarasu et al., 2015; Delboni et al., 2018). Existen a nivel mundial varios ejemplos de líderes como China que en 2018 mostró un valor cercano al 45 % del total mundial en aumento de la capacidad de electricidad renovable. El segundo mayor crecimiento de capacidad renovable es de la Unión Europea, se debe considerar que, en este escenario, un 85 % del crecimiento fue a partir de energía solar y eólica (International Energy Agency [IEA], 2019).

Las energías renovables con mayor penetración y competitividad a nivel mundial son las eólica y fotovoltaica (IEA, 2019; Beltrán-Telles et al., 2017; Gómez et al., 2018). Estas brindarán una potencia localmente, lo que a su vez disminuirá la corriente que existe a lo largo de la sección del conductor, para así mitigar las pérdidas en el sistema de distribución (Mosquera, 2020), pues ofrecen varias ventajas de implementación, mantenimiento y producción de energía, perfilándose como los grandes aportes renovables del futuro por su naturaleza y abundancia en la actualidad.

Existen varios estudios en los cuales la energía fotovoltaica resulta atractiva a nivel de grupos residenciales dada su naturaleza estática en cuanto a los componentes mecánicos, diversidad de bondades de instalación, costos de mantenimiento, flexibilidad en el control asociado, *back up* de energía, entre otros (IEA, 2019; Sivarasu et al., 2015; Amrr et al., 2018; Lata-García et al., 2017, October 18–20; Manoj Kumar et al., 2020; Pascual et al., 2014; Rousis et al., 2018). Esto también ha conllevado al estudio más profundo de generación distribuida y microrredes con el fin del futuro energético de las sociedades.

Las microrredes pueden contemplar modos aislado o interconectado con la red (Pascual et al., 2013, September, 15–19; Rodriguez-Diaz et al., 2017, June 27–29; Yousaf et al., 2019, April 16–17) y se pueden tener múltiples configuraciones con diversidad de recursos energéticos y tipos de carga. Usualmente también se las relaciona con la aplicación de energías renovables, generación distribuida, mejoramiento de eficiencia y reducción de pérdidas en sistemas eléctricos, sistemas de almacenamiento, descentralización de suministros, reducción en emisión de CO₂, entre otros (Sivarasu et al., 2015; Delboni et al., 2018; Rodriguez-Diaz et al., 2017, June 27–29; Suresh et al., 2020).

Esta investigación plantea la evaluación de recursos renovables a través de *software* especializado en condominios de tipo residencial que incluyen consumos comunitarios y comerciales, proponiendo también un diseño de una potencial microrred en la zona caso de estudio planteado y evaluándola económicamente como sistema aislado e interconectado. El trabajo en las primeras dos fases describe el condominio residencial, las áreas comunes y comerciales, y caracteriza la demanda de energía a través del estudio independiente de carga residencial por medio de departamentos y locales comerciales standard y consumo comunitario general. En la tercera fase se analizan los recursos de viento y radiación solar de la zona de estudio mediante el *software* especializado Homer Pro. En la cuarta y quinta fase, con los resultados validados, se diseña, simula y analiza la potencial microrred para el caso de estudio.

2. Metodología

2.1. Diseño de la investigación

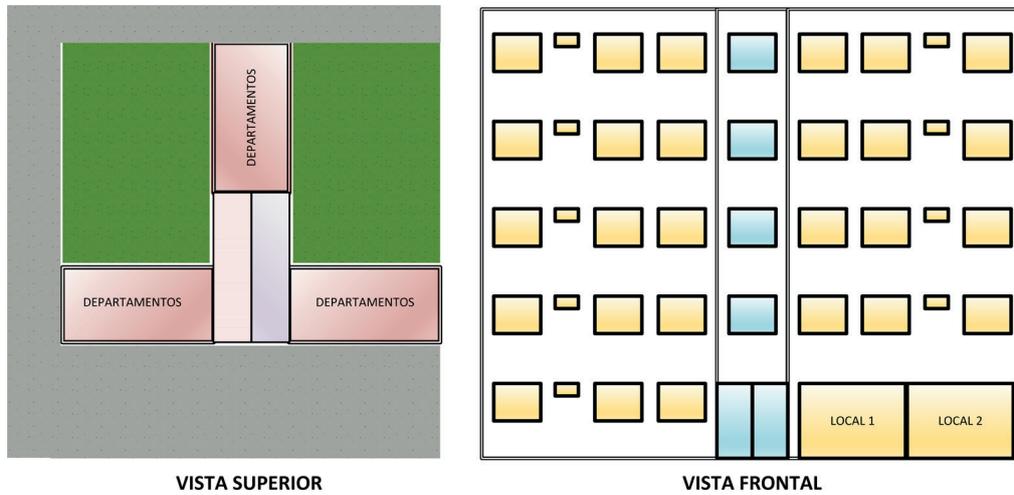
El diseño de la investigación se basó en una metodología mixta secuencial compuesta por dos fases: en la primera fase se aplicó un diseño de investigación cualitativo con alcance descriptivo basado en modalidad documental y de entrevista para caracterizar el condominio, sistema eléctrico y detalles de consumo actual. En la segunda, mediante un diseño de investigación cuantitativo y alcance descriptivo, se construyeron los perfiles de demanda, análisis de recursos energéticos renovables disponibles, diseño de la micro red y análisis de viabilidad financiera de los diferentes escenarios planteados.

2.2. Zona de estudio y configuración inicial del sistema

2.2.1. ZONA DE ESTUDIO

Los condominios estándar están situados en el sector sur de la capital ecuatoriana. Este condominio es de tipo residencial con 14 departamentos dentro del edificio, con 2 locales comerciales en la planta baja y áreas comunales. En la Figura 1 se puede ver el tipo de edificación sujeto de estudio y su distribución.

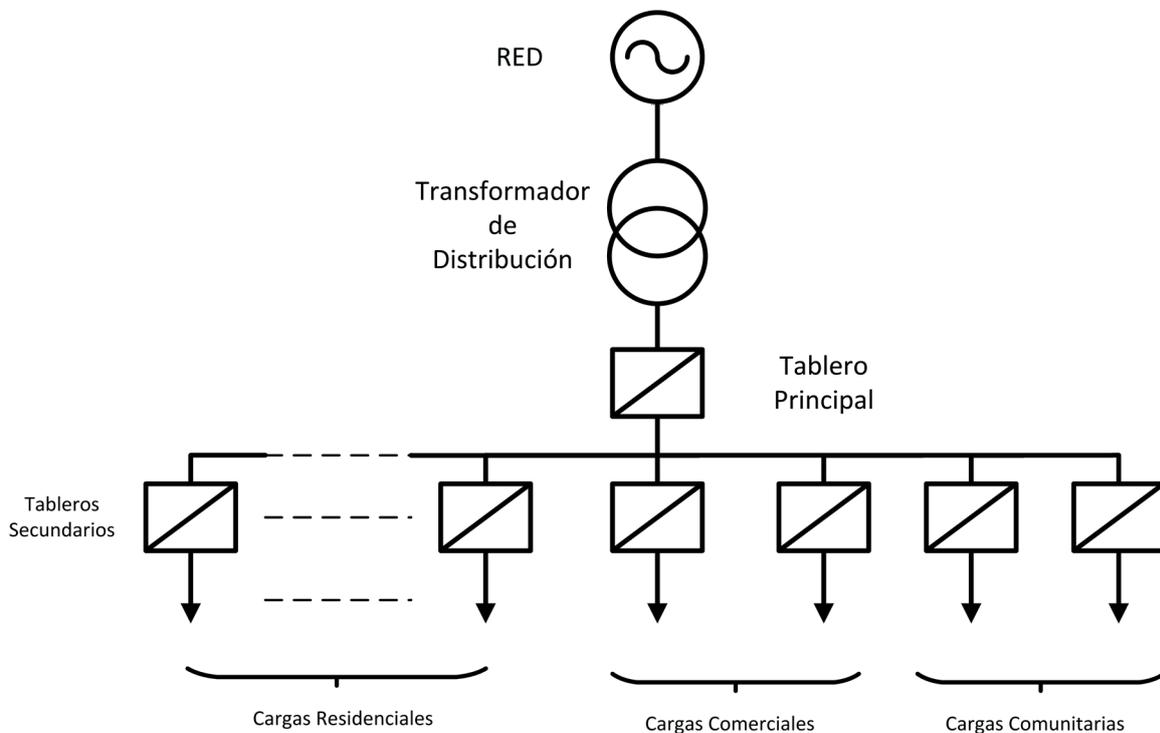
Figura 1. Vistas de la configuración del condominio



2.2.2. CONFIGURACIÓN INICIAL DEL SISTEMA

En la Figura 2 se presenta un diagrama eléctrico de tipo esquemático general del condominio, en el cual se identifican los diferentes puntos de conexión en cuanto a tableros principal y secundarios con los cuales se cuenta. Esta información ha sido levantada *in situ* con el fin de sentar las bases para la sección de estudio de demanda, recursos renovables y diseño de la microrred.

Figura 2. Esquema eléctrico del condominio



2.3. Recolección de datos, instrumentos y procesamiento

Para el estudio se recopilaron datos de la edificación, esquema eléctrico y consumo mediante planillas durante el primer semestre de 2020 en trabajo de campo *in situ*. Para el tratamiento de los datos e información, se utilizó el *software* Matlab R2018b y Microsoft Excel 2016; para el caso del análisis técnico económico de la microrred y energías renovables de la zona, se utilizó el *software* HOMER Pro, Versión 3.13.8. A continuación, se detallan las ecuaciones y fundamentos para el procesamiento de datos y análisis de información de las diferentes secciones del proyecto.

2.3.1. PERFIL DE DEMANDA DE ENERGÍA

La caracterización del perfil de consumo del condominio es clave pues permitirá sentar bases sólidas para diseño y simulación la potencial microrred. En el estudio se han identificado tres tipos de carga: la residencial asociada a departamentos, la comercial asociada a los locales comerciales en planta baja y la comunitaria en la cual se han incluido cargas comunes y de mantenimiento general.

Para el cálculo de demanda del condominio se ha levantado una lista inicial de cargas eléctricas, con sus datos de potencia en Watts, se ha revisado los patrones de consumo en las planillas y entrevistado al administrador del condominio con el fin de establecer criterios que aporten a la investigación. Una vez levantados los datos se han aplicado factores de utilización y coincidencia para calcular la energía consumida diaria y mensual de cada carga de acuerdo con (1) y (2).

$$Dd = \sum_{i=1}^{24} P_c f_c f_u \quad (1)$$

$$Dm = \sum_{i=1}^{24} Dd \quad (2)$$

Donde:

Dd demanda diaria

Dm demanda mensual

P_c potencia de carga [kW]

f_c factor de coincidencia

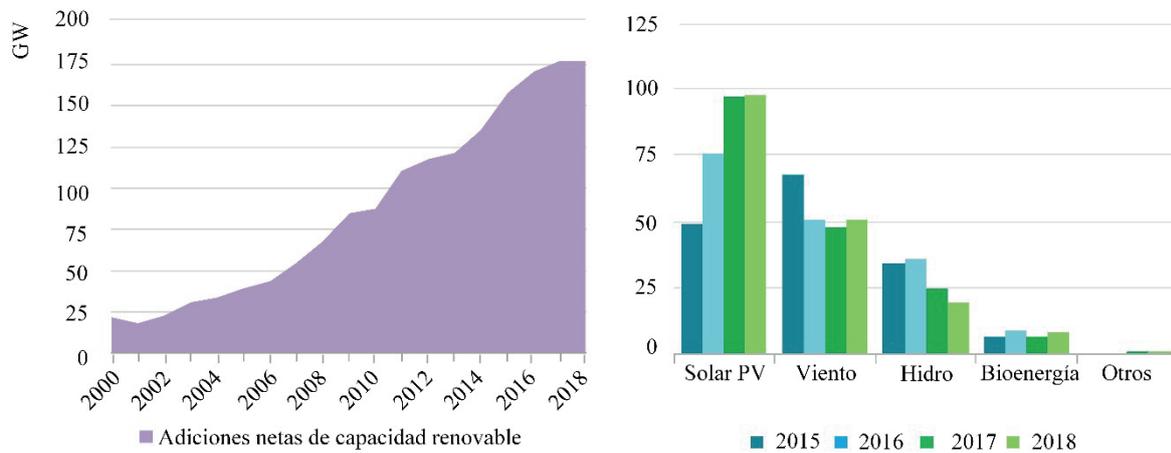
f_u factor de utilización

Una vez obtenidos los consumos individuales se consolidan los consumos por tipo de carga a nivel diario y mensual.

2.3.2. ANÁLISIS DE RECURSOS RENOVABLES Y NO RENOVABLES EN LA ZONA

A nivel mundial, la capacidad total de electricidad renovable aumentó en 178 GW en 2018 (IEA, 2019), como se muestra en la Figura 3; esto obedece claramente a la necesidad de cambio de las matrices energéticas y a los recursos naturales con los que se cuentan en las zonas de aplicación.

Figura 3. Capacidad neta anual por tecnología GW



Nota: Tomado de (IEA, 2019).

Al depender directamente de los recursos naturales disponibles en la zona, existen diversidad de arquitecturas y criterios aplicables en la generación de energía eléctrica renovable, sin embargo, las más comunes en aplicaciones residenciales y comerciales son eólico y solar, por lo cual en esta investigación se analizan los recursos de la zona del caso de estudio mediante el *software* Homer Pro para obtener datos fiables de los recursos viento y radiación solar mediante coordenadas de latitud y longitud.

2.3.3. DISEÑO DE ARQUITECTURA DE LA MICRORRED

Para las diferentes arquitecturas se han empleado elementos como paneles solares, grupos electrógenos, baterías, inversores, entre otros. A continuación, se describen los elementos empleados, así como las ecuaciones que los caracteriza dentro del diseño de la microrred.

Paneles solares: el principal recurso renovable de la microrred propuesta son los paneles fotovoltaicos, que han sido incorporados debido al recurso disponible en la zona de estudio y las bondades de instalación en el condominio.

La potencia para el dimensionamiento del panel solar se realiza en función de la radiación y la temperatura presente en el sector dado. En la ecuación (3) se detalla la potencia del sistema fotovoltaico. Si en esa ecuación no se elige no modelar el efecto de la temperatura en la matriz PV, Homer Pro (Homer Energy, 2019), se asume que el coeficiente de potencia de temperatura es cero, por lo que la ecuación anterior se simplifica en (4):

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\overline{G}_T}{\overline{G}_{T,STC}} \right) \left[1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC}) \right] \quad (3)$$

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\overline{G}_T}{\overline{G}_{T,STC}} \right) \quad (4)$$

Donde:

Y_{PV} capacidad nominal de la matriz FV, es decir, su potencia de salida en condiciones de prueba [kW]

f_{PV} el factor de reducción de PV [%]

\bar{G}_T radiación solar incidente en el campo FV en el paso de tiempo actual [kW/m^2]

$\bar{G}_{T,STC}$ la radiación incidente en condiciones de prueba estándar [kW/m^2]

α_P el coeficiente de temperatura de potencia [%/°C]

T_c la temperatura de la celda PV en el paso de tiempo actual [°C]

$T_{c,STC}$ la temperatura de la celda PV en condiciones de prueba estándar [25°C]

Grupo electrógeno: dada la baja inercia que presentan las microrredes en contraste a la generación convencional (Guacaneme et al., 2014), se incluye un grupo electrógeno en base a diésel que permita compensar la inercia y, por lo tanto, controlar frecuencia del sistema, así como compensar necesidad de generación en períodos de escasa producción fotovoltaica y/o baterías.

Baterías: uno de los factores importantes de una batería son sus curvas características que definen en cierta forma el tipo de servicio que se brindará en la aplicación (Trujillo Sandoval & Torres García, 2020). En el caso del diseño de la microrred son necesarias puesto que se necesita almacenar la energía que se genera durante el día en los paneles fotovoltaicos con el fin de que sea usada en los períodos de escasa o casi nula radiación, por ejemplo, en la noche y madrugada. Las baterías utilizadas son de ion-litio.

Las variables de entrada para el dimensionamiento de las baterías dado en (Homer Energy, 2019) son el cálculo de potencia máxima de carga de la batería, donde (5) proporciona la cantidad máxima de energía que puede ser absorbida por el sistema; la segunda limitación se refiere a la tasa de carga máxima del componente de almacenamiento, su potencia de carga de almacenamiento correspondiente a esta velocidad de carga máxima viene dada por la siguiente ecuación (6), y la tercera limitación (7) se refiere a la corriente de carga máxima del componente de almacenamiento. Homer Pro establece la potencia máxima de carga de almacenamiento igual al menor de estos tres valores, suponiendo que cada uno se aplica después de las pérdidas de carga, por lo tanto, se lo modela en la ecuación (8).

$$P_{\text{batt,cmax,kbm}} = \frac{KQ_1 e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (5)$$

$$P_{\text{batt,cmax,mcr}} = \frac{(1 - e^{\alpha_c \Delta t})(Q_{\text{max}} - Q)}{\Delta t} \quad (6)$$

$$P_{batt,cmax,mcc} = \frac{N_{batt} I_{max} V_{nom}}{1000} \quad (7)$$

$$P_{batt,cmax} = \frac{\text{MIN}(P_{batt,cmax,xbm}, P_{batt,cmax,mcr}, P_{batt,cmax,mcc})}{\eta_{batt,c}} \quad (8)$$

Donde:

Q_1 la energía disponible [kWh] en el almacenamiento al comienzo del paso del tiempo

Q la cantidad total de energía [kWh] en el almacenamiento al comienzo del paso del tiempo

C la relación de capacidad de almacenamiento

K la tasa de almacenamiento constante [$k - 1$]

Δt la duración del paso de tiempo [h]

α_c es la tasa de carga máxima del almacenamiento [A/Ah]

Q_{max} es la capacidad total del banco de almacenamiento

N_{batt} la cantidad de baterías en el banco de almacenamiento

I_{max} la corriente de carga máxima del almacenamiento [A]

V_{nom} la tensión nominal del almacenamiento [V]

$\eta_{batt,c}$ eficiencia de la carga de almacenamiento

De acuerdo con el método presentado por Homer Energy (2019) en (9) se establece la potencia máxima de descarga variando de un paso de tiempo a otro según su estado de carga y su historial reciente de carga/descarga que proporciona la cantidad máxima de energía que el banco de almacenamiento puede descargar durante un periodo de tiempo específico. Homer Pro asume que las pérdidas de descarga ocurren después de que la energía abandona el sistema, por lo tanto, la siguiente ecuación (10) proporciona la potencia de descarga máxima del banco de almacenamiento.

$$P_{batt,cmax,kbm} = \frac{-kcQ_{max} + KQ_1 e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (9)$$

$$P_{batt,dmax} = \eta_{batt,d} P_{batt,dmax,kbm} \quad (10)$$

Donde:

$\eta_{batt,d}$ eficiencia de la descarga de almacenamiento

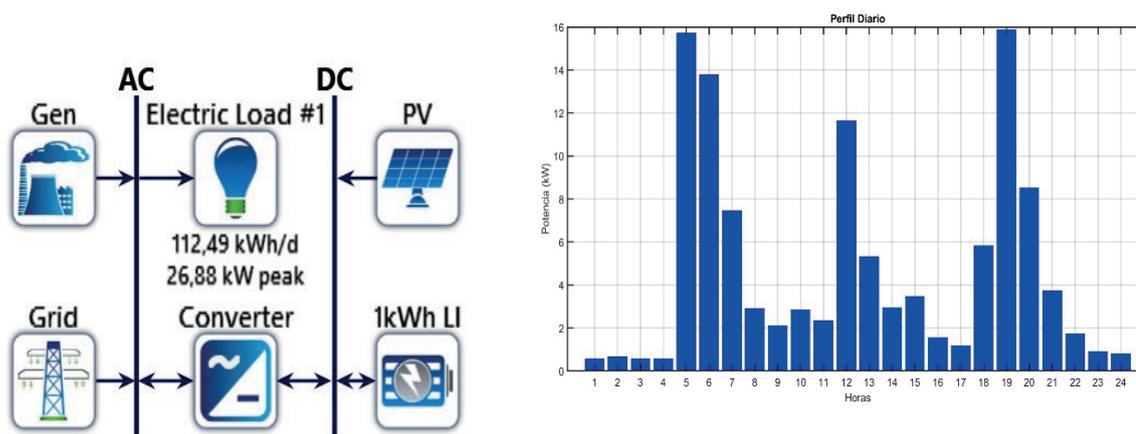
Inversor DC/AC: utilizado en el proyecto para convertir la energía de paneles solares y de baterías, y poder conectar al tablero de distribución principal que alimenta a sus respectivas ramificaciones.

El convertidor es un dispositivo que convierte la energía eléctrica de CC a CA en un proceso llamado inversión, y de CA a CC en un proceso llamado rectificación. El tamaño del convertidor, que es una variable de decisión, se refiere a la capacidad del inversor, es decir, la cantidad máxima de energía de CA que el dispositivo puede producir al invertir la energía de CC (Homer Energy, 2019).

2.3.4. SIMULACIÓN DE LA MICRORRED EN HOMER PRO

Para simular los diferentes escenarios, se ha utilizado el *software* especializado Homer Pro. La microrred general y demandas eléctricas planteadas se muestran en la Figura 4. Cabe señalar que para cada arquitectura se ha modificado el ingreso o egreso del grupo electrógeno y de la red como se podrá analizar en secciones posteriores.

Figura 4. Arquitectura del modelo de la microrred



En las tablas 1 y 2 se muestran los valores ingresados en Homer Pro para cada elemento de la microrred, los cuales son la base para la simulación de escenarios. Cabe señalar que estos valores son referenciales al mercado de la zona de estudio y al año 2020.

Tabla 1. Datos de ingreso del caso de estudio

Elemento	Capital (\$/kW)	Costo de reemplazo (\$/kW)	Costo de O&M (\$/año)	Vida útil (años)
PV	700	700	10	25
Baterías	469	450	10	10
Convertidor	250	250	0	10

Tabla 2. Datos de ingreso del caso de estudio-GE

Elemento	Capital (\$/kW)	Costo de reemplazo (\$/kW)	Costo de O&M (\$/h-op)	Vida útil (horas)	Precio del combustible (\$/L)
Grupo electrógeno	280	250	0.02	15000	0.9

En los escenarios en los cuales se incluye la red eléctrica el precio de la energía eléctrica ha sido colocado en 0.09 (\$/kWh). En la siguiente sección se establecerán los parámetros de dimensionamiento para los elementos mencionados, así como criterios resultantes de los escenarios planteados.

2.3.5. MODELO ECONÓMICO EN HOMER PRO

La economía juega un papel integral en el proceso de simulación de Homer Pro, en el que opera el sistema para minimizar el costo presente neto total (Rousis et al., 2018; Homer Energy, 2019). Las fuentes renovables tienden a tener altos costos iniciales de capital y bajos costos operativos, mientras que las fuentes convencionales no renovables tienden a tener bajos costos de capital inicial y altos costos operativos. Homer Pro utiliza el costo presente neto total (NPC) para representar el costo del ciclo de vida de un sistema. El NPC total condensa todos los costos e ingresos que ocurren dentro de la vida útil del proyecto en una suma global en dólares de hoy, con futuros flujos de efectivo descontados al presente utilizando la tasa de descuento. Además, entre muchos parámetros, el modelador especifica la tasa de descuento, inflación y la vida útil del proyecto (Homer Energy, 2019).

Todos los costos en Homer Pro son reales, lo que significa que se definen en términos de dólares constantes. Para cada componente del sistema, el modelador especifica el costo de capital inicial, que ocurre en el año cero; el de reemplazo, que ocurre cada vez que el componente necesita reemplazo al final de su vida útil, y el de operación y mantenimiento, que ocurre cada año del proyecto de por vida. El usuario especifica la vida útil de la mayoría de los componentes en años, pero Homer Pro calcula la vida útil de la batería y los generadores (Homer Energy, 2019).

Homer Pro (Homer Energy, 2019) utiliza las siguientes ecuaciones:

$$C_{npc} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, R_{proj})} \quad (11)$$

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (12)$$

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{prim} + E_{def} + E_{grid,sales}} \quad (13)$$

Donde:

C_{NPC} costo presente neto total

i la tasa de interés real anual (la tasa de descuento)

$C_{ann,tot}$ costo total anualizado

R_{proj} tiempo de vida del proyecto

CRF(.) factor de recuperación de capital

N número de años

COE el costo nivelado de energía

E_{prim} cantidades totales de carga por año

E_{def} cantidades de carga diferible por año

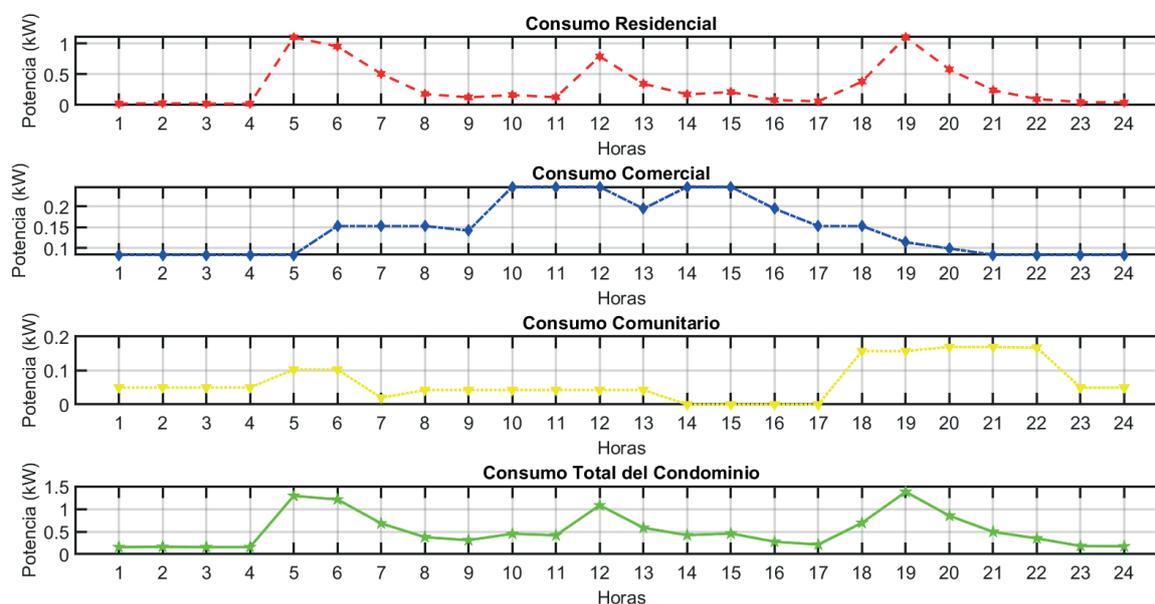
$E_{grid,sales}$ cantidad de energía vendida por año

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del perfil de demanda de energía

Con el procedimiento descrito en la sección 2.3.1, se obtienen las curvas diarias de demanda de energía resultantes del condominio, como se observa en la Figura 5, en las que se diferencia el tipo de consumo y se logra el primer insumo para la simulación del sistema en Homer Pro.

Figura 5. Curvas del consumo del condominio



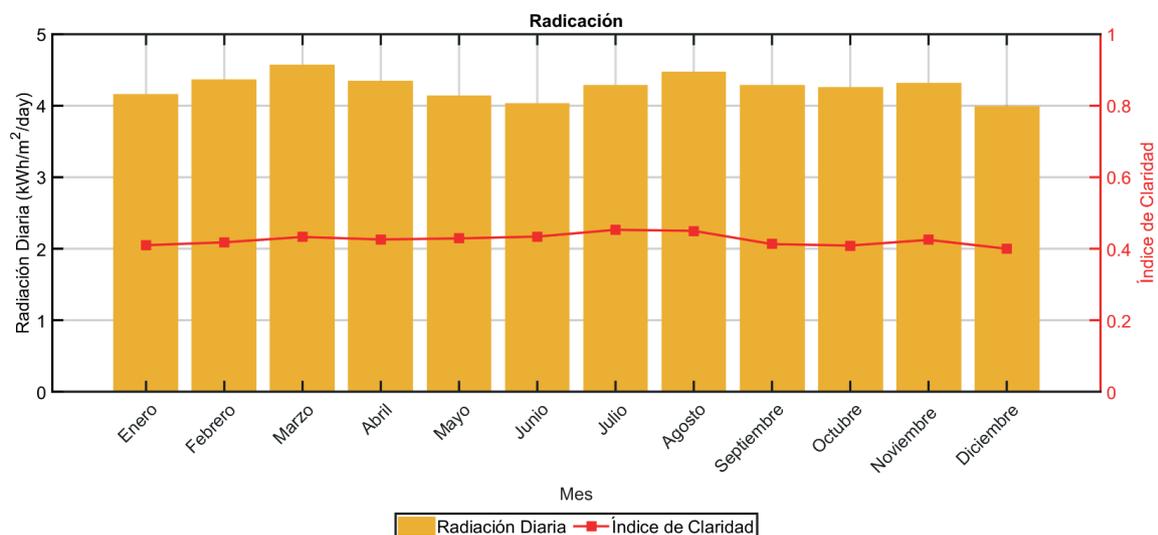
En la tabla 3 se desglosan los valores de demanda de energía diaria y mensual para el consumo individual y del condominio en general con el fin de agregar valor el momento de su aplicación y toma de decisión para el diseño de la microrred eléctrica en secciones posteriores.

Tabla 3. Consumos de energía

	Consumo de energía eléctrica			
	Individual		Condominio	
Carga	kWh/día	kWh/Mes	kWh/día	kWh/Mes
Residencial	7.42	222.61	103.88	3116.53
Comercial	3.50	105.00	7.00	210.00
Comunitario	-	-	1.60	48.06
Total	10.92	327.61	112.49	3374.59

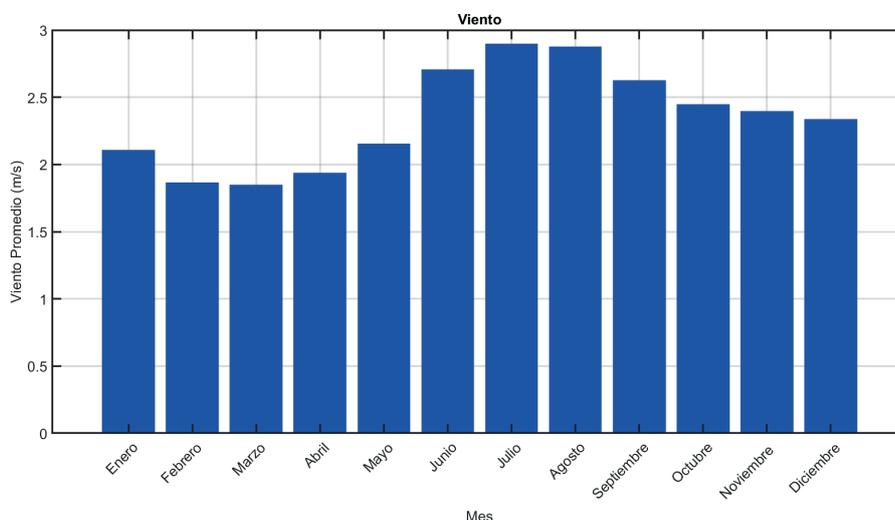
3.2. Análisis de recursos renovables y no renovables en la zona

En esta sección se analizan los recursos naturales velocidad del viento y radiación solar disponibles en la zona de estudio, a través del *software* especializado Homer Pro con coordenadas de latitud y longitud para recopilar los datos deseados. En la Figura 6 se puede ver el recurso de radiación solar con el que se cuenta en la zona de estudio, lo que resulta adecuado pues representa un valor superior a 4 (kWh/m²/día) que en posteriores secciones podrá cubrir una parte importante del consumo diario de los departamentos y/o del condominio en general.

Figura 6. Radiación e índice de claridad en las coordenadas de la zona estudio

En la Figura 7 se observan los valores del recurso viento tomados de Homer Pro, los cuales tienen una media anual de 2.34 (m/s), lo que refleja que, para este estudio, no son valores adecuados, pues se estima que para proyectos eólicos se debe contar con valores superiores a 3 a 4 (m/s) (EOLICCAT, 2020). Por este motivo, se descarta el uso de aerogeneradores en la zona y se diseña la microrred con energía fotovoltaica, grupos de baterías y un grupo electrógeno con el fin de garantizar la inercia de la microrred y una respuesta de frecuencia debido a las variaciones de carga.

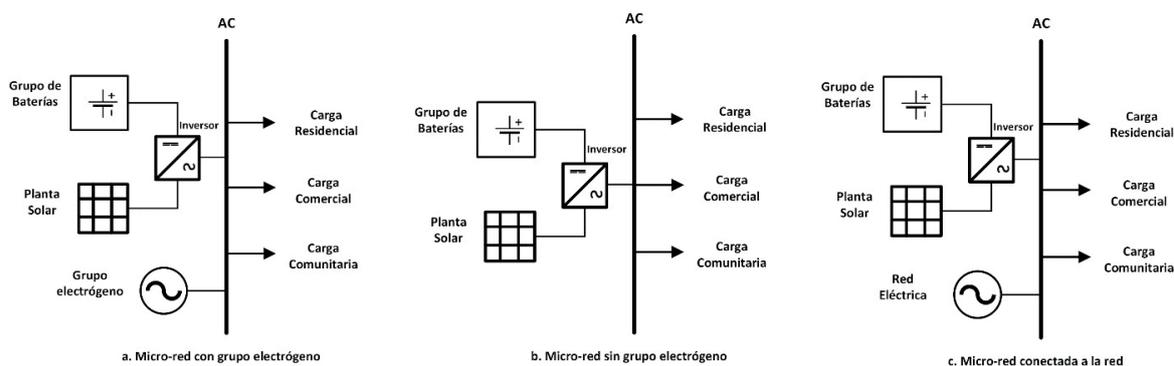
Figura 7. Viento promedio en las coordenadas del caso de estudio



3.3. Diseño de la arquitectura de la microrred

Con base en los datos obtenidos de demanda de energía eléctrica del condominio y condiciones de radiación solar y viento de la zona, se diseña la microrred aislada con paneles solares, grupo de baterías y un grupo electrógeno como elementos de generación que incluyen los tres tipos de cargas con las cuales cuenta el condominio. Cabe señalar que también se diseña una posible microrred aislada sin grupo electrógeno para analizar la falta de inercia e incremento de costos que conllevaría esta arquitectura. Como caso especial, se analizará la conexión de la microrred con la red eléctrica principal en la sección de simulación para establecer competencia en cuanto a costos de energía e implementación de la microrred. En la Figura 8 se pueden observar los diagramas de las tres configuraciones diseñadas para el estudio.

Figura 8. Diagrama de las configuraciones de la microrred



Como se menciona anteriormente, se han modelado tres arquitecturas: aislada con grupo electrógeno, aislada sin grupo electrógeno y conectada a la red eléctrica, por lo tanto, se obtienen los resultados presentados en las siguientes secciones.

3.4. Microrred aislada

Estas dos primeras arquitecturas se desagregan en 4 escenarios, debido a que cada diseño de la microrred se analiza en su mejor y peor condición. Cabe resaltar que todos los elementos se han parametrizado para correr el optimizador de Homer Pro, ninguno ha sido forzado mediante valores o escalas fijas. En la tabla 4 se pueden obtener los valores finales para los diferentes elementos de la microrred planteada.

De acuerdo con la simulación, los valores óptimos de dimensionamiento para la planta fotovoltaica y baterías superan el 50 % del total requerido por la microrred en cuanto a potencia instalada en la arquitectura 1, y son el 100 % en la arquitectura 2, en cuanto a despacho. En la tabla 5 se puede observar que los diferentes escenarios muestran desde el 24 % hasta el 100 % de participación de energía renovable garantizando un valor significativo en la penetración de este tipo de energía en el sistema.

Tabla 4. Arquitectura de los casos de estudio

	Escenarios	Arquitectura 1		Arquitectura 2	
		1	2	3	4
Elementos utilizados	PV				
	GEN				
	Grupo de baterías				
	Convertidor				
Dimensionamiento de elementos de la microrred	PV (kW)	15	113	173	339
	Gen(kW)	30	30		
	Baterías Li-Ion (kW)	32	141	193	423
	Convertidor(kW)	13.6	13.7	73.9	123

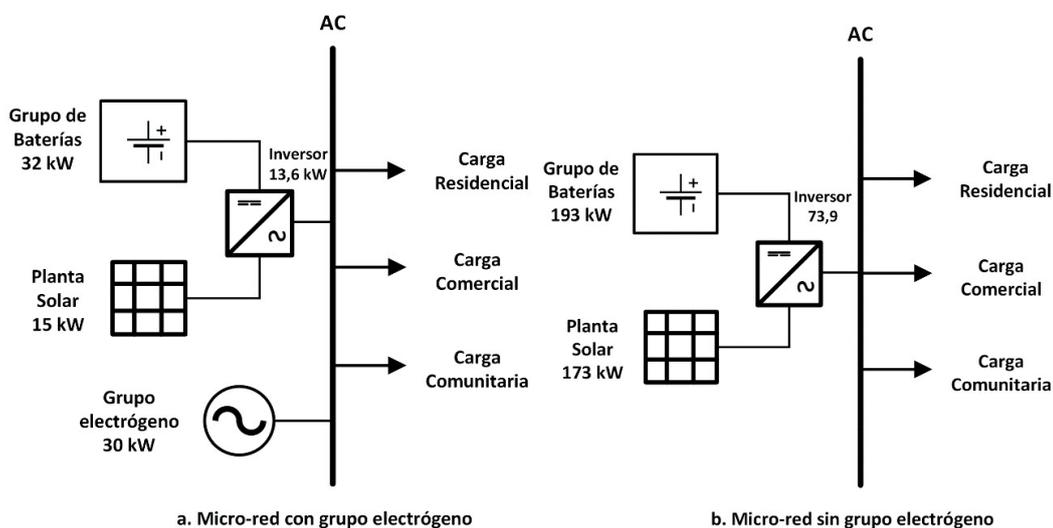
Tabla 5. Escenarios de los casos de estudio

	Escenarios	1	2	3	4
Componentes	PV				
	GEN				
	Grupo de baterías				
	Convertidor				
Costo	NPC (\$)	\$183.52	\$319.69	\$406.16	\$824.71
	COE (\$)	\$0.38	\$0.67	\$0.85	\$1.72
	Costo de operación (\$)	\$12.51	\$13.92	\$15.06	\$30.65
	Capital inicial (\$/año)	\$37.32	\$157.05	\$230.20	\$466.44
Sistema	Fracción renovable (%)	24	80.6	100	100
	Total fuel (L/año)	9.697	3.614	0	0

Como se puede ver en las dos arquitecturas, el incremento de producción de energía fotovoltaica en los sistemas incrementa el costo de la energía, el costo presente neto, el costo de operación y el capital inicial. Asimismo, es necesario señalar que la arquitectura 1, la cual contiene el grupo electrógeno, resulta mejor en cuanto a costos y a viabilidad dado el aporte del inercia al sistema, y tomando en cuenta que en la actualidad el valor del combustible resulta muy competitivo frente a las energías renovables; sin embargo, en un futuro, la escases del recurso conllevará a un cambio paulatino de este escenario, así como la afectación al medio ambiente.

En la Figura 9 se muestra la arquitectura final para la potencial microrred en la zona con los valores de dimensionamiento de los diferentes elementos.

Figura 9. Diseño de la potencial microrred



3.5. Microrred interconectada

Con el fin de analizar el estado actual de competencia de una microrred vs la red eléctrica convencional con valores económicos reales en la zona, se simula ese escenario en Homer Pro. Al hacer la simulación debido al precio de 0.09 (\$/kWh) de la energía de la red los escenarios óptimos son con 100 % de producción de la red eléctrica, pero se debe recordar que Homer Pro ofrece varias alternativas de arquitectura, por lo cual se ha escogido una arquitectura que contemple paneles solares y baterías, y analizado los escenarios de mínimo y máximo aporte de los paneles. En la tabla 6 se presentan los valores resultado de la simulación.

Tabla 6. Microrred interconectada

Escenarios		1	2
Componentes	PV		
	Grupo de baterías		
	Red		
	Convertidor		
Arquitectura	PV (kW)	0.778	113
	Baterías	1	141
	Red	999.999	999.999
	Convertidor(kW)	0.0722	13.7
Costo	NPC (\$)	\$44.74	\$271.91
	COE (\$)	\$0.09	\$0.32
	Costo de operación (\$)	\$3.74	\$10.55
	Capital inicial (\$/año)	\$1.03	\$148.65
Sistema	Fracción renovable (%)	0.651	65.4

Se puede ver que el dimensionamiento de elementos del escenario óptimo en esta arquitectura restringe la potencia instalada de paneles solares a menos del 1 %, y el costo de la energía básicamente es marcado por la red eléctrica. Al revisar el escenario con alta penetración de energía solar en esta arquitectura, se encuentran costos excediendo el triple del costo de energía de la red y costos presentes netos que permiten concluir la no factibilidad actual de este tipo de microrredes frente a la red desde la perspectiva económica. No obstante, se debe recordar que las microrredes serán una valiosa alternativa en décadas futuras cuando se incrementen los precios del combustible y que, debido a su generación renovable, serán el futuro que permita recuperar y sostener el medio ambiente mundial.

4. Conclusiones y recomendaciones

La demanda de energía de un condominio consta de cargas de diferente naturaleza residencial, comercial y comunitaria, por este motivo, la cuantificación tanto en potencia como en el horario de uso y factores de coincidencia y utilización deben ser tratados de forma independiente para lograr una curva de perfil de demanda adecuada.

En el análisis de recursos naturales de la zona de estudio se identificó que la radiación solar promedio está por sobre los 4 (kWh/m²/día), lo cual es adecuado para el aporte de energía solar de este proyecto. En el caso del viento, se observó que las velocidades del este son menores a 4 (m/s), por lo cual por las características mecánicas de los aerogeneradores no se cuenta con factibilidad para aplicar este recurso en el proyecto de microrred. Cabe señalar que el análisis de recursos naturales para aplicación en microrredes es independiente en cada zona, pues contempla variables de diferente naturaleza.

Al diseñar y simular la microrred aislada se determinó que el modelo con grupo electrógeno resulta mejor en todos los costos asociados, además, en la perspectiva técnica se cuenta con aporte de inercia a la microrred; sin embargo, al ser fuente de generación no renovable impacta en el ambiente por la emisión de gases. Dentro de la configuración aislada, al simular sin el grupo electrógeno se evidencia el incremento de los costos de energía en un 121.3 %; costo presente neto en 123.7 %; de operación en 20.4 %, y capital inicial 516.8 %. Estos incrementos obedecen al total aporte de energía renovable al 100 %. En la simulación de la microrred interconectada con la red eléctrica se puede ver la no factibilidad de esta desde el punto de vista económico, pues la optimización de Homer Pro siempre prioriza a la red por su bajo costo (0.09 \$/kWh) frente a las energías renovables en la actualidad de la zona de estudio, por tal motivo, el aporte de energía renovable es menor al 1 % en el sistema.

Referencias

- Amrr, S. M., Alam, M. S., Asghar, M. S. J., & Ahmad, F. (2018). Low cost residential microgrid system based home to grid (H2G) back up power management. *Sustainable Cities and Society*, 36(January), 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.016>
- Beltrán-Telles, A., Morera-Hernández, M., López-Monteagudo, F. E., & Villela-Varela, R. (2017). Prospectiva de las energías eólica y solar fotovoltaica en la producción de energía eléctrica. *CienciaUAT*, 11(2), 105. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v11i2.742>
- Delboni, L. F. N., Marujo, D., Balestrassi, P. P., & Oliveira, D. Q. (2018). Electrical Power Systems: Evolution from Traditional Configuration to Distributed Generation and Microgrids. En Zambroni de Sou-

- za A., & Castilla, M (Eds.), *Microgrids Design and Implementation* (1-25). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6_1
- EOLICCAT. (2020). *Preguntas frecuentes*. <http://eoliccat.net/preguntas-frecuentes/?lang=es>
- Gómez, V. A., Hernández, C., & Rivas, E. (2018). La influencia de los niveles de penetración de la generación distribuida en los mercados energéticos. *Información Tecnológica*, 29(1), 117–128. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000100013>
- Guacaneme, J. A., Velasco, D., & Trujillo, C. L. (2014). Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes. *Información Tecnológica*, 25(2), 175–188. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000200020>
- Guacaneme, W., Rodríguez, A. F., Gómez, L. M., Santamaría, F., & Trujillo, C. (2018). Desarrollo de un prototipo de micro-red residencial a baja escala. *Tecnológicas*, 21(43), 107–125. <https://doi.org/10.22430/22565337.1065>
- Homer Energy. (2019). *HOMER PRO: Manual Homer Energy*, 1–241. <http://www.homerenergy.com/pdf/HOMERHelpManual.pdf>
- International Energy Agency. (2019). *Renewables 2019 Analysis and forecast to 2024 Explore: Renewables 2019*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-capacity-growth-by-country-region-2018-2024>
- Khaligh, A., & Li, Z. (2010). Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(6), 2806–2814. <https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2047877>
- Lata-García, J., Reyes-Lopez, C., Jurado, F., Fernández-Ramírez, L. M., & Sanchez, H. (2017, October 18–20). *Sizing Optimization of A Small Hydro/Photovoltaic Hybrid System for Electricity Generation in Santay Island, Ecuador By Two Methods*. [Proceedings], 1–6. 2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2017, Pucon, Chile. <https://doi.org/10.1109/CHILECON.2017.8229539>
- Manoj Kumar, N., Chopra, S. S., Chand, A. A., Elavarasan, R. M., & Shafiullah, G. M. (2020). Hybrid Renewable Energy Microgrid for A Residential Community: A Techno-Economic and Environmental Perspective in The Context Of The SDG7. *Sustainability*, 12(10), 1–30. <https://doi.org/10.3390/SU12103944>
- Mosquera, F. (2020). Localización óptima de plantas virtuales de generación en sistemas eléctricos de potencia basados en flujos óptimos de potencia. *Revista de I+D Tecnológico*, 16(2), s. p. <https://doi.org/10.33412/idt.v16.2.2827>
- Pascual, J., Martín, I. S., Ursúa, A., Sanchis, P., & Marroyo, L. (2013, September, 15–19). *Implementation and Control of A Residential Microgrid Based on Renewable Energy Sources, Hybrid Storage Systems and Thermal Controllable Loads*, 2304–2309. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2013, Denver, CO, Estados Unidos. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2013.6646995>
- Pascual, J., Sanchis, P., & Marroyo, L. (2014). Implementation and Control of A Residential Electrothermal Microgrid Based on Renewable Energies, A Hybrid Storage System and Demand Side Management. *Energies*, 7(1), 210–237. <https://doi.org/10.3390/en7010210>
- Recalde, M. Y., Bouille, D. H., & Girardin, L. O. (2015). Limitaciones para el desarrollo de energías renovables en Argentina. *Problemas del Desarrollo*, 46(183), 89–115. <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2015.10.005>
- Rodriguez-Diaz, E., Palacios-Garcia, E. J., Anvari-Moghaddam, A., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2017, June 27–29). *Real-time Energy Management System for a hybrid AC/DC residential microgrid*, 256–261. 2017 IEEE 2nd International Conference on Direct Current Microgrids, ICDCM 2017, Nuremburg. <https://doi.org/10.1109/ICDCM.2017.8001053>
- Rousis, A. O., Tzelepis, D., Konstantelos, I., Booth, C., & Strbac, G. (2018). Design of A Hybrid AC/DC Microgrid Using Homer Pro: Case Study on An Islanded Residential Application. *Inventions*, 3(3), 1–14. <https://doi.org/10.3390/inventions3030055>

- Sivasasu, S. R., Chandira Sekaran, E., & Karthik, P. (2015). Development of Renewable Energy Based Microgrid Project Implementations for Residential Consumers in India: Scope, Challenges and Possibilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 256–269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.118>
- Suresh, V., Muralidhar, M., & Kiranmayi, R. (2020). Modelling and Optimization of An Off-Grid Hybrid Renewable Energy System for Electrification in A Rural Areas. *Energy Reports*, 6, 594–604. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.01.013>
- Trujillo Sandoval, D. J., & Torres García, M. E. (2020). Respuesta de demanda de energía por introducción de vehículos eléctricos: Estado del arte [Response of Demand for Energy by Electric Vehicles Introduction: State of the Art]. *Revista de I+D Tecnológico*, 16(1), s. p. <https://doi.org/10.33412/idt.v16.1.2433>
- Umbarila Valencia, L. P., Alfonso Moreno, F. L., & Rivera Rodríguez, J. C. (2015). Importancia de las energías renovables en la seguridad energética y su relación con el crecimiento económico. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 231. <https://doi.org/10.22490/21456453.1419>
- Yousaf, A., Khan, B. A., Bashir, U., & Ahmad, F. (2019, April 16–17). Overview of Implementing Microgrid, Its Policies, Incentives and Challenges in Pakistan. [Proceedings], 6–11. *2019 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ICEEE 2019*, Instabul, Turkey. <https://doi.org/10.1109/ICEEE2019.2019.00009>

Ensayos experimentales y análisis numérico de la estructura del material compuesto alternativo para la reparación de superficies de vuelo en aeronaves

(Experimental tests and numerical analysis of the structure of the alternative composite material for the repair of flight surfaces in aircraft)

César Arroba Arroba¹, Manuel Telenchana Flores², Juan Paredes Salinas³, Salomón Fiallo Ortega⁴ y Henry Vaca Ortega⁵

Resumen

En la actualidad, los materiales compuestos de matriz polimérica son utilizados en múltiples aplicaciones, una de las áreas más importantes de aplicación es en el sector aeronáutico, debido a la relativamente baja densidad que tienen los materiales combinados. Estos compuestos tienen buenas propiedades mecánicas, comparables con materiales metálicos, pero que aportan beneficios adicionales. El objetivo de este trabajo es hacer los ensayos experimentales y el análisis numérico de la estructura del material compuesto alternativo para emplearlos en la reparación de las superficies de vuelo de aeronaves del CIDFAE. Se manejó un proceso ampliamente extendido de envasado al vacío (vacuum bagging) para obtener un compuesto más homogéneo, lo que redujo los defectos en el procesamiento, y controló mejor la fracción de las fibras y el espesor global del compuesto. Se elaboraron probetas de resina epóxica reforzada con capas de tejido plano de tres fibras distintas de: carbono, vidrio y aramida, en diferentes orientaciones, que fueron ensayadas a tracción, flexión e impacto para determinar sus propiedades mecánicas. Se ha demostrado que los resultados conseguidos mediante la metodología analítica y el método de elementos finitos son aproximados a los resultados que se obtienen con ensayos destructivos. Los resultados experimentales muestran que los valores de resistencia a la tracción son mayores en los materiales de resina epóxica reforzados con 4 capas de fibra de carbono en orientación 0°-90°.

Palabras clave

Superficie de vuelo, compuesto, reparación, aeronaves, configuración.

Abstract

Nowadays, polymeric matrix composite materials are used in multiple applications. One of the important areas of application is in the aeronautical sector, due to the relatively low density of the combined materials; these compounds have good mechanical properties, comparable to metallic materials, but providing additional benefits. The objective of this work is to carry out the experimental tests and the numerical analysis of the structure of the alternative composite material to be used to repair of the flight surfaces of CIDFAE aircraft. A widely extended vacuum bagging process was used to obtain a more homogeneous compound, thus reducing defects in processing, better controlling the fiber fraction and the overall thickness of the compound. Specimens of epoxy resin reinforced with layers of flat fabric of three different fibers of: carbon, glass and aramid, in different orientations, were made, which were tested for traction, bending and impact to determine their mechanical properties. It has been shown that the results obtained by analytical methodology and the finite element method are approximate to the results obtained with destructive tests. The experimental results show that the tensile strength values are higher in epoxy resin materials reinforced with 4 layers of carbon fiber in orientation 0° -90°.

Keywords

Flight surface, compound, repair, aircraft, configuration.

- 1 Universidad Técnica de Ambato (UTA), Ambato, Ecuador [ch.arroba@uta.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0001-5656-7549>].
- 2 UTA, Ambato, Ecuador [davidtelenchana@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0337-1099>].
- 3 UTA, Ambato, Ecuador [jgparedes@uta.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0002-3118-9323>].
- 4 Centro de Investigación de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, Quito, Ecuador [sfiallos@fae.mil.ec, <https://orcid.org/0000-0003-0047-2289>].
- 5 UTA, Ambato, Ecuador [whvaca@uta.edu.ec, <https://orcid.org/0000-0003-4321-5864>].

1. Introducción

En la actualidad, las fibras de carbono, las de vidrio y las de Kevlar, consideradas fibras sintéticas de alto rendimiento, se utilizan extensamente en la fabricación de estructuras aeronáuticas; estas fibras sintéticas forman elementos estructurales concretos. No obstante, debido al incremento de la conciencia ecológica, varias investigaciones se han enfocado en emplear compuestos para reparar componentes aeronáuticos, evitando desechar en su totalidad un elemento deteriorado. Las empresas líderes en la fabricación de aviones como Airbus y Boeing investigan sobre el uso de fibras alternativas. Las fibras alternativas tienen propiedades mecánicas similares en combinación con la matriz del compuesto, baja densidad, bajo costo y son capaces de ser empleadas para reemplazar materiales tradicionales (Arockiam et al., 2018).

La utilización de materiales compuestos con refuerzos de fibras ha contribuido en la fabricación de aeronaves, especialmente en las superficies de vuelo. Varias investigaciones proponen considerar materiales alternativos para su uso en aeronaves, estas aeronaves tienen estrictas necesidades de seguridad, por lo que los materiales por emplear se someten a un control estricto (Zhu et al., 2020; Zimmermann & Wang, 2020). Adicional a un proceso de fabricación, es necesario tener alternativas de configuración y fabricación del material para reparar los componentes de las aeronaves.

Un método relativamente reciente de reparación de componentes de aeronaves que presentan agrietamientos o daños es el de reparación con parches de material compuestos (Wang et al., 2019). Este procedimiento promueve una técnica de reparación innovadora que muestra el potencial de las fibras naturales como materiales viables para reparaciones aeronáuticas y hasta aeroespaciales, ya que brindan tanto un ahorro de coste como disminuyen la densidad, en comparación con otras fibras empleadas (Khirul et al., 2018). Además, hay que entender que la capacidad de resistencia de la reparación mejora con la orientación de la fibra a través de un análisis numérico de las capas de fibra en estudio (Jiang et al., 2019).

El método de reparación con parches de material compuesto es empleado por el Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana (CIDFAE) en la reparación de algunas superficies de vuelo que presentan daños. Después de la reparación, existe incertidumbre sobre la resistencia que proporciona en el componente, por esto es necesario conocer cuál es la resistencia que debe proporcionar cada una de las capas que conforman el material compuesto aplicado.

En los últimos años, los polímeros han influido en la tecnología más que cualquier otro material, y su combinación con fibras se asocia con propiedades comparables con materiales metálicos, que son reemplazados por los compuestos en aplicaciones estructurales y funcionales. La mejora de las propiedades de un compuesto, mediante el control de sus componentes individuales, cumple con requisitos que colocan al material compuesto como una alternativa de uso en aplicaciones militares, aeroespaciales, comerciales actuales, entre otras (Siddiquee et al., 2020).

Los materiales compuestos pueden definirse como la combinación a un nivel microscópico de uno o más componentes, que no son solubles entre ellos, de la que se obtiene un nuevo material con propiedades determinadas que dependen del tipo de interfaz y de las características de sus constituyentes (Kar, 2017). Sin embargo, el material compuesto formado muestra propiedades únicas no vistas en los componentes individuales. Este material se forma generalmente de una fase rígida y resistente, denominada refuerzo, que se encuentra embebido en un material continuo denominado matriz, encargado de repartir y transmitir las cargas del refuer-

zo. Una selección cuidadosa tanto de refuerzo como de matriz produce propiedades mecánicas especiales en el compuesto (Kar, 2017; Picu & Ganghoffer, 2020).

Dentro de las diferentes clasificaciones que se puede hacer de los materiales compuestos, quizás, la más significativa sea la que se refiere al tipo de matriz y refuerzo empleado. Además, las propiedades del material compuesto dependen también de cómo el compuesto ha sido fabricado, por lo que se tiene una amplia gama de comportamientos mecánicos por cada estructura particular producida, lo cual diversifica las aplicaciones de uno u otro compuesto (Kar, 2017; Picu & Ganghoffer, 2020). Los materiales, según el tipo de matriz, se pueden clasificar en matriz metálica, cerámica y polimérica. Según el tipo de refuerzo, se pueden clasificar en materiales reforzados con partículas, fibras y refuerzos estructurales (Chawla, 2019; Pero-Sanz Elorz et al., 2019).

Durante la fabricación se emplea un proceso de envasado al vacío (vacuum bagging). Este proceso proporciona un alto refuerzo, una mejor adherencia entre los componentes del compuesto y mayor control del porcentaje de volumen de fibra en comparación con los procesos manuales (Kar, 2017). En el campo de los polímeros ya se ha empleado procesos de moldeo asistidos por vacío en los que se mejora significativamente la concentración del polímero en el proceso (Suzuki et al., 2017). En el procesamiento de materiales compuestos con una base de fibras de carbono, a diferentes disposiciones, se ha conseguido mejoras en las propiedades mecánicas; los porcentajes de mejora catalogados tiene un valor significativo (Muralidhara et al., 2019).

En el proceso de fabricación aplicado en este trabajo, se procura controlar los parámetros de moldeo, con esto se pretende reducir los defectos en el procesamiento de materiales, en especial sobre los compuestos con fibras sintéticas; adicionalmente, se pretende obtener un espesor homogéneo del compuesto y controlar la fracción de volumen de fibra (Bharath et al., in press; Verma et al., 2020). Hay que considerar que dentro del proceso de envasado al vacío hay que tener especial atención a geometrías complejas como esquinas dentro del moldeo del material, la presión es un factor determinante dentro de lo anteriormente mencionado (Levy & Hubert, 2019).

Esta investigación se enfoca en una matriz termoestable reforzada con fibras sintéticas. Dentro de la industria aeronáutica y aeroespacial, se ha estudiado ampliamente el uso de fibras de carbono, a estos compuestos se los denomina plásticos reforzados con fibra de carbono (o por sus siglas en inglés CFRP); adicional a este tipo de materiales, las fibras que también son empleadas extensamente como refuerzo de los materiales compuestos son las fibras de vidrio y las de aramida (Arockiam et al., 2018; Prasad & Wanhill, 2017).

Existen diferentes métodos para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, entre los que se destacan el método experimental, analítico y computacional (Azarafza, 2018; Itou et al., 2017), que ha llevado al desarrollo de herramientas analíticas y computacionales precisas capaces de predecir el comportamiento del material (Boyina et al., 2017). En diversas investigaciones se evalúa el comportamiento de los materiales polímeros reforzados con fibra de carbono; este análisis se hace mediante el método de elementos finitos; además, este estudio se emplea para el análisis de componentes estructurales de aeronaves (Kumar Das & Roy, 2018, March, 22–24).

La simulación numérica computacional del compuesto logra determinar los efectos de la dirección del refuerzo, después del proceso de formación, por lo que se puede utilizar una simulación que se enfoque en la formación de refuerzos tejidos (Liu et al., 2019; Picu & Ganghoffer, 2020). El método analítico utiliza expresiones matemáticas para predecir las constantes elásticas del material compuesto como la rigidez y resistencia (Huang et al., 2020). Los métodos

más utilizados para evaluar las propiedades elásticas de un compuesto es la regla de mezclas (Azarafza, 2018) y la aplicación de la teoría clásica de laminado; estos métodos forman parte del análisis de la micro y macromecánica del compuesto (Krishnadasan et al., 2021).

Los compuestos laminados de fibra se fabrican uniendo dos o más láminas, además, pueden orientarse de tal manera que el componente estructural resultante tenga las características mecánicas deseadas en diferentes direcciones. La dirección influye fuertemente en el comportamiento mecánico del componente que integre el material compuesto en estudio (Picu & Ganghoffer, 2020; Vasiliev et al., 2017).

En un material compuesto reforzado con fibra, la heterogeneidad del material se debe a sus elementos constituyentes, sin embargo, a una escala característica, se puede tener una buena aproximación de sus propiedades, dichas propiedades mecánicas del material compuesto dependen de las componentes de tensión y deformación. Bajo unas condiciones elásticas y lineales en la que el sólido presenta pequeñas deformaciones, se relacionan mediante la ley de Hooke generalizada, debido a que, a escala macroscópica, el material compuesto puede considerarse homogéneo (Altenbach et al., 2018; Chawla, 2019)

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde

σ_{ij} indica el estado tensional del elemento o componente

C_{ijkl} son las constantes elásticas o rigidez

y ϵ_{kl} es la deformación unitaria

La relación deformación-tensión para un material ortotrópico bajo un estado de tensión plana se expresa como la deformación igual a la multiplicación del tensor de flexibilidad multiplicado por el vector de estado tensional:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (2)}$$

Proporcionadas las características geométricas de la lámina, se asume un estado de tensión plana. La relación deformación-tensión para una lámina unidireccional se expresa en términos de matriz de rigidez reducida como:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde $\nu_{21} = \left(\frac{E_2}{E_1}\right) * \nu_{12}$ Ec. (4)

Las láminas unidireccionales poseen direcciones preferentes asociadas a la orientación de la fibra del refuerzo o a la simetría de los planos. Debido a estos sistemas de coordenadas

se utilizan los números 1 y 2, donde la primera dirección coincide con la dirección de la fibra y la segunda es ortogonal. Para definir los ejes globales o ejes del material (x, y, z), si las direcciones de la fibra no coinciden con las coordenadas globales se puede utilizar la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = T_\sigma(\theta) \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde $T_\sigma(\theta)$ se denomina la matriz.

El método de reparación con parches de material compuesto es empleado por el CIDFAE para reparar algunas superficies de vuelo que presentan daños. Después de la reparación, existe incertidumbre sobre la resistencia que proporciona en el componente, por esto es necesario conocer cuál es la resistencia que debe proporcionar cada una de las capas que conforman el material compuesto aplicado.

El objetivo de esta investigación es determinar por separado las propiedades mecánicas del material de cada capa del compuesto utilizado para la reparación de superficies de vuelo, aplicando el método experimental, método analítico y análisis mediante elementos finitos, con el propósito de evaluar cuál es la diferencia entre estos métodos. Además, se espera que estos resultados puedan ser utilizados para diseñar la combinación adecuada del material compuesto que será empleado en las reparaciones de superficies de vuelo en aeronaves.

2. Metodología

Materiales y equipos

En la matriz del compuesto se utilizó resina epoxi de viscosidad media, recomendable para aplicaciones de producción estructural marca Aeropoxy PR2032, combinada con un catalizador PH3660; esta combinación proporciona una humectación excelente de las fibras de vidrio, carbono y aramida utilizadas en presentación de tejido liso. Además, posee aditivos que promueven la adhesión química a las telas hechas con estas fibras.

El refuerzo utilizado fueron las fibras de carbono, vidrio y aramida. Las fibras se presentan en forma de tejido liso. Los materiales y resina fueron proporcionados en el CIDFAE. Las probetas de material compuesto se obtuvieron mediante la estratificación manual combinada con el curado al vacío. El proceso de moldeo se hizo en placa de vidrio de 6 mm de espesor.

Los ensayos de tracción y flexión se realizaron en la máquina universal de 50 KN para materiales poliméricos, cerámicos, compuestos, Metrotec Serie MTE50. La máquina de impacto por caída de dardos para polímeros se utilizó para el ensayo de impacto.

Metodología experimental

En la placa de vidrio de 6 mm se realizó el moldeo abierto para obtener un acabado superficial libre de imperfecciones. Se elaboraron las probetas de material compuesto para ensayos mecánicos de tracción, flexión e impacto, ver Figura 1.

Figura 1. Fabricación de las probetas



Las dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción fueron 250x25x ϵ mm (ASTM D3039/D3039M, 2014), para los de flexión las dimensiones fueron de 160x13x ϵ mm (ASTM D7264/D7264M-07, 2007) y para los de impacto se utilizó la geometría FE de 58 mm de lado (ASTM D5628-96, 1995). El espesor de las probetas está en función del número de capas empleado, para los ensayos de tracción e impacto se utilizó dos capas de fibra sintética, para el de flexión se empleó doce capas por cada fibra sintética.

Tabla 1. Combinaciones del material compuesto para el ensayo de tracción e impacto

Código	Materiales de refuerzo	Combinación		Cantidad de probetas para el ensayo de	
		N.º de Capas	Orientación	Tracción	Impacto
FV 2C 0-90	Fibra de vidrio	2 capas	0°-90°	5	9
FV 2C 45-135			45°-135°	5	9
FV 4C 0-90		4 capas	0°-90°	5	9
FV 4C 45-135			45°-135°	5	9
FC 2C 0-90	Fibra de carbono	2 capas	0°-90°	5	9
FC 2C 45-135			45°-135°	5	9
FC 4C 0-90		4 capas	0°-90°	5	9
FC 4C 45-135			45°-135°	5	9
FA 2C 0-90	Fibra de aramida	2 capas	0°-90°	5	9
FA 2C 45-135			45°-135°	5	9
FA 4C 0-90		4 capas	0°-90°	5	9
FA 4C 45-135			45°-135°	5	9
TOTAL				60	108

El primer paso en la fabricación de las probetas fue el corte de los tejidos de fibra sintética para cada combinación, luego se limpió y aplicó cera en el molde con el fin de facilitar la extracción de las probetas. En la balanza electrónica se pesó la cantidad de masa del refuerzo, y luego se preparó la resina y catalizador con una relación de proporción de 100:27

en peso y de 3 a 1 en volumen. Seguido de esto, se aplicó la resina en los tejidos de fibra, humectando uniformemente la resina sobre todo el tejido. Se colocó la película de liberación (release film) que cumple la función de dejar pasar el aire y el exceso de resina. Sobre esta se colocó la película de desmolde (peel ply) que deja una textura uniforme en la superficie que no está en contacto con el vidrio. Después se coloca la película de respiración (breather) que cumple la función de absorber el exceso de resina y, finalmente, arriba de todo, se coloca la película de envasado al vacío (vacuum bagging film) con una cinta sellante en los extremos para hacer el vacío. La presión de vacío aplicada fue de -18 inHg durante tres horas y se dejó curar por 24 horas en el molde. Transcurrido ese tiempo, se desmoldó el material compuesto, ver figura 1.

Las combinaciones estudiadas en este trabajo se registraron en la tabla 1 para los ensayos de tracción e impacto y en la tabla 2 para los de flexión.

Tabla 2. Combinaciones del material compuesto: ensayo de flexión

Ítem	Combinación			Cantidad de probetas
	Materiales	# Capas	Orientación	Flexión
1	Fibra de vidrio	12 capas	0°-90°	5
2	Fibra de carbono	12 capas	0°-90°	5
3	Fibra de aramida	12 capas	0°-90°	5
TOTAL				15

En el ensayo de tracción se aplicó una carga a una velocidad constante de 5 mm/min hasta la carga máxima y mediante inspección visual se determina el modo de falla (ASTM D3039/D3039M, 2014). El ensayo a flexión se realizó a 1 mm/min de velocidad constante (ASTM D7264/D7264M-07, 2007). En el ensayo de impacto, el dardo se dejó caer a diferentes alturas, iniciando en 200 mm para compuestos reforzados de fibra de carbono, 100 mm para los compuestos de fibra de vidrio y 200 mm para compuestos reforzados con fibra de aramida; la altura varía hasta determinar la altura de ruptura o fractura por impacto (ASTM D5628-96, 1995).

Metodología para el análisis mediante elementos finitos

En el análisis de elementos finitos, hecho en ANSYS LS-Dyna Research, se elaboró una geometría tridimensional de 110x25xe mm que simula la zona de aplicación de carga. El análisis fue estático dentro del rango elástico. El espesor y orientación de fibras se configuraron en el módulo ACP (ANSYS Composite PrepPost) según la configuración utilizada para los ensayos experimentales. Las condiciones de frontera de la probeta, indicadas en la Figura 2, se asignaron de acuerdo con el ensayo experimental, colocando en la parte inferior de la probeta restricciones de todos los grados de libertad, mientras que en la cara de la parte superior se aplicaron cargas hasta llegar a la fluencia.

Figura 2. Condiciones de frontera

B: Static Structural
Static Structural
Time: 1. s

A Force: 2488.5 N
B Fixed Support



Metodología analítica

El cálculo del módulo de elasticidad se elaboró a partir del análisis micro y macromecánico empleando los modelos matemáticos presentados en la introducción. Para el cálculo de las constantes elásticas, se utilizarán las propiedades de la tabla 3. Los valores de las fibras de carbono, fibra de aramida y fibra de vidrio se tomaron de Kar (2017) y, finalmente, para la matriz se tomaron los datos de la ficha técnica de la resina.

Tabla 3. Propiedades elásticas de los constituyentes del material compuesto

Constantes	Fibra de carbono	Fibra de aramida	Fibra de vidrio	Resina epoxi
E_1 (Gpa)	230	133	72	2.89
E_2 (Gpa)	24	7	72	2.89
G_{12} (Gpa)	50	12	27.7	1.07
ν_{12}	0.28	0.38	0.3	0.35

A continuación, se detalla un ejemplo utilizando el método analítico para fibra de carbono de dos capas y orientado a 0° - 90° . Las fracciones volumétricas de la fibra son $\nu_f=0.47$.

El valor de G_m de la matriz se calculó mediante la siguiente ecuación (León & Vásquez, 2010):

$$G_m = \frac{E_m}{2 * (1 + \nu_m)}$$

Se utiliza el subíndice m para propiedades de la matriz y f para propiedades de la fibra; luego, aplicando las ecuaciones de la regla de mezclas se obtiene:

$$E_1 = E_f * \nu_f + E_m * (1 - \nu_f) = 230 * 0.47 + 2.89 * (1 - 0.47) = 109.632 \text{ Gpa}$$

$$E_2 = \frac{E_f * E_m}{E_f * (1 - \nu_f) + E_m * \nu_f} = \frac{230 * 2.89}{230 * (1 - 0.47) + 2.89 * 0.47} = 5.393 \text{ Gpa}$$

$$G_{12} = \frac{G_f * G_m}{G_f * (1 - \nu_f) + G_m * \nu_f} = \frac{50 * 1.07}{50 * (1 - 0.47) + 1.07 * 0.47} = 1.982 \text{ Gpa}$$

$$v_{12} = v_f * V_f + v_m * (1 - V_f) = 0.28 * 0.47 + 0.35 * (1 - 0.47) = 0.317$$

$$v_{21} = \left(\frac{E_2}{E_1}\right) * v_{12} = (5.393/109.632) * 0.317 = 0.015$$

Si el refuerzo de un compuesto es un tejido en el cual se tiene el mismo número de fibras en la dirección de la urdimbre y de la trama es ortotrópico, la rigidez se reduce drásticamente con respecto a la fibra unidireccional, esto se debe a la flexión de la fibra alrededor de otras fibras para producir el tejido. La pérdida de rigidez es de aproximadamente un 37 % (León & Vásquez, 2010).

Para dicha capa, los elementos de la matriz de rigidez se calculan a partir de Vasiliev et al. (2017):

$$Q_{ij}^{tejido} = \frac{1}{2} [(\bar{Q}_{ij})_{\theta} + (\bar{Q}_{ij})_{-\theta}], i, j = 1, 2, 6,$$

Por lo tanto:

$$\bar{Q}_{0^\circ, 90^\circ} = \begin{bmatrix} 110.1766 & 1.7181 & 0 \\ 1.7181 & 5.4198 & 0 \\ 0 & 0 & 1.982 \end{bmatrix}$$

$$\bar{Q}_{tejido} = \frac{1}{2} [(\bar{Q})_{0^\circ} + (\bar{Q})_{90^\circ}] = \begin{bmatrix} 57.7982 & 1.7181 & 0 \\ 1.7181 & 57.7982 & 0 \\ 0 & 0 & 1.982 \end{bmatrix}$$

La matriz de flexibilidad transformada es la inversa de \bar{Q}_{tejido} matriz de rigidez:

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} 0.0173 & -0.0005 & 0 \\ -0.0005 & 0.0173 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5045 \end{bmatrix}$$

Y, finalmente, las constantes elásticas de la lámina son:

$$E_1 = \frac{1}{S_{11}} = 57.7471 \text{ Gpa}; E_2 = \frac{1}{S_{22}} = 57.7471 \text{ Gpa}; G_{12} = \frac{1}{S_{66}} = 1.982 \text{ Gpa}; v_{12} = -S_{12} * E_1 = 0.029$$

3. Resultados

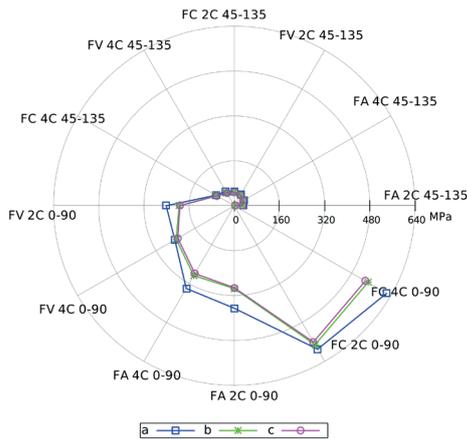
Los valores de tensión se indican en la Figura 3.1 y corresponden a la resistencia máxima obtenida al aplicar el método de elementos finitos, y se representan en la curva a; el método analítico se representa en la curva b, y el método experimental se representa en la curva c. Los valores del módulo de elasticidad en las direcciones se indica en la Figura 3.2 y corresponde a la resistencia máxima al utilizar el método de elementos finitos (curva a), el método analítico (curva b), y el método experimental (curva c). Los valores de la energía del ensayo de impacto se indican en la Figura 3.3, y corresponden a la resistencia máxima utilizando el método elementos finitos (curva a), y el método experimental (curva b).

El material compuesto reforzado con fibra de carbono y cuatro capas presentó una resistencia a la tracción de aproximadamente 623.305 MPa, con un módulo de elasticidad de 80.157 GPa, que son los valores más altos de entre todas las combinaciones analizadas. El ensa-

yo de impacto indica que el material compuesto reforzado con fibra de aramida obtuvo energía de impacto de 1.82 J.

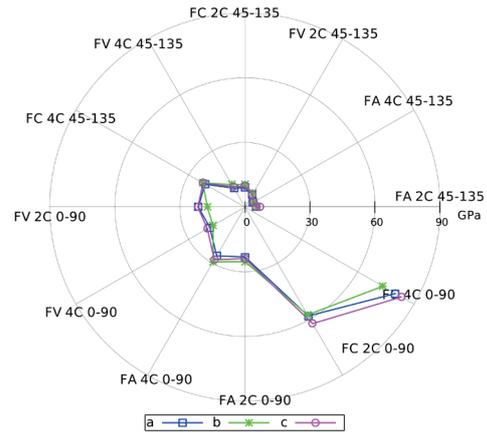
Figura 3. Ensayos realizados según las tres metodologías

3.1. Resistencia Máxima



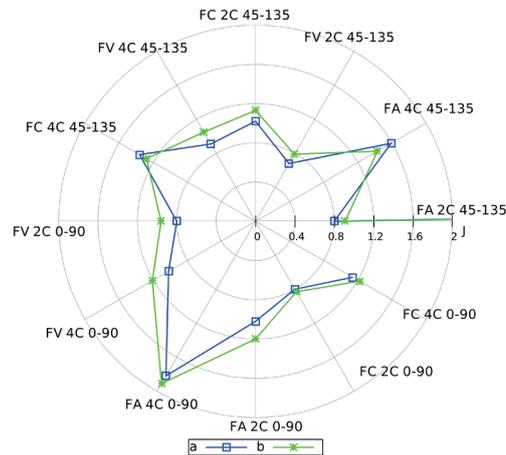
Nota: a. Experimental b. Analítica c. MEF

3.2. Módulo de Elasticidad E



Nota: a. Experimental b. Analítica c. MEF

3.3. Energía de falla

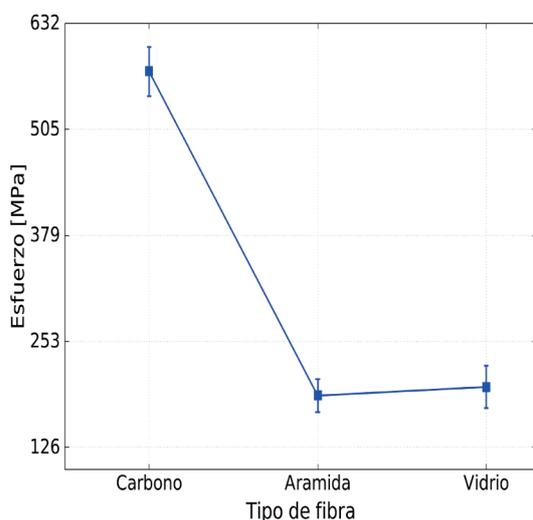


Nota: a. Experimental b. MEF

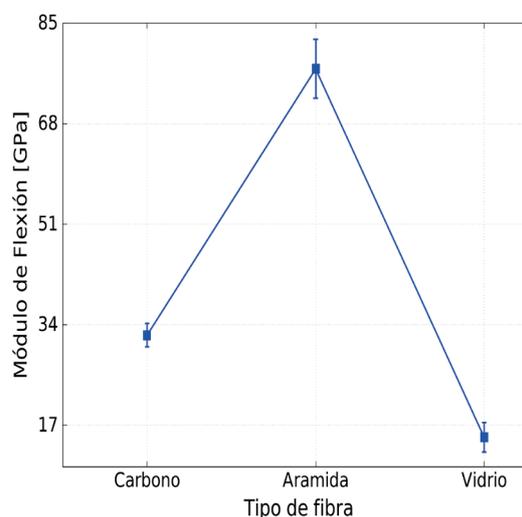
En el ensayo de flexión de las figuras 4.1 y 4.2 se muestra el esfuerzo máximo y el módulo de flexión. El material compuesto reforzado con fibra de carbono obtuvo valores de 574.10 MPa para el esfuerzo y de 32.201 GPa para el módulo de flexión.

Figura 4. Ensayos realizados según las tres metodologías

4.1 Esfuerzo máximo a flexión



4.2 Módulo de flexión

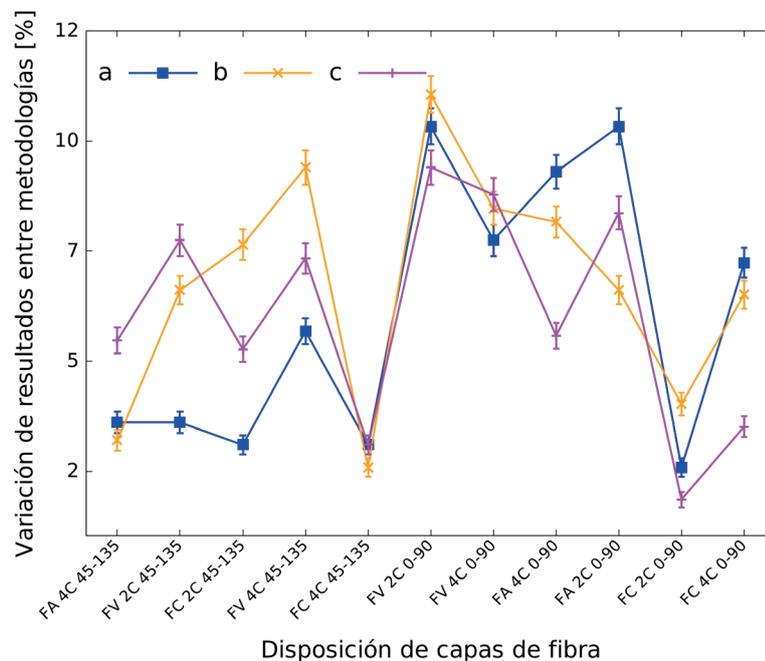


4. Discusión

La Figura 5 proporciona mayor claridad para identificar la diferencia de resultados entre las metodologías aplicadas en la determinación de las propiedades del material. La variación de valores fluctúa entre 2 % y 11 % para una misma propiedad, aplicando diferente metodología, estos resultados indican que las metodologías utilizadas en esta investigación para determinar las propiedades del material están muy cercanas a los resultados experimentales.

La combinación de fibras de carbono en la misma dirección de aplicación de la carga presentó la mejor resistencia a la tensión como se muestra en la figura 4.1. La combinación de fibras a 45° y 135° independientemente del número de capas reduce, de forma considerable, la resistencia última del material, efecto que también se muestra en los valores del módulo de elasticidad respecto al eje y , figura 4.2. Este resultado es importante considerar en el proceso de diseño del material, para ello se debería conocer claramente el estado tensional del elemento o componente y, de acuerdo con este estado, disponer de las direcciones de las diferentes fibras. Esto sirve como guía para la selección adecuada de combinaciones de fibras para la reparación de superficies de vuelo de aeronaves, tomando en cuenta la cantidad de capas de fibra sintética y las disposiciones a diferentes ángulos, para obtener un material con características isotrópicas si el estado tensional, debido a la forma y carga del componente, presenta sollicitación en los tres ejes globales, o para otro casos donde el estado de carga tenga una dirección preferencial se disponga según la función.

Figura 5. Variación de resultados para las diferentes metodologías utilizadas para determinar las propiedades del material compuesto



Nota: a. Esfuerzo máximo b. Módulo de elasticidad c. Energía de falla

La figura 3.3 correspondiente al ensayo de impacto, la combinación de fibras de aramida presentó los mejores resultados. El análisis de todos estos resultados indica que en la preparación de un material adecuado para reparar superficies de vuelo es necesario combinar tejidos de fibra de vidrio, de aramida y de carbono. Cada una de estas fibras contribuye en una característica específica del nuevo material. La fibra de carbono le proporciona una buena resistencia, mientras que la de aramida mejorará la tenacidad, indispensable en eventos de impactos, y la adición de la fibra de vidrio reducirá su costo proporcionará una interfaz volumétrica de resistencia adecuada.

5. Conclusiones y recomendaciones

Los ensayos destructivos son muy importantes en el proceso de caracterización del material, sin embargo, se ha demostrado que a través de la metodología analítica y el método de elementos finitos se obtienen resultados muy aproximados. Existe una variación considerable referente a la resistencia a la tracción cuando se cambia el material de refuerzo, número de capas o la orientación de las fibras; la aplicación final, requerimientos estructurales o estado tensional son lo que determinarán la configuración del material compuesto referente al número de capas y orientación. El proceso de manufactura empleado para obtener materiales compuestos se refleja en los resultados finales obtenidos, así pues, será importante desarrollar estudios donde el proceso de fabricación sea distinto.

El proceso de fabricación de envasado al vacío (vacuum bagging) ofrece mejores parámetros de homogeneidad entre matriz y refuerzo; además, se consigue controlar mejor la fracción entre

las fibras. Con este proceso de fabricación se establece un valor estándar en el espesor del compuesto —que con métodos manuales es difícil de controlar— permitiendo una mejor distribución de esfuerzos en los diferentes puntos de la probeta, lo que ofrece resultados fiables, apegados a la realidad. Esto se relaciona íntimamente con la baja variabilidad existente entre la metodología analítica y el método de elementos finitos con relación a los ensayos destructivos. Se recalca que un parámetro de control riguroso al momento de emplear este proceso es el control de la presión.

Indagar con un análisis de datos de ligue profundamente la relación implícita entre los parámetros de fabricación y los resultados experimentales mediante ensayos destructivos potenciará la perspectiva que se tenga de variar muchas las condiciones de fabricación de manera adecuada, para conseguir un aprovechamiento óptimo del compuesto por fabricar. Adicionalmente, una prueba que cuente con un alto nivel de confianza cuantificable puede ser una alternativa eficaz al momento de optimizar recursos, tanto materiales como investigativos, sabiendo apuntar a un control más preciso de uno u otro factor y descartando los parámetros insignificantes. Una metodología ampliamente empleada cae en el campo de la estadística inferencial por su alto nivel de confianza y su exención aplicada no solo a la industria aeronáutica.

Se recomienda llevar a cabo pruebas de humedad que serán de gran importancia exploratoria en estos materiales compuestos para tener un acercamiento más real a algunas condiciones de trabajo de los elementos en los que se podrían emplear, como la exposición a la intemperie. De la misma forma, las pruebas de inflamabilidad serán fundamentales para obtener datos numéricos frente a posibles accidentes donde se presente fuego. Además, será crucial el estudio de materiales compuestos híbridos que varíen el número de capas y orientación de las fibras a partir de estos refuerzos. Esto permitirá ampliar el campo de conocimiento, ayudará en la selección de materiales y a definir muchas más aplicaciones no solamente dentro de la industria aeronáutica; hay que entender que dentro de esta consideración se toma en cuenta el factor ecológico y la facilidad de contar con un material amigable con el medio ambiente.

Referencias

- Altenbach, H., Altenbach, J., & Kissing, W. (2018). *Mechanics of Composite Structural Elements*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8935-0>
- Arockiam, N. J., Jawaid, M., & Saba, N. (2018). 6. Sustainable Bio Composites for Aircraft Components. In M. Jawaid & M. Thariq (Eds.), *Sustainable Composites for Aerospace Applications* (109–123). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102131-6.00006-2>
- ASTM D3039/D3039M. (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials D3039. *ASTM Standards*, 15, 1–13. <https://www.astm.org/Standards/D3039>
- ASTM D5628-96. (1995). Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass). *ASTM Book of Standards*, 08(October), 1–10. <https://www.astm.org/Standards/D5628>
- ASTM D7264/D7264M-07. (2007). Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. *Annual Book of ASTM Standards*, i, 1–11. <https://www.astm.org/Standards/D7264>
- Azarafza, R. (2018). Fabrication, Experimental Modal Testing, and A Numerical Analysis of Composite Sandwich Structures with a Grid-Stiffened Core. *Mechanics of Composite Materials*, 54(4), 537–544. <https://doi.org/10.1007/s11029-018-9762-4>
- Bharath, D., Sandhya Rani, B., Saritha, V., Irshad Khan, P., & Kumar Chokka, S. (in press). Tensile and Erosion Behaviour of Medium Calcined Alumina Microparticles on GFRP Composites Fabricated with Vacuum Bagging Process. *MaterialsToday: Proceedings*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.166>

- Boyina, G. R. T., Rayavarapu, V. K., & Subba Rao, V. V. (2017). Numerical Modelling and Damage Assessment of Rotary Wing Aircraft Cabin Door Using Continuum Damage Mechanics Model. *Applied Composite Materials*, 24(1), 235–250. <https://doi.org/10.1007/s10443-016-9524-1>
- Chawla, K. K. (2019). *Composite Materials*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28983-6>
- Huang, W., Xie, L., Li, C., Jia, D., Chai, B., Mu, Y., Hou, C., & Dai, W. (2020). An analytical and Experimental Study of T-Shaped Composite Stiffened Panels: Effect of 90° Plies in Stringers on Curing and Buckling Performance. *Applied Composite Materials*, 27(5), 597–618. <https://doi.org/10.1007/s10443-020-09816-4>
- Itou, H., Kimura, M., Chalupcký, V., Ohtsuka, K., Tagami, D., & Takada, A. (Eds.). (2017). *Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications* (Vol. 26). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2633-1>
- Jiang, H., Ren, Y., & Liu, Z. (2019). Thin-Walled Structures Numerical Prediction for Effects of Fiber Orientation on Perforation Resistance Behaviors of Patch-repaired Composite Panel Subjected to Projectile Impact. *Thin Walled Structures*, 144(May), 106325. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106325>
- Kar, K. K. (Ed.). (2017). *Composite Materials*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8>
- Khurul, M., Muda, H., & Mustapha, F. (2018). 9. Composite Patch Repair Using Natural Fiber for Aerospace Applications, Sustainable Composites for Aerospace Applications. In M. Jawaid & M. Thariq (Eds.), *Sustainable Composites for Aerospace Applications* (171–209). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102131-6.00009-8>
- Krishnadasan, C. K., Shanmugam, N. S., Sivasubramonian, B., Nageswara Rao, B., & Suresh, R. (2021). Analytical Studies and Numerical Predictions of Stresses in Shear Joints of Layered Composite Panels for Aerospace Applications. *Composite Structures*, 255, 112927. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112927>
- Kumar Das, S., & Roy, S. (2018, March 22–24). *Finite Element Analysis of Aircraft Wing Using Carbon Fiber Reinforced Polymer and Glass Fiber Reinforced Polymer* [Paper]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 402, 2nd International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME), Kattankulathur, India. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/402/1/012077>
- León, C., & Vásquez, A. (2010). *Diseño y construcción de un soporte de ametralladora para el helicóptero del Ejército ecuatoriano, MI-171, utilizando materiales compuestos laminados* [Tesis de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2342>
- Levy, A., & Hubert, P. (2019). Vacuum-bagged Composite Laminate Forming Processes: Predicting Thickness Deviation in Complex Shapes. *Composites Part A*, 126(August), 105568. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105568>
- Liu, X., He, Y., Qiu, D., & Yu, Z. (2019). Numerical Optimizing and Experimental Evaluation of Stepwise Rapid High-pressure Microwave Curing Carbon Fiber/epoxy Composite Repair Patch. *Composite Structures*, 111529. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111529>
- Muralidhara, B., Babu, S. P. K., & Suresha, B. (2019). Materials Today: Proceedings Utilizing Vacuum Bagging Process to Prepare Carbon Fiber/epoxy Composites with Improved Mechanical Properties. *Materials Today: Proceedings*, 27(3), 2022–2028. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.051>
- Pero-Sanz Elorz, J. A., Fernández González, D., & Verdeja, L. F. (2019). *Structural Materials: Properties and Selection*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26161-0>
- Picu, C., & Ganghoffer, J.-F. (Eds.). (2020). *Mechanics of Fibrous Materials and Applications: Physical and Modeling Aspects* (Vol. 596). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23846-9>
- Prasad, N. E., & Wanhill, R. J. H. (Eds.). (2017). *Aerospace Materials and Material Technologies* (Vol. 1: Aerospace Materials). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3>

- Siddiquee, S., Gan Jet Hong, M., & Mizanur Rahman, M. (Eds.). (2020). *Composite Materials: Applications in Engineering, Biomedicine and Food Science*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45489-0>
- Suzuki, Y., Cousins, D., Wassgren, J., Kappes, B. B., & Stebner, A. P. (2017). Kinetics and Temperature Evolution During The Bulk Polymerization of Methyl Methacrylate for Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 104(January), 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.10.022>
- Vasiliev, V. V., Jones, R. M., & Man, L. I. (2017). *Mechanics of Composite Structures*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203747858>
- Verma, N., Kumar, R., Zafar, S., & Pathak, H. (2020). Vacuum-assisted Microwave Curing of Epoxy/carbon Fiber Composite: An Attempt for Defect Reduction in Processing. *Manufacturing Letters*, 24, 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.04.010>
- Wang, J., Baker, A., & Chang, P. (2019). Hybrid Approaches for Aircraft Primary Structure Repairs. *Composite Structures*, 207(January), 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.038>
- Zhu, G., Wang, S., Cheng, W., Ren, Y., & Wen, D. (2020). Corrosion and Wear Performance of Aircraft Skin After Laser Cleaning. *Optics and Laser Technology*, 132(July), 106475. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106475>
- Zimmermann, N., & Wang, P. H. (2020). A Review of Failure Modes and Fracture Analysis of Aircraft Composite Materials. *Engineering Failure Analysis*, 115(September), 104692. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104692>

Modelos de velocidad de operación de carreteras rurales en terreno llano en Costa Rica

(Speed profile prediction model of rural roads in flat terrain in Costa Rica)

Domingo E. Delgado Martínez¹, Liosber Medina García², José M. Ulate Zárate³, René A. García Depestre⁴

Resumen

Por varias décadas, en la práctica ingenieril se ha evaluado la influencia del trazado de la carretera en la seguridad vial mediante el análisis de la consistencia; para ello es necesario contar con los perfiles de velocidad de operación del proyecto nuevo o de la carretera existente. Con este fin, generalmente, se emplean modelos de velocidad de operación existentes que fueron desarrollados para otras condiciones, regiones o países. En los análisis de consistencia del trazado es imprescindible contar con la información de la planta, el perfil del proyecto y la velocidad de operación de los vehículos. Una de las principales dificultades y fuentes de error en estos análisis radica en determinar la velocidad de operación. El objetivo del trabajo es desarrollar modelos de predicción de velocidad de operación para Costa Rica que consideren las características del trazado y las condiciones del parque vehicular. El procedimiento seguido incluye una serie de etapas, desde el análisis de las carreteras del territorio hasta el desarrollo de los modelos de predicción del perfil de velocidad y su validación. Como resultado de la investigación se proponen, por primera vez en Costa Rica, modelos de predicción de las velocidades de operación de las rutas nacionales con características rurales en terreno llano. Se demuestra que las ecuaciones propuestas presentan menores errores de estimación si se comparan con algunos de los modelos más usados internacionalmente.

Palabras clave

Consistencia del trazado, modelo de predicción, velocidad de operación, seguridad vial, carreteras rurales, terreno llano.

Abstract

For some time, a commonly used engineering practice has been to evaluate the influence of the geometric design of roads on road safety by analyzing geometric design consistency. When evaluating geometric design consistency, it is necessary to know the operating speed profiles of the road to be analyzed. To this end, a variety of models of operating speed profiles are used, which are designed for the specific conditions of a particular region or country. For any analysis of highway geometric design, it is important to have information related to the horizontal and vertical layout of the project, as well as to the operating speed of vehicles. However, one limitation, which is often a source of error, is determining the operating speed of the vehicles. The aim of this paper is to develop models for predicting vehicle operating speed in Costa Rica by considering the characteristics of the road geometric design and of the existing vehicles. The procedure followed in the model included a series of steps, including from the analysis of the roads in the region to the development of models for predicting the speed profiles, as well as its validation. For the first time, different models are proposed for rural national routes in flat terrain in Costa Rica. The study demonstrates that the proposed equations provide for lower estimations errors, if compared to international models.

Keywords

Geometric design consistency, prediction model, operating speed, road safety, rural roads; flat terrain

1 Universidad Latina de Costa Rica, San José, Costa Rica [domingo.delgado@ulatina.cr, https://orcid.org/0000-0002-1689-3769].
2 Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil [lmedina@ufg.br, https://orcid.org/0000-0002-4091-3491].
3 Universidad Latina de Costa Rica, San José, Costa Rica [julatez@cfia.or.cr, https://orcid.org/0000-0002-7361-1449].
4 Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba [renegd@uclv.edu.cu, https://orcid.org/0000-0003-1957-4760].

1. Introducción

En los últimos años, en muchos países se ha evaluado la seguridad vial a partir del análisis de la consistencia del trazado (Abebe & Belayneh, 2018; Almeida et al., 2018; Echaveguren et al., 2020; Fitzpatrick et al., 2000; García et al., 2012; Kiran et al., 2017; Li et al., 2017; Llopis-Castelló et al., 2020; Llopis-Castelló et al., 2018; Xu, Lin, & Shao, 2017). El análisis de la consistencia del trazado permite verificar si las condiciones geométricas de la carretera generan pequeños diferenciales de velocidad entre elementos consecutivos, ya sea curvas y rectas en horizontal o acuerdos, tanto cóncavos como convexos. La consistencia del trazado se define como la relación entre las características geométricas del trazado de la carretera y las expectativas del conductor (Leisch & Leisch, 1977). Si hay correspondencia entre estos dos aspectos, la conducción del vehículo puede hacerse de modo continuo, sin sobresaltos, lo que incide favorablemente sobre la seguridad en la circulación. Aunque existen diferentes métodos para estimar la consistencia, los más utilizados han sido aquellos basados en el análisis de la velocidad de operación de los vehículos. Entre las principales ventajas de utilizar este tipo de análisis se destaca la posibilidad de aplicarlo tanto a proyectos nuevos como existentes.

García-Ramírez et al. (2017) y Gorazlik y Vollrath (2017) explican que las causas o fuentes de error en la estimación de la velocidad de operación es una cuestión de gran complejidad debido a los factores de los cuales depende, tales como las características del conductor, los vehículos, el entorno, la geometría de la carretera y su operación y control. Otra de las posibles fuentes de variación en la velocidad de operación es la recolección de datos.

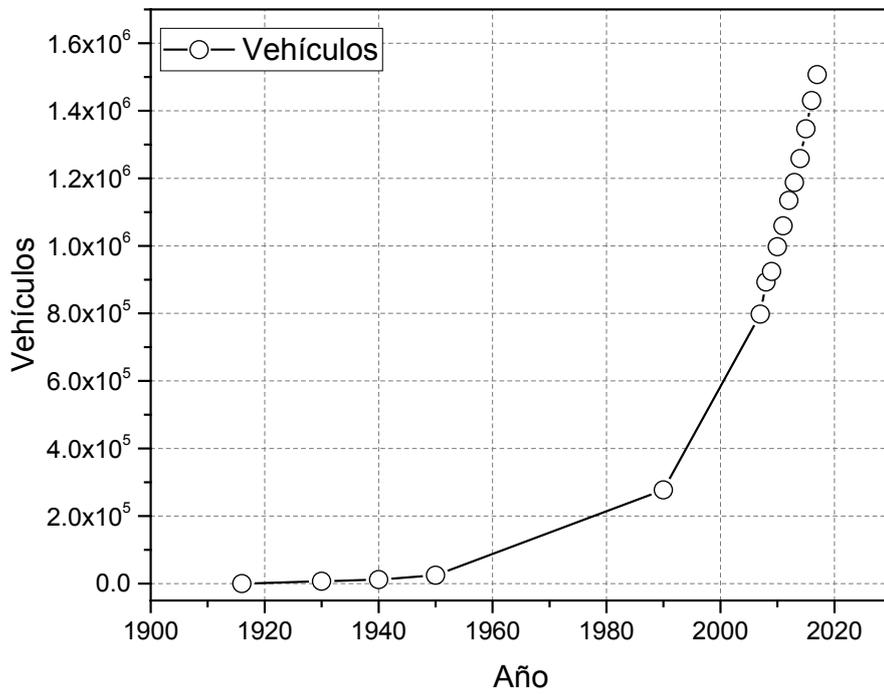
Investigadores como Wilches et al. (2020), Xu, Lin y Shao (2017) y Xu, Lin, Wang, et al. (2017) destacan la importancia del terreno y el diseño geométrico del trazado para obtener los modelos de perfil de velocidad. Otros como Echaveguren et al. (2020) resaltan la complejidad geométrica del trazado como un factor determinante en la variación de la velocidad de operación.

De igual forma, la rapidez con que ha aumentado la flota vehicular, en Costa Rica, es una cuestión de gran interés, debido a su efecto en la seguridad vial. En la

Figura 1 se muestran los datos históricos del crecimiento vehicular hasta el año 2017. La tasa de crecimiento del año 2017 respecto al 2016 era de un 5.4 %. La baja en la tendencia de crecimiento en 2009 corresponde con la recesión económica de 2008 y 2009.

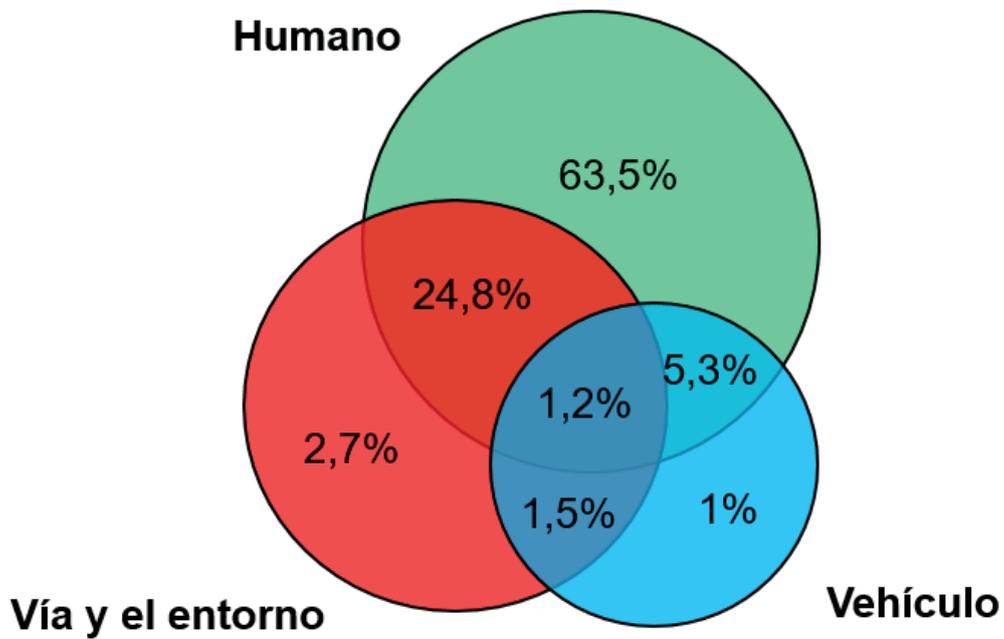
A partir de la interpretación de los reportes de accidentes del tránsito disponibles en el Consejo de Seguridad Vial (COSEVI), para el período de 2015 a 2019 (COSEVI, 2020), se logra reinterpretar las causas de estos accidentes y crear un modelo de interrelaciones entre los principales factores que intervienen en los accidentes del tránsito. En la se muestra el modelo de los porcentajes de accidentes de tránsito según sus causas en el intervalo de 2015 a 2019. En el gráfico se constata que en Costa Rica el factor humano es la causa fundamental de los accidentes; sin embargo, una parte no menos importante de estos accidentes es atribuible a las condiciones geométricas del trazado. Además, puede inferirse que un gran número de accidentes está relacionado con las interrelaciones de las condiciones geométricas del trazado con el factor humano, lo que por sí solo justifica la importancia del estudio.

Figura 1. Crecimiento histórico del parque vehicular en Costa Rica



Nota: Tomado de COSEVI (2020)

Figura 2. Relación entre los elementos que intervienen en la accidentalidad (2015 a 2019)



Varios investigadores coinciden en que la velocidad de operación se define como el percentil 85 de la distribución de velocidades a la que operan los vehículos ligeros en condiciones de flujo libre (Choudhari & Maji, 2019; García-Ramírez & Damián Alverca, 2019; Llopis-Castelló et al., 2019; Llopis-Castelló et al., 2018; Maji et al., 2018; Malaghan et al., 2020; Saleem & Persaud, 2017; Sil et al., 2018). El percentil 85 es el más empleado porque representa aproximadamente la velocidad a la que operan los conductores y que se considera segura.

A lo largo de los años, se han propuesto varios modelos de velocidad de operación y uno de los más reconocidos es el desarrollado por Fitzpatrick et al. (2000). Los modelos de previsión de velocidad deben ser desarrollados o calibrados considerando las condiciones locales y, además, deben estar sujetos a revisiones a lo largo del tiempo. Las ecuaciones obtenidas para una condición no deben ser extrapoladas sin análisis previos, por lo que las condiciones locales deben analizarse de manera particular. Por lo tanto, cada país o región debe desarrollar perfiles de velocidad propios, que tomen en cuenta las características del parque vehicular y las condiciones geométricas del trazado.

La mayoría de las metodologías de evaluación de la consistencia del trazado han desarrollado perfiles de velocidad o ecuaciones de pronósticos de este parámetro (Fitzpatrick et al., 2000; Llopis-Castelló, et al., 2018; Sil et al., 2019).

En Centroamérica no se reportan trabajos donde se hagan estudios de velocidad de operación. En aras de implementar los estudios de consistencia del trazado en la evaluación de la seguridad vial en Costa Rica, es necesario desarrollar modelos propios de estos perfiles, que consideren las características del trazado y las condiciones del parque vehicular del país.

Teniendo en cuenta la importancia de considerar la influencia de las condiciones geométricas del trazado en la accidentalidad en Costa Rica, es fundamental desarrollar modelos de velocidad de operación que constituyan la base para llevar a cabo los análisis de consistencias del trazado y que tomen en cuenta las condiciones específicas del país, es decir, las características del parque vehicular y el trazado geométrico.

2. Materiales y métodos

A partir de la experiencia de varios investigadores, entre los que se destacan Fitzpatrick et al. (2000), y tomando como base fundamental experiencias propias García et al. (2012), se discuten algunos de los elementos más importantes en aras de establecer un procedimiento metodológico para el desarrollo de perfiles de velocidad propios aplicable al caso de Costa Rica.

Para establecer los perfiles de velocidad, es indispensable disponer de la información y los datos de los proyectos o carreteras ya existentes de la región objeto de estudio. Entre los parámetros más relevantes se encuentran la clasificación y el tipo de vía, el número de carriles, el tipo de terreno en que se encuentran, así como las características geométricas y la velocidad de operación. Los modelos de perfiles de velocidad se determinan en función de las múltiples combinaciones de trazado en planta y perfil, dependiendo de la categoría de la vía, tipo de terreno y criterios de diseño que establece el *Manual centroamericano de normas para el diseño geométrico de carreteras* (SIECA, 2011).

El procedimiento metodológico propuesto para determinar los modelos de velocidad de operación consta de las siguientes etapas: análisis de las carreteras del territorio y definición de parámetros fijos por investigar, determinación de los sitios y selección de la muestra, mediciones de velocidad en los sitios seleccionados, desarrollo de los modelos de predicción del perfil

de velocidad y la validación de los modelos desarrollados. A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de ellas.

Análisis de las carreteras del territorio y definición de parámetros fijos por investigar

Para desarrollar los perfiles de velocidad, es preciso contar con una caracterización de la red vial nacional del país o región que se desea evaluar. A partir de la disponibilidad de los datos de esta red vial, es que se debe establecer tipo de carretera para el cual se desarrollarán los modelos. En el caso de Costa Rica, la red nacional se clasifica en dos grupos: la Red Vial Nacional, administrada por el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT), y la Red Vial Cantonal, administrada por las municipalidades correspondientes. La Red Vial Nacional cuenta con 5127 km asfaltados y 2594 km en lastre, para un total de 7721 km; la Red Vial Cantonal se compone de 5073 km asfaltados, 29917 km en lastre y 5194 km no clasificados, para un total de 40184 km (COSEVI, 2020). Con estos datos, Costa Rica presenta una densidad de carreteras de aproximadamente 0.79 km/km².

Otro aspecto importante que se debe tener en cuenta son los parámetros geométricos fijos y sus combinaciones. Los parámetros fijos de las carreteras son elementos que no varían a lo largo de su vida útil, siempre que no se realicen intervenciones. Los parámetros más significativos, con respecto a las características geométricas, son la pendiente y el radio de curvatura horizontal, grado de curvatura, longitud de curva y Kv.

Determinación de los sitios y selección de la muestra

Se denomina 'sitio' a la agrupación de una o varias curvas de características geométricas similares de la misma condición, ya sea curva horizontal, vertical, o su combinación. Para organizar el procedimiento de selección del sitio, se recomienda que las alineaciones, horizontal y vertical, se dividan en grupos, o que incluyan las combinaciones deseadas Fitzpatrick et al. (2000). Los estudios anteriores de García et al. (2012) y Fitzpatrick et al. (2000) reportan que para desarrollar perfiles de velocidad de operación se han de agrupar los elementos de características geométricas similares.

Cada uno de los tramos de la red vial se clasifica según las pendientes de la rasante y el terreno; de esta manera, se define a qué tipo de terreno pertenecen los sitios clasificados en cada condición o caso, ya sea llano ondulado o montañoso. Esta clasificación para el caso de Costa Rica se realiza con base en el manual de SIECA (2011).

En el estudio desarrollado por Fitzpatrick et al. (2000) se determinan diez combinaciones de sitios y, para cada uno de ellos, se establecieron los modelos de predicción de velocidad. En el caso del estudio de García et al. (2012), se definieron ocho tipos de sitios, lo que demuestra que estas combinaciones pueden variar en función de las condiciones locales, regionales o del país donde se desarrolle este tipo de estudio.

Una vez definida la localidad, región o país y tipo de terreno para el cual se establecerá el perfil de velocidad, se define la población con que se cuenta para el estudio y, a partir de ella, se determina una muestra representativa. El cálculo del número de muestras se hace utilizando la ecuación 1, que es recomendable utilizar cuando se conoce el tamaño de la población.

$$n = \frac{Z^2 pqN}{NE^2 + Z^2 pq} \quad (1)$$

Donde:

n tamaño de la muestra

Z nivel de confianza

p variabilidad positiva

q variabilidad negativa

N tamaño de la población

E precisión o error

Mediciones de velocidad en los sitios seleccionados

La velocidad de operación se determina para vehículos ligeros, en horario diurno, en condiciones climáticas favorables y con pavimento seco y en buen estado de conservación. Los estudios de velocidad deben ser elaborados en el punto de la curva donde se propicia un aumento de la velocidad de operación y se pueden utilizar diferentes técnicas, entre las que se destaca la utilización de la pistola láser.

Los estudios Fitzpatrick et al. (2000) y García et al. (2012) refieren que, para las condiciones que involucran rectas en curvas verticales, ya sean cóncavas o convexas, las velocidades deben ser medidas en el punto medio, exactamente donde se forma la curva vertical. En el caso de combinación de curvas horizontales con curvas verticales, las velocidades deben ser medidas en el punto medio de la curva horizontal, que también debe coincidir, desde la concepción del proyecto, con el punto donde se da el cambio de pendiente que genera el acuerdo.

Una de las expresiones estadísticas que puede ser utilizada para establecer el tamaño de la muestra de mediciones de velocidad es la ecuación 2, recomendada por Robertson et al. (1994).

$$n = \frac{S^2 K^2 (2 + U^2)}{2E^2} \quad (2)$$

Donde:

S Desviación estándar estimada (km/h)

K Constante asociada al nivel de confianza deseado

U Constante asociada al percentil analizado

E Error permitido (km/h)

n Tamaño de la muestra (número mínimo de mediciones de velocidad).

Los valores de la desviación estándar estimada S pueden ser obtenidos según recomendaciones de Robertson et al. (1994). En la Tabla 1 se presentan los valores que se sugieren para estos casos.

Tabla 1. Desviación estándar para determinar el tamaño de muestra

Área de tráfico	Tipo de vía	Desviación estándar (km/h)
Rural	Un carril	8.5
	Dos carriles	6.8
Intermedia	Un carril	8.5
	Dos carriles	8.5
Urbana	Un carril	7.7
	Dos carriles	7.9
Valor Recomendado		8.0

Nota: Tomado de Robertson et al. (1994)

De igual forma, para obtener los valores de la constante K , Robertson et al. (1994) recomiendan utilizar los valores de la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de constante K

Nivel de confianza (%)	Constante K
68.30	1.00
86.60	1.50
90.00	1.64
95.00	1.96
95.50	2.00
98.80	2.50
99.00	2.58
99.70	3.00

Nota: Tomado de Robertson et al. (1994)

Los autores Robertson et al. (1994) establecen los valores de la desviación estándar estimada S en función del percentil de velocidad (ver Tabla 3).

Tabla 3. Valores de constante U

Percentil de velocidad	Constante U
50.00	0.00
85.00	1.04
93.00	1.48
95.00	1.64

Nota: Tomado de Robertson et al. (1994)

En caso de que las bases de datos, los proyectos que estén a disposición de los investigadores, entre otros, sean insuficientes para garantizar la representatividad del muestreo, lo más recomendable es recopilar la información complementaria con trabajos de campos, siempre y cuando existan sitios para ampliar la muestra. Estos estudios complementarios *in situ* facilitan la verificación o determinación de información para satisfacer el tamaño de muestra requerido para el trabajo.

Desarrollo de los modelos de predicción del perfil de velocidad

Al concluir las mediciones de velocidad en los sitios seleccionados, es necesario hacer un procesamiento de las estas. Inicialmente se definen los estadígrafos descriptivos de la variable, entre ellos, varianza, desviación estándar, media, entre otros, con el fin de aplicar un criterio de limpieza de datos o errores que permita rechazar valores anómalos y, de esta forma, disminuir la dispersión de los datos. Algunos de estos criterios pueden ser el criterio de rechazo $2s$, gráficos de dispersión, entre otros.

Previo a la aplicación de técnicas paramétricas para establecer los modelos de predicción de velocidad, debe probarse la normalidad de las variables. Generalmente, el primer paso para establecer ecuaciones de regresión es determinar el coeficiente de correlación entre las variables y gráficos de dispersión de las variables correlacionadas. A partir de este punto, se establecen las variables con mayor fuerza de asociación para establecer modelos de regresión univariados o multivariados. El modelo puede tener un ajuste lineal o de cualquier otro tipo que será determinado por el investigador.

En el caso de los análisis de regresión, deben de ser comprobados para que se cumplan los supuestos de esos análisis y la robustez de la asociación de las variables. Un aspecto fundamental que se debe considerar es que, a partir del análisis bibliográfico, se pueden establecer las variables que generalmente presentan mejor fuerza de asociación y los modelos que mejor se ajustan a la variable de respuesta.

Validación de los modelos de desarrollados

Una vez desarrollados los modelos de perfil de velocidad para cada uno de los casos previamente establecidos, se procede a comprobar si las velocidades estimadas por el modelo se ajustan a las medidas en campo. Para ello existen dos alternativas: la primera alternativa es la selección de forma aleatoria de uno o más sitios que pertenezcan a la población objeto de estudio y que no formen parte de la muestra empleada para crear el modelo. En este caso, se debe proceder a medir *in situ* las velocidades de operación y comparar las velocidades reales de operación con las velocidades estimadas por el modelo. Si los diferenciales de las velocidades son inferiores al error de la estimación, puede validarse el modelo. La segunda alternativa consiste en verificar la exactitud de las predicciones de velocidad de los modelos propuestos al comparar las mediciones hechas *in situ* con otros modelos desarrollados para las mismas condiciones de sitio definidas en este estudio.

En caso de aplicar la segunda alternativa para terreno llano en Costa Rica u otro país, en el que existan diferencias entre normativas, debe realizarse una comprobación como la que se muestra en la Tabla 4. Las ecuaciones 1 y 4 no pueden aplicarse para el caso de terreno llano, y las ecuaciones 2 y 3 difieren en los valores de pendientes de rasante. Por lo tanto, de las ecuaciones propuestas por Fitzpatrick et al. (2000) y García et al. (2012) solo podrían ser objeto de comparación los casos 2, 3 y del 5 al 10, que son las combinaciones apropiadas a casos de terreno llano.

Tabla 4. Modelos utilizados en la comprobación

Caso	Combinaciones de estudios internacionales	Combinaciones en Costa Rica para terreno llano	Fitzpatrick et al. (2000)	(García et al., 2012)
1	Curva horizontal en pendiente (-9 % a -4 %)	-	$V_{op} = 102,10 - \frac{3077,13}{R}$	$V_{op} = 76,587 - \frac{1305,731}{R}$
2	Curva horizontal en pendiente (-4 % a 0 %)	Curva horizontal sobre pendiente (-5 % < i < 0 %)	$V_{op} = 105,98 - \frac{3709,90}{R}$	$V_{op} = 77,44 - \frac{1206,266}{R}$
3	Curva horizontal en rampa (0 % a 4 %)	Curva horizontal sobre pendiente (0 % < i < 5 %)	$V_{op} = 104,82 - \frac{3574,51}{R}$	$V_{op} = 77,212 - \frac{1435,599}{R}$
4	Curva horizontal en pendiente (4 % a 9 %)		$V_{op} = 96,61 - \frac{2752,19}{R}$	$V_{op} = 79,977 - \frac{2410,793}{R}$
5	Curva horizontal combinada con curvas cóncavas	Curva horizontal combinada con acuerdo cóncavo	$V_{op} = 105,32 - \frac{3438,19}{R}$	$V_{op} = 83,599 - \frac{2247,827}{R}$
6	Curva horizontal combinada con curvas convexas sin limitación de visibilidad	Curva horizontal combinada con acuerdo convexo sin limitación de visibilidad	Ver Nota 1	$V_{op} = 79,883 - \frac{1744,898}{R}$
7	Curva horizontal combinada con curva convexa y limitación en la distancia de visibilidad ($K_v \leq 43$ m%)	Curva horizontal combinada con acuerdo convexo y limitación en la distancia de visibilidad ($K_v \leq 43$ m%)	$V_{op} = 105,32 - \frac{3438,19}{R}$ Ver Nota 2	$V_{op} = 79,883 - \frac{1744,898}{R}$
8	Curva vertical cóncava sobre recta horizontal	Acuerdo cóncavo en recta	Se asume la V_{85} como velocidad deseada	$V_{op} = 84,018 - \frac{0,177}{K_v}$
9	Curva vertical Convexa en recta, sin limitación en la distancia de visibilidad ($K_v > 43$ m%)	Acuerdo Convexo en recta, sin limitación en la distancia de visibilidad ($K_v > 43$ m%)	Se asume la V_{85} como velocidad deseada	$V_{op} = 83,332 - \frac{0,157}{K_v}$
10	Curva vertical Convexa en recta, con limitación en la distancia de visibilidad ($K_v \leq 43$ m%)	Acuerdo Convexo en recta, con limitación en la distancia de visibilidad ($K_v \leq 43$ m%)	$V_{op} = 105,08 - \frac{149,69}{K_v}$	$V_{op} = 83,332 - \frac{0,157}{K_v}$

Nota 1: Usar la menor velocidad estimada con las ecuaciones 1 o 2 (para pendientes descendentes) y 3 o 4 (para pendientes ascendentes)

Nota 2: Comparar la velocidad estimada con las ecuaciones 1 o 2 (para pendientes descendentes) y 3 o 4 (para pendientes ascendentes) y usar la menor. Esto asegurará que la velocidad estimada a lo largo de las curvas combinadas no será mejor que si solo la curva horizontal está presente (es decir, la inclusión de una curva convexa con visibilidad limitada resulta en una mayor velocidad).

3. Resultados

A continuación, se muestra los resultados de la aplicación de la metodología empleada para desarrollar modelos propios de previsión de velocidad de operación para el caso de Costa Rica.

Partiendo de la importancia y la representatividad a nivel nacional, se decide desarrollar los perfiles de velocidad para carreteras clasificadas como rurales de dos carriles de circulación en terreno llano y declaradas rutas nacionales. Estas vías mueven los mayores volúmenes de tránsito a nivel nacional y en ellas ocurren buena parte de los accidentes del tránsito que se desean evaluar a partir de estudios de consistencia del trazado.

Análisis de las carreteras del territorio y definición de parámetros fijos por investigar

La base de datos necesarios para el estudio se genera a partir del análisis de los proyectos de carreteras disponibles en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Latina de Costa Rica y de otros obtenidos mediante la colaboración con diferentes compañías privadas y dependencias gubernamentales.

En la Tabla 5 se muestran los tramos de carretera de dos carriles en terreno llano utilizados para desarrollar los modelos de velocidad. De todos los tramos de los cuales se dispone de su diseño geométrico solo los incluidos en la tabla cumplen con los requisitos de parámetros fijos y buen estado de conservación vial. Estos tramos de carreteras tienen velocidades de diseño comprendidas entre 30 km/h y 80 km/h.

Tabla 5. Trazados obtenidos para el desarrollo de la metodología

Nombre del Trazado	Kilómetros
Barranca-Limonal	52.00
Limonal-Cañas	10.00
Paquera-Tambor	20.24
Orotina-Caldera	76.64
Tucurrique	2.80
Total	161.68

Determinación de los sitios y selección de la muestra

A partir de la población disponible de sitios en terreno llano de carreteras rurales de interés nacional de Costa Rica, en este caso 161.68 km distribuidos en las diferentes regiones y provincias del país, aunado a que su selección es casuística 'por disponibilidad' se considera un criterio que favorece su representatividad. De esta población se obtienen combinaciones de trazado agrupadas en condiciones similares a las del trabajo desarrollado por Fitzpatrick et al. (2000). Cabe señalar que las condiciones geométricas de los modelos internacionales no coinciden exactamente con las condiciones normadas por el manual del SIECA (2011), que considera la pendiente máxima hasta 5 % para rasantes en terreno llano. En la

Tabla 6 se presenta la agrupación de sitios que logran ser identificados en la población de tramos de carreteras.

Tabla 6. Muestras de sitios por casos de estudio

Caso	Combinación de Trazado	Población	Muestra
2	Curva horizontal sobre pendiente ($-5\% < i < 0\%$)	34	25
3	Curva horizontal sobre pendiente ($0\% < i < 5\%$)	34	25
7	Curva horizontal combinada con acuerdo cóncavo	26	20
8	Curva horizontal combinada con acuerdo convexo sin limitación de visibilidad	11	10
9	Curva horizontal combinada con acuerdo convexo y limitación en la distancia de visibilidad ($K_v \leq 43\text{ m}\%$)	19	16
10	Acuerdo Cóncavo en recta	30	23
11	Acuerdo convexo en recta, sin limitación en la distancia de visibilidad ($K_v > 43\text{ m}\%$)	20	16
12	Acuerdo convexo en recta, con limitación en la distancia de visibilidad ($K_v \leq 43\text{ m}\%$)	22	18

Mediciones de velocidad en los sitios seleccionados

La toma de muestras de velocidad en el terreno se lleva a cabo con mediciones directas a vehículos en movimiento y bajo las condiciones mencionadas en la sección 2. Este proceso se realiza con una pistola láser de marca Stalker y precisión de ± 2.5 km/h.

El cálculo del tamaño de la muestra de velocidad se realizó considerando valores de $S=8.5$ km/h, nivel de confianza de 95 % ($K=1.96$), un valor de $U=1.04$ correspondiente al percentil 85 y error $E=6.5$ km/h. El intervalo de error recomendado por Robertson et al. (1994) es de 1.61 km/h hasta 8.05 km/h. En este sentido, otra consideración importante es que la precisión de la pistola láser no debe ser superior al error elegido, con lo que se evita falsear los resultados estadísticos. Con estos datos se obtuvo un tamaño de muestra igual a 10.

Aunque en ninguno de los casos de estudio el tamaño de la muestra es menor que 10, se procede a calcular, mediante la ecuación 2, la desviación estándar y el error, donde se utilizan los mismos valores de $K=1.96$ y $U=1.04$, pero los valores de N se sustituyen con la muestra de cada caso y S se sustituye con los valores de desviación estándar obtenidos de las mediciones en campo. En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos. Aunque en algunos casos se sobrepasa el valor de desviación estándar y el error asumido de 6.5 km/h, en ninguno se supera el error máximo establecido por Robertson et al. (1994) de 8.05 km/h (5 mill/h); por lo tanto, se aceptan los tamaños de muestras determinados.

Independientemente de que autores como García-Ramírez y Damián Alverca (2019), García et al. (2012) y Wilches et al. (2020) refieren que el punto más apropiado para la medición de la velocidad operacional en curvas horizontales es el punto medio, se decidió medir en otros puntos con el objetivo de verificar la veracidad de esta afirmación. Esta idea se justifica en que autores como Maji y Tyagi (2018) determinaron que las velocidades en varios lugares dependen de algunas combinaciones de longitud de curva, curvatura y velocidad en el segmento anterior de la carretera; y que otros, como Dai et al. (2017), determinan la influencia de diferentes parámetros como el radio de la curva horizontal y la pendiente de la curva vertical sobre la velocidad.

Tabla 7. Valores de desviación estándar y error para el número real de muestras

Caso	R ²	p	U	K	N	S(Km/h)	E(Km/h)
2	0.573	0.000	1.04	1.96	25	9.16	4.46
3	0.537	0.000	1.04	1.96	25	12.06	5.87
7	0.629	0.000	1.04	1.96	20	9.21	5.01
8	0.984	0.000	1.04	1.96	10	3.43	2.64
9	0.521	0.002	1.04	1.96	16	7.61	4.63
10	0.119	0.106	1.04	1.96	23	15.83	8.03
11	0.514	0.009	1.04	1.96	16	8.52	5.18
12	0.132	0.364	1.04	1.96	18	12.16	6.97

Por las razones antes comentadas, en curvas horizontales con rasante en inclinación o pendiente se miden velocidades en tres puntos: punto de inicio (PC), punto medio (PM) y punto de final (PT). Con el objetivo de verificar el efecto de la inclinación o la pendiente en la variación de la velocidad de operación, se hizo una prueba t para las muestras tomadas en estos puntos. El análisis estadístico de las mediciones en los puntos mencionados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Prueba t para muestras relacionadas de las velocidades medidas en PC, PM y PT

Punto de medición	Diferencias emparejadas					t	ggl	Sig. (bilateral)
	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95 % de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
PC-PM	-10.00	4.26	1.90	-15.29	-4.71	-5.25	4	0.006
PM-PT	9.54	1.67	0.75	7.47	11.61	12.80	4	0.000
PC-PT	-0.46	5.30	2.37	-7.04	6.12	0.194	4	0.856

Nota: Minitab

Al comparar las velocidades aplicando la prueba t para muestras relacionadas, se determina que existen diferencias significativas entre los valores de velocidad medidos entre el PC y el PT; sin embargo, estas diferencias de velocidad no son significativas al comparar el PC con el PM y el PM con el PT. Por lo tanto, la velocidad medida en el PM, se puede considerar como la velocidad promedio que desarrolla el vehículo en la curva y, en este sentido, la más apropiada para este tipo de estudios.

Desarrollo de los modelos de predicción del perfil de velocidad

Los modelos de predicción del perfil de velocidad de operación para carreteras rurales de dos carriles se obtienen con la aplicación de técnicas de regresión. Un aspecto relevante es que los modelos se desarrollan a partir de las variables que muestran mayor fuerza de asociación y no necesariamente a partir de las mismas variables encontradas en otros modelos de la literatura. El procesamiento estadístico de las variables analizadas se elabora con el paquete estadístico Minitab versión 14.12.0. En la Tabla 9 se muestran los resultados estadísticos para los modelos desarrollados. El criterio para la selección de los modelos más apropiados se basa en el análisis

conjunto del coeficiente de correlación de Pearson (R), el coeficiente de determinación (R^2), el nivel de significación de la ecuación de regresión (p), el error estándar en la estimación del modelo (S) y el estadístico Durbin-Watson (d).

Tabla 9. Resumen de pruebas estadísticas para los modelos de cada caso

Caso	R	R^2	p	S(km/h)	d
2	0.757	0.573	0.000	9.16	1.363
3	0.733	0.537	0.000	12.06	1.560
7	0.793	0.629	0.000	9.21	0.987
8	0.9875	0.9840	0.000	3.43	1.424
9	0.722	0.521	0.002	7.61	1.990
10	0.345	0.119	0.106	15.83	0.987
11	0.717	0.514	0.009	8.52	1.205
12	0.363	0.132	0.346	12.16	1.408

R: Coeficiente de Pearson, R^2 : Coeficiente al cuadrado, p: significancia, S: Error estándar en la estimación, D: Durbin Wanston

A partir del análisis estadístico, se establece que las ecuaciones de regresión 10 y 12 no satisfacen la generalidad de los estándares de evaluación de este tipo ecuación de pronóstico. Sin embargo, la mayoría de los modelos de predicción establecidos pueden considerarse apropiados a partir del análisis de conjunto de las técnicas antes citadas. En la Tabla 10 se muestran las ecuaciones de predicción de velocidad para los casos seleccionados que satisfacen los análisis estadísticos mencionados anteriormente.

Tabla 10. Modelos de perfil de velocidad para cada caso

Caso	Ecuación
2	$V_{85} = 54.064 + 0.029Lc - 0.183 * GC$
3	$V_{85} = 39.056 + 0.047Lc + 0.009R + 2.791G$
7	$V_{85} = 43.639 + 0.011 * R + 0.029Lc$
8	$\frac{V^\lambda - 1}{\lambda * g^{\lambda-1}} = 6.31 + 0.08434R - 0.08079Lc, \lambda = 5$
9	$V_{85} = 44.377 + 0.13R$
11	$V_{85} = 70.238 - 3.260G + 989.523Kv^{-1}$

Nota: Lc: longitud de la curva, GC: Grado de curvatura, R: Radio de la curva, l: Coeficiente de la ecuación de regresión, g: Media geométrica de V, Kv: tasa de la curva vertical

Validación de los modelos de velocidad desarrollados

Los seis modelos propuestos fueron validados comparando sus resultados con velocidades medidas *in situ* y con velocidades estimadas por modelos de otros autores. En la Tabla 11 se presentan, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para el caso de trazado 8 y su compro-

bación por las alternativas 1 (comparación con velocidades reales medidas *in situ*) y alternativa 2 (comparación con otros modelos para casos similares).

Al comparar con los modelos propuestos, estos presentan un excelente ajuste con las velocidades de operación reales medidas *in situ*; sin embargo, al hacerlo con otros modelos desarrollados para condiciones de otros países como los trabajos de Fitzpatrick et al. (2000) y García et al. (2012) para condiciones similares, se evidencian diferencias importantes. Es importante destacar que el modelo desarrollado por García et al. (2012) se ajusta en mejor medida que el propuesto por Fitzpatrick et al. (2000); aunque ninguno de los dos parece ser apropiado para el caso de Costa Rica.

Tabla 11. Validación de los modelos para caso de trazado 8

Caso	Ecuación	Velocidad Estimada (km/h)	Velocidad Medida (km/h)	Diferencia (km/h)
8	$\frac{V^\lambda - 1}{\lambda * g^{\lambda-1}} = 6.31 + 0.08434R - 0.08079Lc$	41.98	43.42	±1.44
8 (F)	$V_{85} = 105.98 - \frac{3709.90}{R}$	100.33		±56.91
	$V_{85} = 104.82 - \frac{3574.51}{R}$	99.37		±55.95
8 (G, D y D)	$V_{op} = 79.883 - 1744.898/R$	77.23		±33.81

Nota: Caso 8-A = Modelo desarrollado en este trabajo de investigación, Caso 8-A (F) = Modelo desarrollado por (Fitzpatrick et al., 2000), Caso 8-A (G, D y D) = Modelo desarrollado por García et al. (2012)

La validación de los modelos de predicción propuestos para el caso de Costa Rica mostrados en la Tabla 11 confirma la necesidad de desarrollar modelos propios de velocidad de operación por país o región, si se desea evaluar la seguridad vial a partir de los análisis de consistencia del trazado.

Los modelos de predicción de perfiles de velocidad desarrollados para el caso de Costa Rica constituyen un primer momento de un proyecto encaminado a evaluar la seguridad vial de carreteras a partir del estudio de consistencia del trazado. Es imprescindible aclarar que los modelos propuestos son válidos para carreteras rurales de dos carriles de interés nacional en terreno llano con velocidades de diseño de entre 30 km/h y 80 km/h. El estudio citado permitiría proponer medidas correctivas que pueden incluir mejoras parciales de los trazados existentes, dada la necesidad de disminuir los altos índices de accidentalidad del país.

4. Conclusiones y recomendaciones

Se establecen por primera vez para Costa Rica seis modelos de predicción de la velocidad de operación para carreteras rurales de interés nacional en terreno llano.

Los modelos de predicción se desarrollan a partir de una propuesta metodológica propia que puede ser aplicable a otros países con características similares.

Se constata estadísticamente, durante el procedimiento experimental, que las mediciones de velocidad se deben hacer en el punto medio de la curva horizontal, ya que en este se presenta la velocidad máxima o mínima según el efecto de la pendiente del terreno.

Los seis modelos de predicción de velocidad desarrollados para carreteras rurales de dos carriles denominadas vías nacionales en terreno llano son validados con mediciones de velocidad *in situ* y comparados con modelos de Fitzpatrick et al. (2000) y García et al. (2012). La comparación de las velocidades medidas *in situ* con las estimadas por los modelos propuestos está siempre dentro del margen del error de predicción, con lo cual se ratifica su validez.

Se demuestra la necesidad de desarrollar modelos propios de predicción de velocidad de operación, al comparar estos modelos con sus equivalentes disponibles en la literatura internacional.

Una vez desarrollados los modelos para el caso de carreteras nacionales de características rurales en terreno llano, es posible evaluar la consistencia del trazado en proyectos nuevos o existentes en Costa Rica.

Referencias

- Abebe, M. T., & Belayneh, M. Z. (2018). Identifying and Ranking Dangerous Road Segments a Case of Hawassa-Shashemene-Bulbula Two-Lane Two-Way Rural Highway, Ethiopia. *Journal of Transportation Technologies*, 8(03), 151–174. <https://doi.org/10.4236/jtts.2018.83009>
- Almeida, R., Vasconcelos, L., & Bastos Silva, A. (2018). Design Consistency Index for Two-lane Roads Based on Continuous Speed Profiles. *PROMET. Traffic&Transportation*, 30(2), 231–239. <https://doi.org/10.7307/ptt.v30i2.2573>
- Choudhari, T., & Maji, A. (2019). Effect of Horizontal Curve Geometry on the Maximum Speed Reduction: A Driving Simulator-Based Study. *Transportation in Developing Economies*, 5(2), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s40890-019-0082-8>
- COSEVI (Consejo de Seguridad Vial). (2020). *Accidentes*. <https://datosabiertos.csv.go.cr/dashboards/19683/accidentes/>
- Dai, Y., Lyu, N., & Hu, Y. (2017, 8–10, August). *Truck Speed Characteristics Analysis of Typical Highway Segments Based on GPS Data*. 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). Banff, AB, Canada. <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2017.8047817>
- Echaveguren, T., Henríquez, C., & Jiménez-Ramos, G. (2020). Longitudinal Acceleration Models for Horizontal Reverse Curves of Two-Lane Rural Roads. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 15(1), 103–125. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2020-15.463>
- Fitzpatrick, K., Wooldridge, M. D., Tsimhoni, O., Collins, J. M., Green, P., Bauer, K. M., Parma, K. D., Koppa, R., Harwood, D. W., Anderson, I., Krammes, R. A., & Poggioli, B. (2000). *Alternative Design Consistency Rating Methods for Two-Lane Rural Highways*. U. S. Department of Transportation, Final Report, FHWA-RD-99-172. <https://trid.trb.org/view/691718>
- García-Ramírez, Y. D., & Alverca, F. (2019). Calibración de ecuaciones de velocidades de operación en carreteras rurales montañosas de dos carriles: Caso de estudio ecuatoriano. *Revista Politécnica*, 43(2), 37–44. <https://doi.org/10.33333/rp.vol43n2.1012>
- García-Ramírez, Y., Zárata, B., Segarra, S., & González, J. (2017). Variación diaria y horaria de la velocidad de operación en carreteras rurales de dos carriles en el cantón Loja. *Revista Politécnica*, 40(1), 45–51. <https://doi.org/10.33333/rp.v40i1.864>
- García, R. A., Delgado, D. E., & Díaz, E. E. (2012). Modelos de perfil de velocidad para evaluación de consistencia del trazado en carreteras de la provincia de Villa Clara, Cuba. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(2), 71–82. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732012000200005>

- Goralzik, A., & Vollrath, M. (2017). The Effects of Road, Driver, and Passenger Presence on Drivers' Choice of Speed: A Driving Simulator Study. *Transportation Research Procedia*, 25, 2061–2075. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.400>
- Kiran, B. N., Kumaraswamy, N., & Sashidhar, C. (2017). A Review of Road Crash Prediction Models for Developed Countries. *American Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2(2), 10–25. <https://doi.org/10.11648/j.ajtte.20170202.11>
- Leisch, J. E., & Leisch, J. P. (1977). New Concepts in Design-Speed Application. *Transportation Research Record*, 631, 4–14. <https://trid.trb.org/view/71966>
- Li, L., Gayah, V. V., & Donnell, E. T. (2017). Development of Regionalized SPFs for Two-Lane Rural Roads in Pennsylvania. *Accident Analysis & Prevention*, 108, 343–353. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.08.035>
- Llopis-Castelló, D., Bella, F., Camacho-Torregrosa, F. J., & García, A. (2018). New Consistency Model Based on Inertial Operating Speed Profiles for Road Safety Evaluation. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(4), 04018006. <https://doi.org/10.1061/jtepbs.0000126>
- Llopis-Castelló, D., Camacho-Torregrosa, F. J., & García, A. (2018). Calibration of the Inertial Consistency Index to Assess Road Safety on Horizontal Curves of Two-Lane Rural Roads. *Accident Analysis & Prevention*, 118, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.05.014>
- Llopis-Castelló, D., Findley, D. J., Camacho-Torregrosa, F. J., & García, A. (2019). Calibration of Inertial Consistency Models on North Carolina Two-Lane Rural Roads. *Accident Analysis and Prevention*, 127, 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.03.013>
- Llopis-Castelló, D., Findley, D. J., & García, A. (2020). Comparison of the Highway Safety Manual Predictive Method with Safety Performance Functions Based on Geometric Design Consistency. *Journal of Transportation Safety & Security*, 1–22. <https://doi.org/10.1080/19439962.2020.1738612>
- Llopis-Castelló, D., González-Hernández, B., Pérez-Zuriaga, A. M., & García, A. (2018). Speed Prediction Models for Trucks on Horizontal Curves of Two-Lane Rural Roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(17), 72–82. <https://doi.org/10.1177/0361198118776111>
- Maji, A., Sil, G., & Tyagi, A. (2018). 85th and 98th Percentile Speed Prediction Models of Car, Light, and Heavy Commercial Vehicles for Four-Lane Divided Rural Highways. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 144(5), 04018009. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000136>
- Maji, A., & Tyagi, A. (2018). Speed Prediction Models for Car and Sports Utility Vehicle at Locations Along Four-Lane Median Divided Horizontal Curves. *Journal of Modern Transportation*, 26(4), 278–284. <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0162-1>
- Malaghan, V., Pawar, D. S., & Dia, H. (2020). Modeling Operating Speed Using Continuous Speed Profiles on Two-Lane Rural Highways in India. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 146(11), 04020124. <https://doi.org/10.1061/jtepbs.0000447>
- Robertson, D. H., Hummer, J. E., & Nelson, D. C. (1994). Spot Speed Studies. In *Manual of Transportation Engineering Studies*. Institute of Transportation Engineers.
- Saleem, T., & Persaud, B. (2017). Another Look at The Safety Effects of Horizontal Curvature on Rural Two-Lane Highways. *Accident Analysis and Prevention*, 106, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.04.001>
- SIECA, S. de I. E. C. (2011). *Manual centroamericano de normas para el diseño geométrico de carreteras* (3.^a ed.). Secretaría de Integración Económica Centroamericana. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2003.1246782>
- Sil, G., Maji, A., Nama, S., & Maurya, A. K. (2019). Operating Speed Prediction Model as a Tool for Consistency Based Geometric Design of Four-Lane Divided Highways. *Transport*, 34(4), 425–436. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.10715>
- Sil, G., Nama, S., Maji, A., & Maurya, A. K. (2018, January 7–11). *The 85th Percentile Speed Prediction Model for Four-Lane Divided Highways in Ideal Free Flow Condition* [Paper], 18–23. Transporta-

- tion Research Board 97th Annual Meeting, Washington DC, United States. <https://trid.trb.org/view/1495476>
- Wilches, F. J., Burbano, J. L. A., & Sierra, E. E. C. (2020). Vehicle Operating Speeds in Southwestern Colombia: An Important Database for The Future Implementation of Optimization Models for Geometric Design of Roads in Mountain Topography. *Data in Brief*, 32, 106210. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106210>
- Xu, J., Lin, W., & Shao, Y. (2017). New Design Method for Horizontal Alignment of Complex Mountain Highways Based on “Trajectory-Speed” Collaborative Decision. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(4), 1–18. <https://doi.org/10.1177/1687814017695437>
- Xu, J., Lin, W., Wang, X., & Shao, Y. M. (2017). Acceleration and Deceleration Calibration of Operating Speed Prediction Models for Two-Lane Mountain Highways. *Journal of Transportation Engineering*, 143(7), 1–13. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000050>

Políticas basadas en la ISO 27001: 2013 y su influencia en la gestión de seguridad de la información en municipalidades de Perú

*(Policies based on ISO 27001: 2013 and its influence
on information security management in municipalities of Peru)*

Shonerly Bustamante García¹, Miguel Ángel Valles Cora², Immer Elías Cuellar Rodríguez³,
Danny Lévano Rodríguez⁴

Resumen

La gestión de seguridad de la información dentro de una organización debe ser un proceso bien definido, ya que implica un enorme esfuerzo tanto de usuarios, jefes de área y demás servidores para conocer cómo responder ante eventos sospechosos y cómo gestionar vulnerabilidades identificadas. El objetivo de esta investigación fue mejorar la gestión de seguridad de la información en una municipalidad distrital peruana, mediante la implantación de un modelo de políticas basado en la ISO 27001:2013. Para ello, se hizo una investigación preexperimental con una muestra de 30 trabajadores a quienes se les aplicó un cuestionario para medir el grado de satisfacción con el modelo implantado. En promedio, más del 90 % de los encuestados reconoció mejoras en la municipalidad, lo que marca una gran diferencia entre el pre y postest, de 49 % a 96 %. Se concluye que el modelo de políticas de seguridad basado en tres pilares fundamentales: confidencialidad, integridad y disponibilidad mejoró la gestión de seguridad de la información, garantizando un adecuado resguardo de los datos.

Palabras clave

Gestión, información, organización, políticas, seguridad.

Abstract

Information security management within an organization must be a well-defined process, as it involves a huge effort from users, area managers and other servers to know how to respond to suspicious events and how to manage identified vulnerabilities. The objective of this research was to improve information security management in a Peruvian district municipality, through the implementation of a policy model under ISO 27001: 2013. For this, a preexperimental investigation was carried out with a sample of 30 workers, to whom a questionnaire was applied to measure the degree of satisfaction with the implanted model. On average, more than 90 % of those surveyed recognized improvements in the municipality, marking a great difference between the pre and posttest, from 49 % to 96 %. It is concluded that the security policy model, based on three fundamental pillars: confidentiality, integrity, and availability, improved information security management, guaranteeing adequate data protection.

Keywords

Information, management, organization, policies, security.

1 UPeU (Universidad Peruana Unión), Tarapoto, Perú [shonerly.bustamante@upeu.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-8173-203X>].
2 UPeU, Tarapoto, Perú [miguel.valles@upeu.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-8806-2892>].
3 UPeU, Tarapoto, Perú [immerc@upeu.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0001-9381-4203>].
4 UPeU, Tarapoto, Perú [danlev@upeu.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-1783-1105>].

1. Introducción

Las organizaciones utilizan la tecnología como medio para procesar, almacenar y resguardar su información (Miranda et al., 2016), aún más en tiempo de pandemia; la tecnología está jugando un rol fundamental dentro del funcionamiento de sus procesos, pero que, a la vez, estos están sometidos a un elevado número de riesgos y amenazas informáticas (Martínez, 2020).

Toda organización está expuesta cada vez más a amenazas y es vulnerable a cualquier ataque informático (Caamaño y Gil, 2020); es decir, la variedad de amenazas en contra de sus activos puede causar la pérdida, manipulación o la no disponibilidad de la información (Gil y Gil, 2017). Paralelamente, pueden ocasionar cuantiosas pérdidas económicas, tal como dicen Wiley et al. (2020), el Foro Económico Mundial, en 2018, reportó que el 65 % de organizaciones australianas fueron víctimas de ataques, una de cada diez sufrió pérdidas superiores a \$ 1 millón.

La mayoría de los robos o pérdidas de información en Latinoamérica recaen sobre el sector empresarial, pues Aguilar-Antonio (2019) explica que estos incidentes se deben a las insuficientes medidas de protección, lo que causa pérdidas de productividad, credibilidad, competitividad y perjuicios financieros que comprometen la continuidad de la organización.

El uso de políticas basadas en la ISO 27001 mejoran la gestión de la seguridad de la información, pues como argumentan Angulo et al. (2018), ayudan a controlar los procesos de seguridad, garantizando la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información. Por ejemplo, tras el diseño e implantación de un modelo de políticas en las empresas proveedoras de internet en Ecuador se mostró mejoras significativas. Por esta razón, Cueva y Alvarado (2017) señalan que las organizaciones han adoptado nuevas formas de protección de sus activos de información. Para llegar a este punto, la solución óptima se basaría en incrementar los niveles de seguridad y protección de su información, con la implantación de políticas y/o controles de seguridad (Lux, 2018).

Santana y Aspilcueta (2016) dicen que los nuevos desafíos que enfrenta todo país emergente, tal como Perú, hacen que las organizaciones se apoyen en las tecnologías de información para suplir demandas de flexibilidad e incremento de productividad, lo que genera nuevos retos y desafíos de seguridad. Por su lado, Baca (2016) considera que la utilización de políticas y buenas prácticas repercuten significativamente en la gestión de seguridad de la información; como ejemplo menciona la implantación de un modelo de gestión de seguridad en la Unidad Educativa Local de Chiclayo, donde se mejoró el nivel de seguridad tanto en confidencialidad, integridad y disponibilidad de los datos.

Las PYMES peruanas son el foco más vulnerable. En un estudio Porras et al. (2018) afirman que un 41 % poseen probabilidades mínimas para detectar ataques sofisticados. Los principales motivos de dificultad son en un 100 % las limitaciones presupuestarias, y en un 89 % la falta de recursos especializados. Poma y Vargas (2019) informaron que, en un reporte publicado por Kaspersky, en 2019, Perú se encontraba en el puesto número 40, considerado como el país más vulnerable frente a ataques cibernéticos.

En ese contexto, el problema que hemos abordado trata sobre los mecanismos deficientes que tenía la Subgerencia de Recaudación y Fiscalización Tributaria de la Municipalidad Distrital de Morales para garantizar niveles adecuados de seguridad en la información de los dispositivos de cómputo y almacenamiento. Estos mecanismos afectaban el correcto desenvolvimiento y la efectividad en sus operaciones.

Al evaluar los mecanismos de seguridad deficientes, logramos identificar causas, tales como: i) la mínima formación del personal en seguridad de la información. Moreno et al. (2020) consideran que la poca formación del personal ocasiona peligros de gran magnitud; ii) manejo inadecuado de los protocolos destinados a la protección de los dispositivos tecnológicos, lo que causa las fugas de información, así lo afirman Sánchez et al. (2017), incluso afectan la imagen y estabilidad de las organizaciones, y iii) insuficientes medidas en el proceso de instalación de activos informáticos, considerando que estos, en cualquier momento, pueden ser destruidos de manera no autorizada (Valencia et al., 2016).

Aparte de tener procedimientos de protección de la información inadecuadamente definidos, a esto se suma el incumplimiento de algunas políticas implantadas. Castillejos et al. (2016) explican que el incumplimiento de políticas conlleva a exponer información confidencial; asimismo, Tundidor et al. (2018) resaltan la importancia de implantar políticas, normas y procedimientos a fin de prevenir y disminuir los riesgos de pérdida de datos de la organización, ofreciendo información oportuna, clara y veraz.

La poca asignación de presupuesto para proteger los datos en la organización es uno de los principales obstáculos para garantizar un adecuado nivel de seguridad de la información. El limitado presupuesto impide ejecutar medidas orientadas a adoptar controles de seguridad que minimicen el riesgo en el manejo de la información (Diéguez y Cares, 2019).

Las organizaciones públicas, en general, están inmersas en un entorno de riesgos, lo que podría causar pérdidas debido a eventos originados por procesos, personas o tecnología (Crespo, 2017). Las políticas basadas en la Norma ISO 27001 disminuyen estos riesgos, e influyen significativamente en la gestión de seguridad de la información. En ese sentido, con la finalidad de comprobar esta hipótesis, realizamos esta investigación aplicando un modelo cuantitativo por conveniencia.

Nos plantemos como objetivo mejorar la gestión de seguridad de la información en la Subgerencia de Recaudación y Fiscalización Tributaria de la Municipalidad Distrital de Morales, de manera que i) se logró aumentar el nivel confianza de los trabajadores; ii) se garantizó la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información; y se generó la sensibilización del personal sobre la correcta manipulación y resguardo los distintos activos de información.

2. Metodología

En este estudio se empleó un diseño preexperimental y de corte cuantitativo. La población estuvo conformada por todos los trabajadores de la Municipalidad Distrital de Morales que a noviembre de 2020 era un total de 90 trabajadores. La muestra fue de 30 individuos y el muestreo se hizo mediante muestreo no probabilístico aplicando el tipo por conveniencia.

Para cumplir nuestro objetivo de implantación de políticas, el estudio se realizó en pleno acuerdo con el jefe de la Unidad de Informática y Sistemas y demás servidores públicos, quienes se comprometieron de manera responsable a cumplirlas y darles seguimiento.

Se aplicó la técnica de observación directa, mediante visitas programadas y entrevistas con los profesionales encargados de la administración del área informática y usuarios de los sistemas, para el proceso de identificación de los indicadores de gestión de seguridad de la información. Paralelamente, se revisaron los componentes y/o activos de información con los que cuenta la Municipalidad.

La información se recopiló a través de un instrumento para la seguridad de la información, este cuenta con 3 dimensiones y 15 indicadores en escala de Likert, con validez mediante el juicio de expertos igual a 4.73, en la escala del 1 a 5.

El diseño del instrumento se desarrolló con base en las afirmaciones de Valencia-Duque y Orozco-Alzate (2017). Los autores conciben la gestión de seguridad de la información de la siguiente manera: confidencialidad, integridad y disponibilidad. También se tuvo en cuenta el estudio de Peña y Anías (2019), en el que considera prioritaria la incorporación de políticas de seguridad de la información en las organizaciones; asimismo, la investigación de Aguilera et al. (2017), quienes, de manera interesante, aseguran que para garantizar niveles óptimos de seguridad de la información se depende de la implantación de un conjunto de medidas administrativas, operativas y técnicas.

Los datos fueron procesados mediante SPSS v.24, para su posterior tabulación, y obtención de gráficos y datos estadísticos. Del mismo modo, se realizó el análisis de datos y la verificación de la normalidad de los mismos, considerando que los datos tuvieron distribución normal, se aplicó la prueba estadística T de Student, ya que los censados fueron un total de 30 individuos, esto a fin de determinar el grado de variación del modelo de políticas de seguridad implantadas sobre la gestión de seguridad de la información.

3. Resultados y discusión

Políticas de seguridad de la información

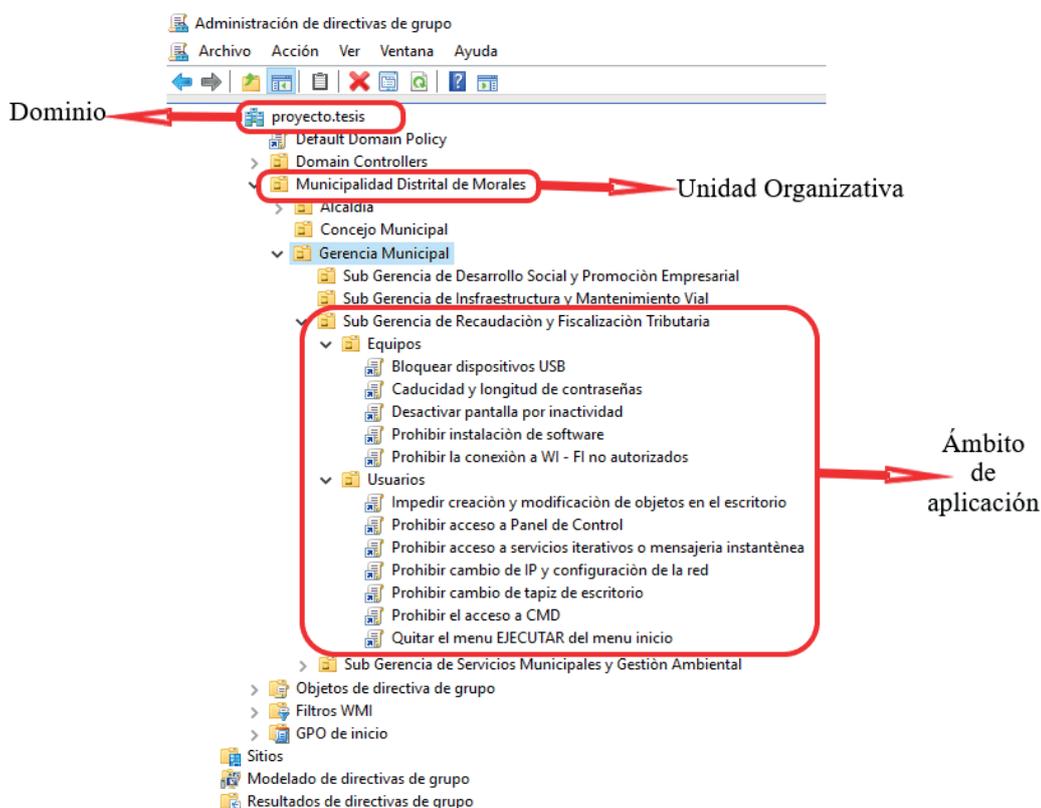
La implantación de políticas se realizó mediante la creación de directivas de grupos (los GPO), por lo que se utilizó en el sistema operativo Windows Server 2016; las directivas fueron ejecutadas bajo un entorno de virtualización, teniendo como cliente Windows 10 para así probar su funcionalidad.

Además, el óptimo funcionamiento de la propuesta, en cuanto al funcionamiento de los dispositivos de cómputo, se garantizó gracias al desarrollo de nuestro *Manual de mantenimiento preventivo de servicios tecnológicos*, además de la reubicación de algunos expuestos a amenazas naturales, conjuntamente con compromisos firmados por el jefe de la Unidad de Informática y Sistemas para garantizar su cumplimiento.

Para lograr mejor comprensión por parte del usuario, y hacer de este pieza fundamental de la gestión de seguridad, se hizo una sensibilización por áreas. Se visitó a los usuarios en sus puestos de trabajo para brindarles información de primera fuente y lograr interactuar, resolver dudas y hacer aclaraciones, a modo de hacer que ellos sean receptivo a las políticas de seguridad de la información; pues, con base en Proaño y Gavilanes (2018), es una de las estrategias fundamentales para el cumplimiento de medidas de seguridad.

La estructura de descomposición, que a continuación se ve en la Figura 1, representa la forma en que se han operado y organizado nuestras Políticas de Grupo (GPO), teniendo como dominio a proyecto.tesis y Unidad Organizativa a Municipalidad Distrital de Morales, dentro del cual se encuentra la muestra o ámbito de aplicación a la Subgerencia de Recaudación y Fiscalización Tributaria, dividida en Usuarios y Equipos, considerando que para crear cada GPO se ha mantenido un estricta inclinación hacia la ISO 27001: 2013 y, por sobre todo, los criterios utilizados se basaron en garantizar la integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información.

Figura 1. Estructura de descomposición de GPO



Martelo et al. (2018) afirman que se debe controlar ciertas acciones para evitar ocasionar agujeros en la seguridad de la información y así controlar los flujos de entrada/salida de datos. Estas acciones son, por ejemplo, acceso a Panel de Control, a servicios iterativos o mensajería instantánea, al símbolo del sistema (CMD) y al menú EJECUTAR del menú inicio. Además, el uso de dispositivos extraíbles, la caducidad y longitud de contraseñas, e instalación no controlada de *software* puede introducir vulnerabilidades que pueden provocar fugas de información, pérdida de integridad u otros incidentes de seguridad (Hernández y Porven, 2016). Gonzáles et al. (2016) también explican que restringir conexiones a cualquier tipo de red, permite garantizar un nivel aceptable de seguridad de datos que se genera y se transmite.

Gestión de la seguridad de la información

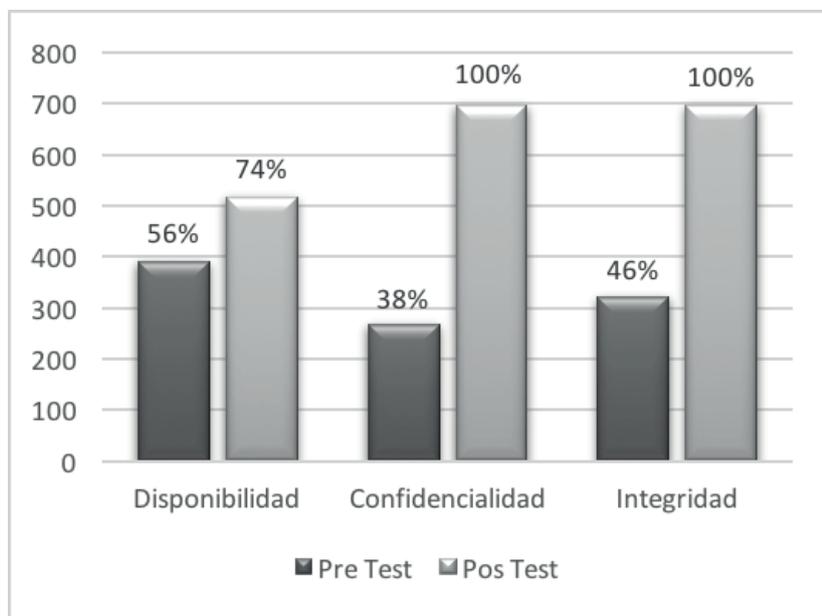
En la Tabla 1, se observa la normalidad del test, para ello se utilizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk, debido a que la muestra fue un total de 30 individuos. Se concluyó que los datos siguen una distribución normal, dado a que el valor de p es mayor a 0.05.

Tabla 1. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

	Estadístico	gl	p
Pretest	0.945	30	0.121
Posttest	0.941	30	0.099

Para evaluar la influencia de las políticas sobre la gestión de seguridad de la información, se consideraron tres pilares o dimensiones fundamentales: la disponibilidad, confidencialidad e integridad, a fin de garantizar un adecuado resguardo de los datos.

Figura 2. Gestión de seguridad de la información a nivel de dimensiones



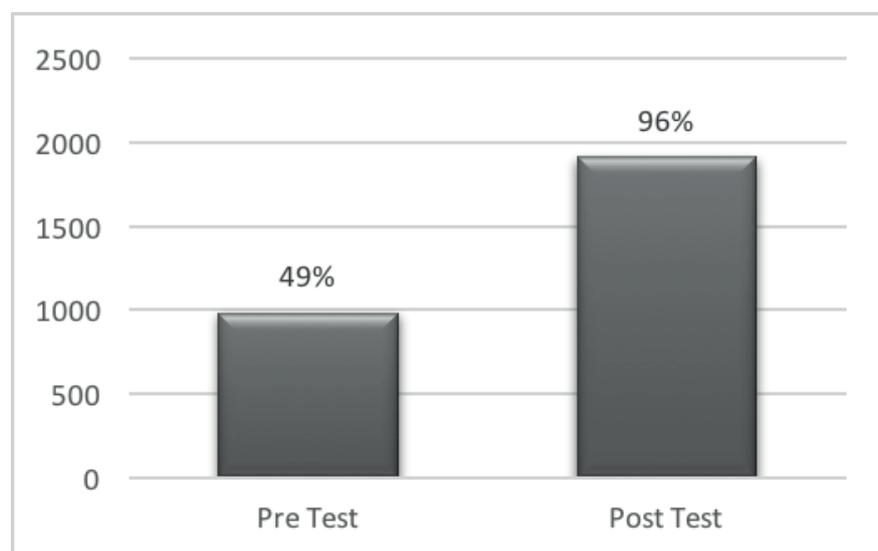
Se aprecia que, en general, existe un resultado favorable luego de implantar las políticas de seguridad, porque, en promedio, más del 90 % de los encuestados reconoció las mejoras exitosas en la municipalidad. Se debe considerar que el análisis de los datos se hizo mediante prueba estadística t de student, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Prueba t por cada dimensión del pre y postest

Dimensión	Test	t	gl	p
Disponibilidad	Pre-Post	-30.224	29	0.000
Confidencialidad	Pre-Post	-42.562	29	0.000
Integridad	Pre-Post	-11.750	29	0.000

Con base en la Tabla 2, se puede decir que hay una mejor protección de la información, porque el valor que obtiene p para disponibilidad, confidencialidad e integridad es menor a 0.05, tal como señalan Angulo et al. (2018) en su investigación, así como Cordoví et al. (2019), donde p obtuvo los mismo valores en estas dimensiones luego de haber implantado un modelo de políticas.

En la Figura 2 se muestra la diferencia significativa entre el pre-test y el post-test, pues Flores-Ruiz et al. (2017) sostienen que para comprobar las mejoras en investigaciones preexperimentales, se debe obtener cierta variación entre la evaluación inicial y la evaluación final.

Figura 3. Diferencia entre el pre y post-test

Lo anterior se debe interpretar de manera muy cuidadosa, porque, en términos generales, significa que la implantación de políticas cumplió un rol fundamental mejorando el nivel de seguridad de la información, tal como en una investigación Baca (2016) llevada a cabo en Chiclayo, donde la implantación de políticas repercutió significativamente en la gestión de la información, luego de obtener una gran diferencia entre la pre y postevaluación.

Tabla 3. Prueba t del pre y post-test

	t	gl	p
Pre-Post	-54.197	29	0.000

Los datos de la Tabla 3 permiten corroborar que se ha cumplido con nuestro objetivo planteado, porque las políticas de seguridad implantadas mejoraron la gestión de seguridad de la información dentro de la Subgerencia de Recaudación y Fiscalización Tributaria. Esto se debe eventualmente a que el valor que obtiene p es menor a 0.05, por lo cual se presenta el Modelo de políticas a partir de una visión estratégica y teniendo en cuenta las teorías de Szczepaniuk et al. (2020) y Gibert, et al. (2020).

Modelo de políticas de Seguridad de la Información según ISO 27001: 2013

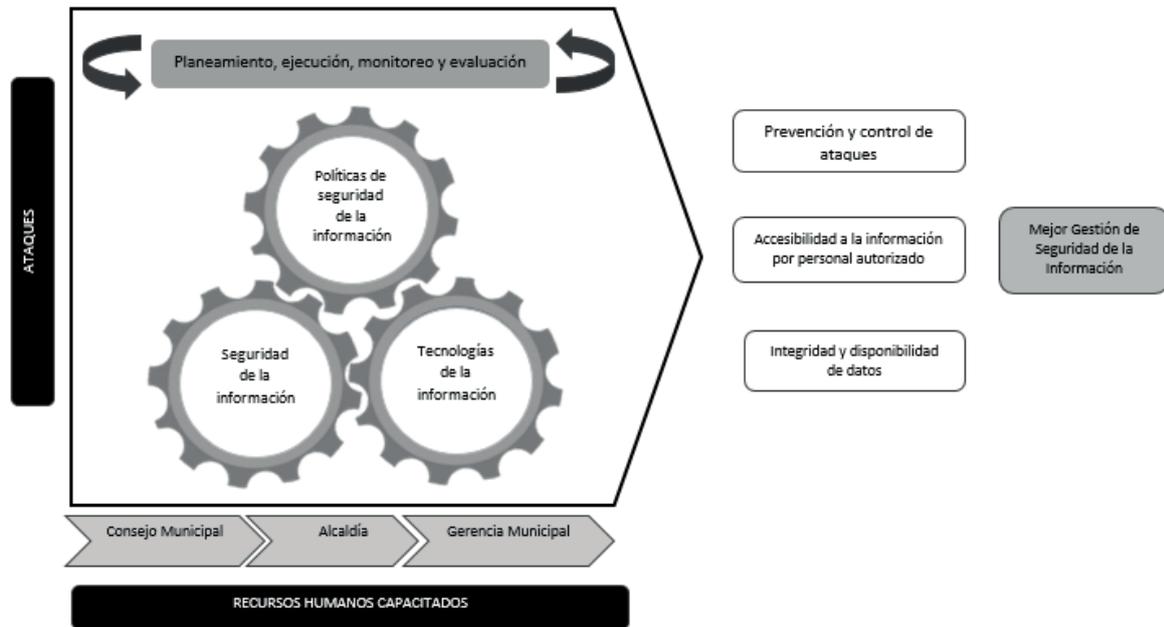
La Municipalidad Distrital de Morales tiene una enorme responsabilidad de brindar a sus ciudadanos una atención de calidad, donde la información que se maneje y que se requiera esté siempre a su alcance. Esta tarea está íntimamente ligada a la protección de la información, puesto que las organizaciones de hoy están tratando de encontrar nuevas formas de abordar adecuadamente las cuestiones de seguridad (Gil y Gil, 2017).

En ese sentido, Paananen et al. (2020) manifiestan la necesidad de implantar políticas de seguridad de la información en toda organización, pues es uno de los mecanismos eficaces para preservar la integridad, confidencialidad y disponibilidad, para brindar confianza a las personas que se benefician de los servicios. Peña y Anías (2019) creen que la implantación de políticas de

seguridad de la información en las organizaciones trae mejoras considerables en el proceso del negocio, reduciendo costos y garantizando un adecuado resguardo de datos.

En la Figura 4 se plantea el Modelo de Políticas de Seguridad de la Información que, aplicando una visión estratégica, se cumplió con los objetivos de la municipalidad. Además, se considera que estos elementos permitieron, entre otras cosas, resguardar la información y mejorar la gestión de seguridad de la institución.

Figura 4. Modelo de Políticas de Seguridad de la Información



El modelo anterior fue creado para mejorar los deficientes mecanismos y garantizar niveles adecuados de seguridad en la información de los dispositivos de cómputo y almacenamiento, cuyas vulnerabilidades fueron detectadas en la fase diagnóstica de esta investigación. En ese sentido, la implantación de políticas para afrontar los posibles problemas de seguridad ayuda a proteger la integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información Kaleem et al. (2016).

5. Conclusiones y recomendaciones

En función de los resultados de la prueba estadística t de Student, mostrada en la Tabla 2, se concluye que el estudio ha logrado mejorar la gestión de seguridad de la información, basándose en los tres pilares fundamentales que son i) confidencialidad, que busca garantizar que la información no sea divulgada a personas o sistemas no autorizados; ii) integridad, mantener inalterable la información ante accidentes o intentos maliciosos; y iii) disponibilidad, brindar accesibilidad a la información en el momento y en la forma en que los usuarios autorizados lo requieran.

La implantación del modelo de Políticas de Seguridad de la Información basadas en las Norma ISO 27001: 2013 se llevó a cabo de manera satisfactoria. Estas políticas se encuentran alojadas en un entorno de virtualización en Windows Server 16 y documentadas en manuales y compromisos que fueron entregados directamente al jefe de Informática y Sistemas para garantizar el cumplimiento de cada política.

Se identificaron los indicadores que repercuten directamente en la gestión de seguridad de la información; además, las políticas fueron estructuradas adecuadamente con la descomposición de las Políticas de Grupo (GPO), en dominio, Unidad Organizativa y ámbito de aplicación, tal como se muestra en la Figura 1.

En consecuencia, podemos afirmar que el Modelo de Políticas de Seguridad de la Información implantado influyó positivamente en la gestión de seguridad de la información dentro de la Subgerencia de Recaudación y Fiscalización Tributaria de la Municipalidad Distrital de Morales.

El modelo se ha diseñado de tal manera que pueda ser replicado en cualquier municipalidad por lo que, en función de los resultados auspiciosos encontrados, recomendamos su aplicación tomando en cuenta las características y realidades de las instituciones donde se pretende implantar.

Referencias

- Aguilar-Antonio, J.-M. (2019). Hechos ciberfísicos: Una propuesta de análisis para ciberamenazas en las estrategias nacionales de ciberseguridad. *URVID. Revista Latinoamericana de Estudios de Seguridad*, 4299(25), 24–40. <https://doi.org/10.17141/urvio.25.2019.4007>
- Aguilera, O., Pérez, E., & Rivero, R. (2017). La protección de la información: Una visión desde las entidades educativas cubanas. *Ciencias de la Información*, 48(3), 41–47. <https://www.redalyc.org/pdf/1814/181457243006.pdf>
- Angulo, N., Zambrano, M., García, G., & Bolaños-Burgos, F. (2018). Propuesta metodológica de seguridad de información para proveedores de servicios de internet en Ecuador. *MIKARIMIN. Revista Científica Multidisciplinaria*, 4(4), 165–176. <http://45.238.216.13/ojs/index.php/mikarimin/article/view/1197>
- Baca, V. (2016). Diseño de un sistema de gestión de seguridad de información para la unidad de gestión educativa local-Chiclayo. *Ingeniería. Ciencia, Tecnología e Innovación*, 3(1), 16. <http://revistas.uss.edu.pe/index.php/ING/article/view/357/346>
- Caamaño, E., & Gil, R. (2020). Prevención de riesgos por ciberseguridad desde la auditoría forense: Conjugando el talento humano organizacional. *Novum*, 1(10), 20. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/novum/article/view/84210/73652>
- Castillejos, B., Torres, C., & Lagunes, A. (2016). La seguridad en las competencias digitales de los *millennials*. *Apertura*, 8(2), 54–69. <http://www.scielo.org.mx/pdf/apertura/v8n2/2007-1094-apertura-8-02-00054.pdf>
- Cordoví, V., Pardo, M., Rodríguez, N., & López, E. (2019). La gestión de información estadística relacionada con las actividades formativas en la Universidad Virtual de Salud. *Medisan*, 23(4), 715–727. <http://www.medisan.sld.cu/index.php/san/article/view/2214/pdf>
- Crespo, E. (2017). Ecu@Risk, una metodología para la gestión de riesgo aplicada a las MPYMES. *Enfoque UTE*, 8(1), 107–121. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n1.140>
- Cueva, M., & Alvarado, D. (2017). Análisis de Certificados SSL/TLS gratuitos y su implementación como mecanismo de seguridad en servidores de aplicación. (Analysis of Free SSL/TLS Certificates and Their Implementation as Security Mechanism in Application Servers). *Enfoque UTE*, 8(1), 14. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n1.128>
- Diéguez, M., & Cares, C. (2019). Comparación de dos enfoques cuantitativos para seleccionar controles de seguridad de la información. *RISTI. Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, 32, 16. <http://www.scielo.mec.pt/pdf/risti/n32/n32a09.pdf>
- Flores-Ruiz, E., Miranda-Navales, M., & Villasis-Keever, M. (2017). El protocolo de investigación VI: Cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Estadística inferencial. Rev Alerg Mex*, 64(3), 364–370. <http://www.scielo.org.mx>

- Gil, V., & Gil, J. (2017). Seguridad informática organizacional: Un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas. *Scientia et Technica* Año XXII, 22(2). <https://www.redalyc.org/pdf/849/84953103011.pdf>
- González, A., Beltrán, D., & Fuentes, E. (2016). Propuesta de protocolos de seguridad para la red inalámbrica local de la Universidad de Cienfuegos. *Revista Científica Universidad y Sociedad*, 8(4), 8. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v8n4/rus17416.pdf>
- Hernández, A., & Porven, J. (2016). Procedimiento para la seguridad del proceso de despliegue de aplicaciones web. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 10(2), 15. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcci/v10n2/rcci04216.pdf>
- Kaleem, M., Burnap, P., & Rana, O. (2016). Identifying Cyber Risk Hotspots: A Framework for Measuring Temporal Variance in Computer Network Risk. *Computers and Security*, 57, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2015.11.003>
- Lux, L. (2018). Elementos criminológicos para el análisis jurídico-penal de los delitos informáticos. *Revista Ius et Praxis*, 24(1), 159–206. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/iusetp/v24n1/0718-0012-iusetp-24-01-00159.pdf>
- Martelo, R., Tovar, L., & Maza, D. (2018). Modelo básico de seguridad lógica . Caso de Estudio: El laboratorio de redes de la Universidad de Cartagena en Colombia. *Información Tecnológica*, 29(1), 3–10. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100003>
- Martínez, F. (2020). Ciberseguridad y Estado autonómico. *ICADE. Revista de la Facultad de Derecho*, 109, 1–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.14422/icade.i109.y2020.001>
- Miranda, M., Valdés, O., Pérez, I., Portelles, R., & Sánchez, R. (2016). Metodología para la implementación de la gestión automatizada de controles de seguridad informática. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 10(2), 14–26. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcci/v10n2/rcci02216.pdf>
- Moreno, J., Rodríguez, C., & Leguías, I. (2020). Revisión sobre propagación de *ransomware* en sistemas operativos Windows. *I+D Tecnológico*, 16(1), 7. <https://doi.org/10.33412/idt.v16.1.2438>
- Paananen, H., Lapke, M., & Siponen, M. (2020). State of the Art in Information Security Policy Development. *Computers and Security*, 88, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101608>
- Peña, M., & Anías, C. (2019). Sistema para ejecutar políticas sobre infraestructuras de Tecnologías de la Información: ITpolicies execution system. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 479–494. <https://scielo.conicyt.cl>
- Poma, A., & Vargas, R. (2019). Problemática en ciberseguridad como protección de sistemas informáticos y redes sociales en el Perú y en el mundo. *Sciéndu*, 22(4), 8. <https://doi.org/10.17268/sciendudo.2019.034>
- Porrás, J., Pastor, S., & Alvarado, R. (2018). Modelo de gestión de riesgos de seguridad de la información para PYMES peruanas. *Revista Peruana de Computación y Sistemas*, 1(1), 47–56. <http://dx.doi.org/10.15381/rpcs.v1i1.14856>
- Proaño, R., & Gavilanes, A. (2018). Estrategia para responder a incidentes de inseguridad informática ambientado en la legalidad ecuatoriana. *Enfoque UTE*, 9(1), 90–101. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n1.229>
- Sánchez, N., Pulido, B., & Camacho, J. (2017). La significativa evolución en seguridad de la información para la Policía Nacional de Colombia. *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, 9(1), 7. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=517752178018>
- Santana, M., & Aspilcueta, H. (2016). Prioridades de gestión de tecnologías de información en organizaciones peruanas. *Revista Venezolana de Gerencia*, 20(72), 684–697. <https://doi.org/10.31876/revista.v20i72.20926>
- Szczepaniuk, E., Szczepaniuk, H., Rokicki, T., & Klepacki, B. (2020). Information Security Assessment in Public Administration. *Computers and Security*, 90, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101709>

- Tundidor, L., Nogueira, C., & Medina, C. (2018). Exigencias y limitaciones de los sistemas de información para el control de gestión organizacional. *Universidad y Sociedad*, 10(1), 7. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v10n1/2218-3620-rus-10-01-8.pdf>
- Valencia-Duque, F., & Orozco-Alzate, M. (2017). Metodología para la implementación de un sistema de gestión de seguridad de información basado en la familia de normas ISO/IEC 27000. *RISTI. Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, 22, 16. <https://doi.org/10.17013/risti.22.73-88>
- Valencia, F., Marulanda, C., & Trujillo, M. (2016). Gobierno y gestión de riesgos de tecnologías de información y aspectos diferenciadores con el riesgo organizacional. *Revista Gerencia Tecnológica Informática*, 15(2015), 13. <https://biblat.unam.mx>
- Wiley, A., McCormac, A., & Calic, D. (2020). More Than the Individual: Examining the Relationship Between Culture and Information Security Awareness. *Computers and Security*, 88, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101640>

Eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante lombrifiltros (*Eisenia foetida*) en aguas residuales domésticas para zonas rurales

(Efficiency in the removal of organic matter by wormfilters (*Eisenia foetida*) in domestic wastewater for rural areas)

Jonathan Gustavo Castillo Sánchez¹, Jessica Estefanía Chimbo Solórzano²

Resumen

El inadecuado manejo de las aguas residuales domésticas en zonas rurales vertidas en cuerpos hídricos sin previo tratamiento constituye un gran problema de polución ambiental, así como un riesgo para la salud pública. El propósito del este estudio fue evaluar la eficiencia de la remoción de materia orgánica mediante lombrifiltros en las aguas residuales domésticas de una zona rural. En condiciones experimentales, se diseñó el lombrifiltro utilizando como base teórica el sistema de tratamiento Tohá —creado por el Dr. José Tohá— conformado por cuatro estratos: aserrín + *Eisenia foetida*, carbón activado, grava y piedras de río. Se evaluó la concentración de materia orgánica del afluente obteniendo elevadas concentraciones de DBO₅, DQO, SST y ST. T₁ alcanzó los mayores porcentajes de eficiencia con un flujo volumétrico de 1.8×10^{-2} l/s y TRH de 0.92 h obteniendo 52.25 % para DBO₅ y DQO, 66.74 % de SST y 52.91 % de ST. De esta manera, se determinó que la utilización de lombrifiltros a base de *Eisenia foetida* para remover la materia orgánica representa un sistema de tratamiento ecológico e innovador que requiere una baja inversión, es eficiente y amigable con el ambiente.

Palabras clave

Lombrifiltro, *Eisenia foetida*, aguas residuales domésticas, caudal, eficiencia.

Abstract

Inadequate management of domestic wastewater in rural areas, the discharge of which to water bodies without prior treatment, is a major problem of environmental pollution, as well as a risk to public health. The purpose of this study was to assess the efficiency in the removal of organic matter by wormfilters in domestic wastewater in a rural area. Under experimental conditions, the wormfilter was designed using as a theoretical basis the Tohá treatment system, created by Dr. José Tohá, which consisted of four strata: sawdust + *Eisenia foetida*, activated charcoal, gravel and river stones. The concentration of organic matter of the tributary was evaluated obtaining high concentrations of BOD₅, COD, TSS and TS. T₁ achieved the highest efficiency percentages with a volumetric flow of 1.8×10^{-2} l/s and TRH of 0.92 h obtaining 52.25 % for BOD₅ and COD, 66.74 % TSS and 52.91 % TS. In this way, it was determined that the implementation of wormfilters based on *Eisenia foetida* for the removal of organic matter, represents an ecological and innovative treatment system that requires a low investment, is efficient and friendly to the environment.

Keywords

Worm filter, *Eisenia foetida*, domestic wastewater, flow, efficiency.

1 Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Calceta, Ecuador [jonathan.castillo@espam.edu.ec, https://orcid.org/0000-0002-9932-7868].

2 Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Calceta, Ecuador [jessica.chimbo@espam.edu.ec, https://orcid.org/0000-0001-9424-3430].

1. Introducción

Actualmente, con la rápida urbanización y el crecimiento acelerado de la población, uno de los principales problemas de contaminación es el inadecuado manejo de las aguas residuales domésticas cuya descarga a cuerpos de agua y su reutilización sin un tratamiento previo representa un problema de contaminación de los recursos hídricos, pérdida de ecosistemas y un potencial riesgo para la salud pública (Cáceres et al., 2018; Yang et al., 2020). El 90 % de las aguas residuales se vierten a los sistemas de agua sin tratamiento en los países en desarrollo. Los estudios demuestran que cada año se vierten al agua unas 730 megatoneladas de residuos procedentes de las aguas residuales y otros vertidos (Priya et al., 2021). En 2016, el tratamiento de las aguas residuales domésticas en las aldeas rurales de China era menos del 17.4 % (NBS, 2017). La gran inversión requerida para instalar un sistema de tratamiento de aguas residuales convencional, el alto consumo de energía y los costos de mantenimiento y operación son las principales razones por las que esta alternativa no tiene éxito en comunidades rurales de países latinoamericanos, como en el caso de Ecuador (De Anda, 2017). En efecto, un elevado número de familias descargan sus aguas residuales directamente en el suelo o en los cuerpos de agua sin previo tratamiento, ocasionando así una polución ambiental y consecuentemente afectaciones en la salud (Dharwal et al., 2020; Reyes, 2016).

Las diferencias marcadas en los aspectos socioeconómicos, ambientales y tecnológicos reducen considerablemente el acceso a sistemas o instalaciones mínimas necesarias para depurar las aguas residuales, específicamente, en las zonas rurales (Lohani et al., 2020). Por tal motivo, hay una necesidad urgente de emplear alternativas innovadoras, eficientes y económicas para tratar estas aguas (Sosa et al., 2014; Tejada et al., 2018). La vermifiltración y especialmente el Sistema Tohá, a partir de lombrifiltros, son los procesos de tratamiento de aguas residuales mediante una acción conjunta de lombrices de tierra y microorganismos, minimizando considerablemente la carga orgánica del agua, así como otros contaminantes físicos, químicos y biológicos (Ramón et al., 2015).

Es decir, es una extensión del proceso de vermicompostaje; es un biofiltro donde las lombrices de tierra digieren las partículas en suspensión tamizadas en el lecho filtrante y degradan la materia orgánica mediante actividad enzimática y en proceso de ingestión; airean pasivamente el sistema mediante la acción de excavación y eliminan los patógenos (Sudipti & Sakshi, 2021). De tal manera, podría ser una tecnología ideal para tratar los efluentes industriales y domésticos, por sus características rentables y ecológicamente sostenibles (Singh et al., 2017).

Debido a que existe una escasez de métodos naturales utilizados como alternativas para tratar las aguas residuales domésticas en zonas rurales de Manabí, este estudio busca diseñar e implementar un sistema de tratamiento ecológico e innovador basado en lombrifiltros con *Eisenia foetida* que requieran una baja inversión, que sean eficiente y amigables con el ambiente.

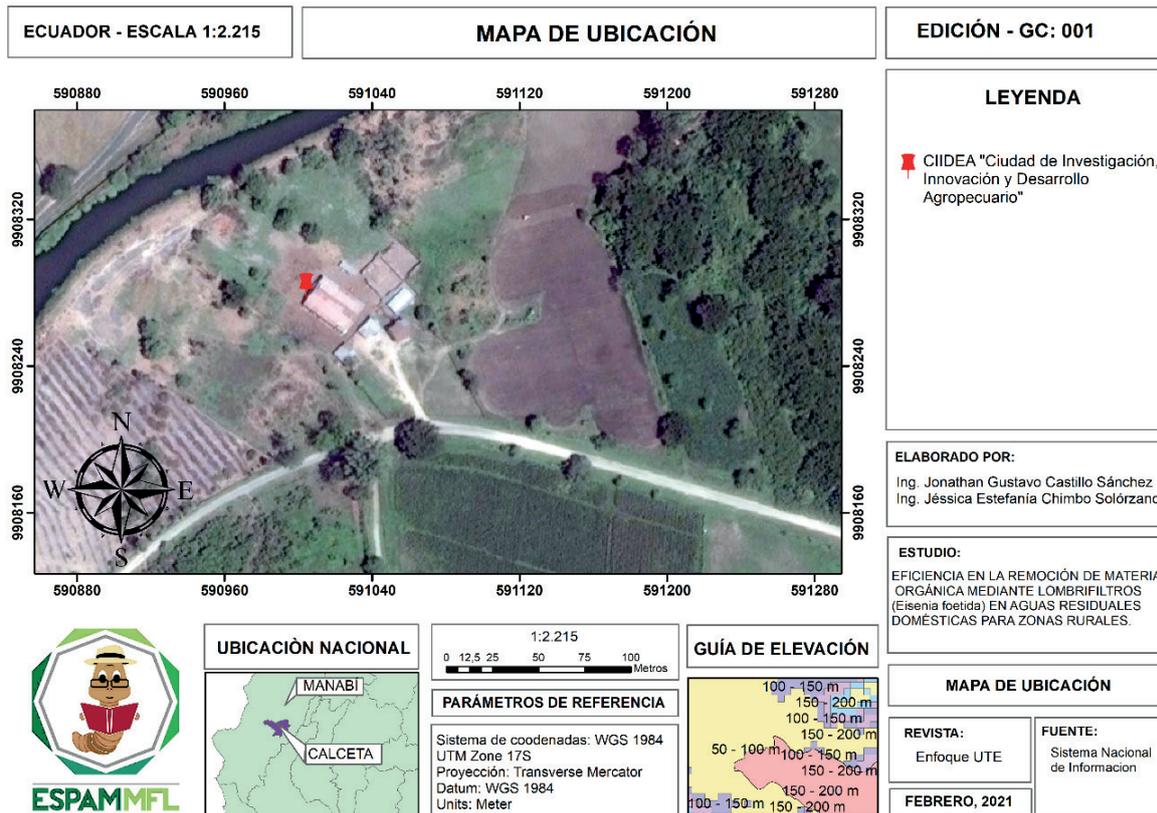
2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

Tal como se muestra en la Figura 1, el estudio se llevó a cabo en CIIDEA (Ciudad de Investigación, Innovación y Desarrollo Agropecuario) de la ESPAM MFL (Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López), situada en el sitio El Limón, parroquia Calceta (Bolívar,

Manabí). Los análisis de laboratorio se hicieron en el laboratorio de Química Ambiental del Área Agroindustrial de la ESPAM MFL y en el de Investigación de la Universidad de las Américas (Quito). Las muestras de agua fueron tomadas de la comunidad El Limón Adentro, parroquia Calce-ta, cantón Bolívar, provincia de Manabí.

Figura 1. Mapa de ubicación



2.2. Diseño experimental

Se elaboró un diseño experimental completamente al azar con un solo factor (agua residual doméstica), contando con tres tratamientos y con tres repeticiones, donde se obtuvo un total de nueve unidades experimentales, las cuales son las muestras del agua residual doméstica tratada (Tabla 1). Estos tratamientos están constituidos por el caudal (l/s) que es manipulado con diferentes aperturas de la válvula de control, la que pudiera influir directamente en el tiempo de retención hidráulico medido en horas. Asimismo, se hicieron pruebas de Tukey y gráficos estadísticos mediante el *software* InfoStat y Microsoft Excel.

Tabla 1. Diseño experimental

Tratamiento	Unidades experimentales	Apertura de la válvula de control
T ₁	R ₁	25 %
	R ₂	
	R ₃	
T ₂	R ₁	50 %
	R ₂	
	R ₃	
T ₃	R ₁	100 %
	R ₂	
	R ₃	

2.3. Toma de muestras del agua residual doméstica

La toma de muestras se llevó a cabo en una vivienda de la comunidad El Limón Adentro, parroquia Calceta, cantón Bolívar, provincia de Manabí. Esta se hizo a las 14h00, ya que García (2012) recomienda tomar las muestras en las horas donde existe mayor actividad y movimiento de las personas, para que la concentración de la materia orgánica del agua residual sea la adecuada para el tratamiento.

El procedimiento utilizado para el muestreo se hizo con base en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2176:2013 (Agua. Calidad del agua, 2013b), para lo cual fue necesario purgar los envases tres veces antes de recolectar la muestra. Se transportaron las muestras en un *cooler* y fueron almacenadas, en refrigeración, a 4 °C, de las cuales 5 l fueron utilizados para el análisis en laboratorio, 10 l para el proceso de adaptación del material biológico (*Eisenia foetida*) y 60 l fueron utilizados para el tratamiento en el lombrifiltro.

El tipo de recipiente que se utilizó para la toma de muestras fue seleccionado de acuerdo con la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:2013 (Agua. Calidad del agua, 2013a), establecidos en la Tabla 1: Técnicas generales para la conservación de muestras - análisis físico-químico.

2.4. Diseño y construcción del lombrifiltro

El lombrifiltro fue diseñado con base en el estudio realizado por Ramón et al. (2015) quienes indican que se tiene un tanque alimentador de 60 l, el cual vierte en el lombrifiltro el agua residual. El agua pasa por un tubo de PVC agujerado para crear un caudal continuo y estable. De esta manera, el agua residual pudo ser repartida homogéneamente al sustrato del lombrifiltro. Considerando el estudio de Samal et al. (2018), en el diseño se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: caudal, tiempo de retención hidráulico, profundidad, ancho y largo de la caja, y altura del sistema.

Los lechos fueron clasificados de la siguiente forma: aserrín con lombriz, seguido de un lecho con carbón activado, pasando luego por un lecho de grava, para finalmente colocar un le-

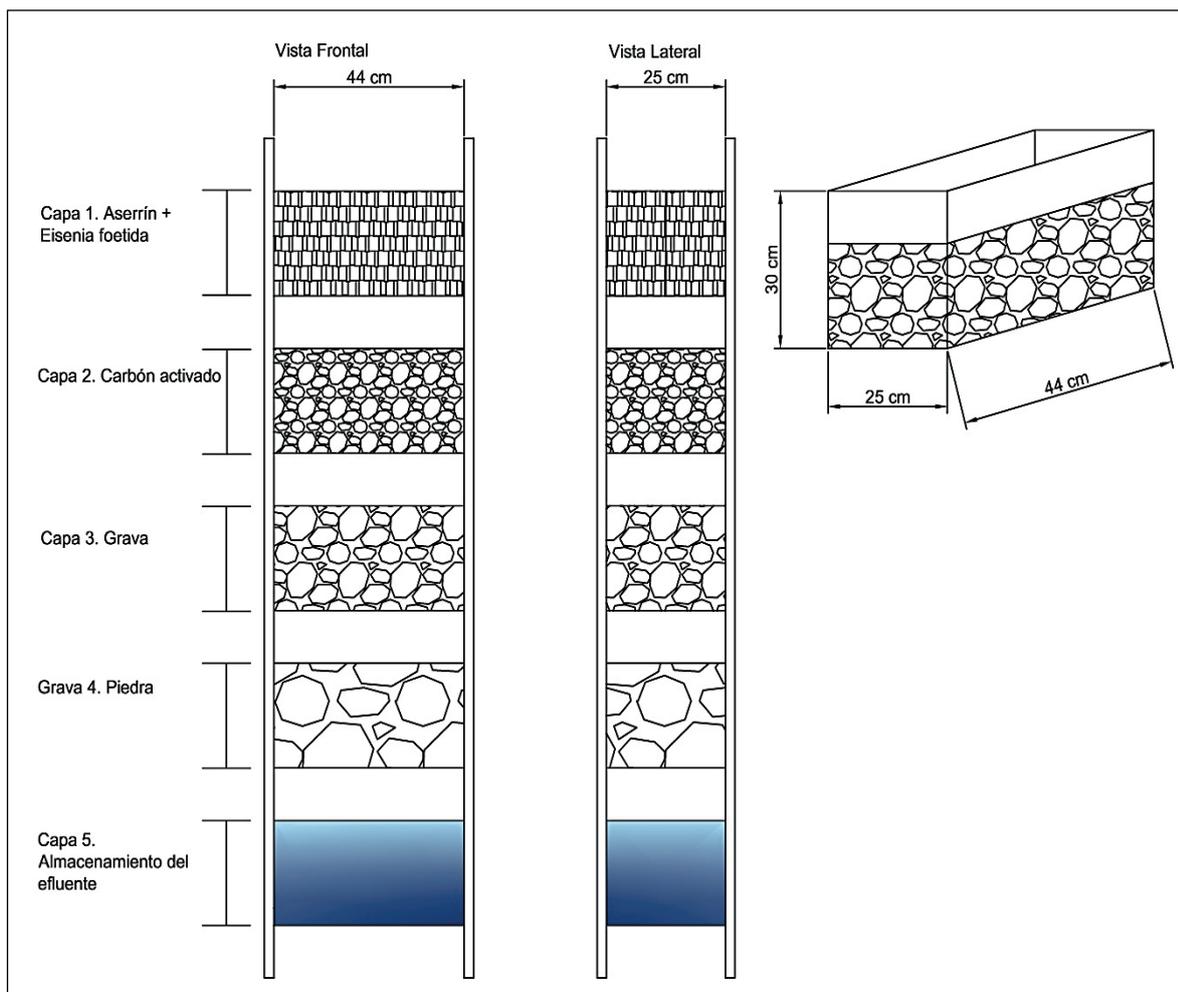
cho de piedra de río; permitiendo filtrar y oxigenar el líquido sin que genere malos olores. Debido a que el proceso es aerobio, el agua filtrada por cada uno de los lechos filtrantes se recolectó en el último recipiente que fue usado para la toma de muestras de laboratorio.

La altura de las capas del lombrifiltro se calculó con la ecuación propuesta por Coronel (2015):

$$h = \frac{\% \text{ total del estrato} * \text{altitud útil del lombrifiltro}}{100}$$

En la Figura 2 se muestran las dimensiones del lombrifiltro, donde las medidas internas respectivamente son las siguientes: ancho 25 cm, largo 44 cm y altura 25 cm. Para ello se tomó en cuenta el estudio de Salazar (2005), en el que se recomienda que la parte biológica debe contener el mayor porcentaje; por lo tanto, se dispuso de un 40 % para la primera capa de material biológico (*Eisenia foetida*+aserrín), seguido de un 20 % para los estratos de carbón activado, grava y piedra.

Figura 2. Diseño del lombrifiltro



2.5. Adaptación de *Eisenia foetida* al agua residual doméstica

Las lombrices fueron recolectadas de las camas de lombricultura de CIIDEA-ESPAM MFL. Se hizo una excavación de aproximadamente 30 cm de profundidad, de donde se las recolectó, mediante una lampa, y, luego, se las separó de la tierra que se encontraba impregnada en las ellas. Se utilizó 1 kg de lombrices para el proceso de remoción.

Antes de colocar a las lombrices *Eisenia foetida* en el lombrifiltro para iniciar el proceso tratamiento de las aguas residuales, fue necesario que pasen por un proceso de aclimatación para que logran adaptarse, de manera progresiva, a estar en contacto con las aguas residuales; de lo contrario, exponerlas de manera directa dañaría la epidermis de las lombrices, incluso podrían experimentar cambios bruscos de su entorno o hábitat que afecten su metabolismo (Figura 3).

Con base en la investigación de Loro (2018), el proceso de adaptación fue de 10 días. Este consistió en regar diariamente 1 l de agua residual doméstica a una caja con sustrato (humus) donde habitaban todas las lombrices; dicha caja tenía agujeros en la base y una malla plástica tipo Raschell, para evacuar el exceso de agua por infiltración, pero, a su vez, mantenía húmedo el sustrato necesario para la respiración de las lombrices.

Guzmán et al. (2020) recomiendan que en este periodo de aclimatación se debe evaluar la reproducción y el acondicionamiento de las lombrices *Eisenia foetida* en el sustrato orgánico que se utilizará, controlando su pH, porcentaje de humedad y temperatura.

Figura 3. Adaptación de la *Eisenia foetida*



2.6. Medición del caudal y tiempo de retención hidráulico (TRH)

Para la medición del caudal se empleó el método volumétrico. Se abrió la llave de control del tanque alimentador y se colocó un recipiente de 1 l debajo de las tuberías que asperjan el agua,

se recolectó el agua residual durante 1 minuto y se retiró el recipiente con el agua recolectada. Posteriormente, se midió la cantidad de agua residual recolectada; esta acción se repitió tres veces para obtener resultados más acertados. Los tiempos de retención hidráulico (TRH) fueron medidos como el tiempo que demora el agua en pasar por el estrato e iniciar su aparición en el fondo de este, empleando cada uno de los caudales seleccionados. Para ello se utilizó la ecuación propuesta por Coronel (2015):

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

2.7. Determinación de la eficiencia (porcentaje de remoción)

Para evaluar el funcionamiento del prototipo biológico compuesto de *Eisenia foetida*, se determinó el porcentaje de eficiencia de los parámetros analizados con la ecuación propuesta por Caicedo (2017), la cual es la siguiente:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{(\text{Concentración inicial}) - (\text{Concentración final})}{(\text{Concentración inicial})} * 100$$

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del agua residual doméstica

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la caracterización inicial del afluente, junto con los criterios de límites máximos permisibles para descargas en cuerpos de agua dulce establecidos en el Anexo 1 TULSMA: Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes al recurso agua, Tabla 9: Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce.

Tabla 2. Características fisicoquímicas del agua residual doméstica previa a tratamiento

Parámetro	Unidad	Valor obtenido	LMP
DBO ₅	mg/l	74	100
DQO	mg/l	130.59	200
SST	mg/l	1468	130
ST	mg/l	1987	1600
pH		6.90	6-9
Temperatura	°C	22.2	Condición natural ±3

Nota: Reforma del Texto Unificado de Legislación (2015)

Se puede constatar que el agua residual doméstica sin tratar presentó un valor de DBO₅ y DQO igual a 74 y 130.59 mg/l respectivamente, es decir, se encuentra dentro del límite máximo permisible que establece la normativa ambiental vigente del Ecuador. Sin embargo, los sólidos

suspendidos y sólidos totales se encontraron por encima del límite establecido, con valores de 1468 y 1987 mg/l respectivamente. Además, el pH del agua se encuentra dentro del rango 6-9 al igual que la temperatura con 22.2 °C.

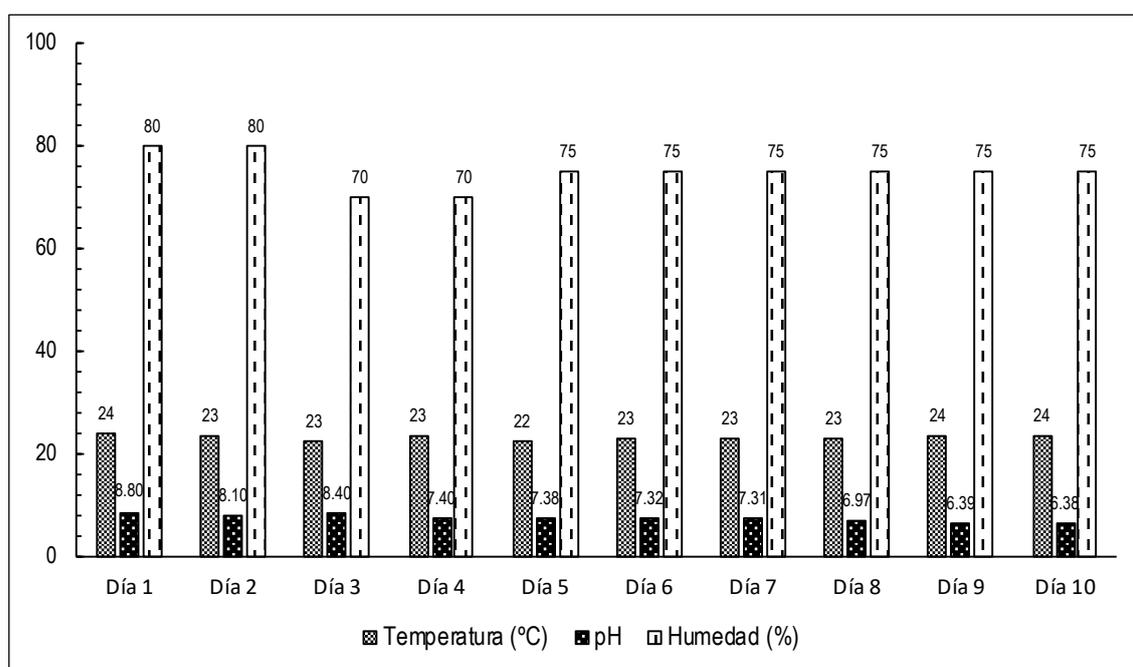
En consecuencia, a pesar de que se encuentra por debajo del límite máximo permisible para DBO₅ y DQO, la acumulación diaria de este tipo de agua residual doméstica representa un grave problema, porque la presencia de materia orgánica en exceso y organismos patógenos, así como su constante acumulación, podrían traer como resultado la aparición de enfermedades en los habitantes que residen en la zona de estudio. De acuerdo con Sosa et al. (2014), la ausencia de personal capacitado y los elevados costos de operación y mantenimiento que no permiten un tratamiento a tiempo de estas aguas podrían ocasionar contaminación ambiental y afectaciones en la salud.

Además, con base en la clasificación propuesta por Metcalf y Eddy (1995), en la cual se detalla la composición típica de un agua residual doméstica, se explica que las características iniciales del afluente sin tratamiento corresponden a un agua residual de concentración baja para DBO₅ y DQO, así como de concentración alta en cuanto a los sólidos totales y suspendidos.

3.2. Adaptación de *Eisenia foetida* al agua residual doméstica

En la Figura 4 se muestran los resultados del proceso de adaptación de la lombriz *Eisenia foetida* durante diez días. Se puede observar que la temperatura en el proceso de adaptación se mantuvo entre 22 y 23 °C. Esto concuerda con lo expuesto por Baumgartner et al. (2013), quienes dicen que la temperatura óptima para el desarrollo de la *Eisenia foetida* en cualquier sustrato debe oscilar entre 20 y 25 °C. Asimismo, De Lima Rodrigues et al. (2017) indican que este tipo de lombriz puede reproducirse en cualquier parte del mundo mientras sea en un lugar con climas templados con temperaturas promedio superior a los 20 °C.

Figura 4. Adaptación de *Eisenia foetida* al agua residual doméstica durante 10 días



Asimismo, el pH fue superior a 8 los tres primeros días, disminuyendo consecutivamente hasta experimentar un descenso final de 6.38. Pramanik y Chung (2011) dicen que las lombrices *Eisenia foetida* están adaptadas para sobrevivir en entornos difíciles y en condiciones moderadamente ácidas o alcalinas, con un valor de pH que oscila entre 4.5 y 9. Sin embargo, de acuerdo con Paico (2017), las condiciones ideales y favorables para su hábitat comprende un pH entre 6.5-7.5, porque fuera de ese rango la lombriz entra en un estado de latencia, lo cual puede ocasionar la muerte de esta. En adición, se produjeron dos decesos debido al manejo del experimento.

El porcentaje de humedad fue de 80 % los dos primeros días. Posteriormente, el tercer y cuarto día descendió a 70 % y el resto del periodo de adaptación se mantuvo en un 75 %. Loro (2018) explica que las condiciones de humedad más favorables para la *Eisenia foetida* oscilan entre 70 %-80 %, puesto que los ambientes con humedades fuera de este rango pueden ser mortales para las lombrices.

3.3. Caudal y tiempo de retención hidráulico

Para medir el caudal, se llevaron a cabo tres repeticiones con tres tipos de apertura de la válvula de control, a partir de la cual se obtuvo un caudal promedio por cada tratamiento para así obtener resultados más exactos del TRH, los cuales se muestran en la Tabla 3.

En la experimentación realizada y con base en los caudales calculados in situ, se obtuvo un TRH de 0.92 h, 0.49 h y 0.15 h para el primer, segundo y tercer tratamiento aplicado respectivamente (Figura 5). Es por ello que, de acuerdo con las observaciones respectivas, se pudo ver que T_3 provocó la acumulación del agua en la primera capa (aserrín + *Eisenia foetida*), lo cual, teniendo en cuenta a Caicedo (2017), no es favorable para tratar el agua residual, debido a que las lombrices solo necesitan un 70 a 80 % de humedad para una óptima degradación de la materia orgánica.

Tabla 3. Tiempo de retención hidráulico de acuerdo con los caudales obtenidos

Tratamiento	Q (l/s)	TRH (h)
T_1 (25 % apertura válvula de control)	1.8×10^{-2}	0.92
T_2 (50 % apertura válvula de control)	3.4×10^{-2}	0.49
T_3 (100 % apertura válvula de control)	1.13×10^{-1}	0.15

La aplicación de T_2 no ocasionó ningún tipo de acumulación de agua. Sin embargo, la eficiencia de remoción no fue la más idónea; mientras que con T_1 , el agua se distribuyó homogéneamente por el lombrifiltro sin producir inundaciones y en un tiempo prudente. Además, fue con este que se obtuvieron los mejores resultados de remoción de la materia orgánica.

En efecto, Manyuchi et al. (2019) argumentan que el tiempo de retención hidráulico influye directamente en el rendimiento del lombrifiltro, pues a mayor tiempo de retención mayor será la eficiencia de remoción. De esta manera, una prolongación de tiempo de retención hidráulico favorece la calidad de biomasa y evita la aglomeración de materia, la cual podría disminuir la eficiencia del tratamiento (Kumar et al., 2016).

Figura 5. Cálculo del caudal y TRH en el lombrifiltro terminado



3.4. Determinación de la eficiencia (porcentaje de remoción)

A. DBO₅ y DQO

Se determinó la eficiencia del lombrifiltro mediante los valores de concentración de los diferentes parámetros del agua que ingresó al sistema (afluente) y la del agua que salió después del tratamiento (efluente).

Según se muestra en la Tabla 4, los resultados son corroborados con el análisis de varianza (ANOVA), determinando que existen grandes similitudes en la capacidad de remoción de materia orgánica; es decir, no existen diferencias significativas entre los tres tratamientos aplicados para la remoción de DBO₅ y DQO, ya que el p-valor es de 0.3170 con un nivel de significancia del 95 %.

Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) para demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Eficiencia	9	0.32	0.09	1.95	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.84	2	1.42	1.40	0.3170
Tratamiento	2.84	2	1.42	1.40	0.3170
Error	6.07	6	1.01		
Total	8.91	8			

Tal como se muestra la Figura 6, y después de obtener como resultado la remoción en porcentajes respecto a los tiempos de retención hidráulicos (TRH), la máxima eficiencia de remoción de DBO_5 correspondió a T_1 , con una media de 52.25 %, seguido por T_2 y T_3 , con 51.35 % y 50.90 % respectivamente. Por esta razón, todos los tratamientos reportaron concentraciones finales inferiores a 40 mg/l.

Las eficiencias de materia orgánica medida como DBO_5 son inferiores a las publicadas por Saboya (2018), aplicando también el sistema Tohá con *Eisenia foetida*, cuyos porcentajes medios fueron de 91 %. Sin embargo, esos resultados se asemejan a los obtenidos por Huiza y Ordoñez (2018), los cuales determinaron la eficiencia de un lombrifiltro utilizando la técnica de pared caliente para tratar aguas residuales domésticas, con la que confirman una eficiencia de remoción superior al 50 % de la carga orgánica inicial.

La Figura 7 se muestra que la DQO obtuvo el mismo porcentaje de remoción en comparación con la DBO_5 para los tres tratamientos, con la diferencia de que la concentración en cada uno de ellos fue mayor, con 62.35, 63.53 y 64.12 mg/l para T_1 , T_2 y T_3 respectivamente. Cabe destacar que todas las réplicas obtuvieron concentraciones menores al límite máximo permisible establecido en la normativa ambiental vigente, específicamente para descargas de efluentes en un cuerpo de agua dulce.

En varios estudios relacionados con el tratamiento de aguas residuales, los porcentajes de remoción se aproximan a los obtenidos. Tal es el caso de Mejía et al. (2017), quienes mediante un prototipo a escala de laboratorio lograron obtener una remoción de 53 % de QDO en aguas residuales domésticas.

Figura 6. Porcentaje de remoción de DBO_5

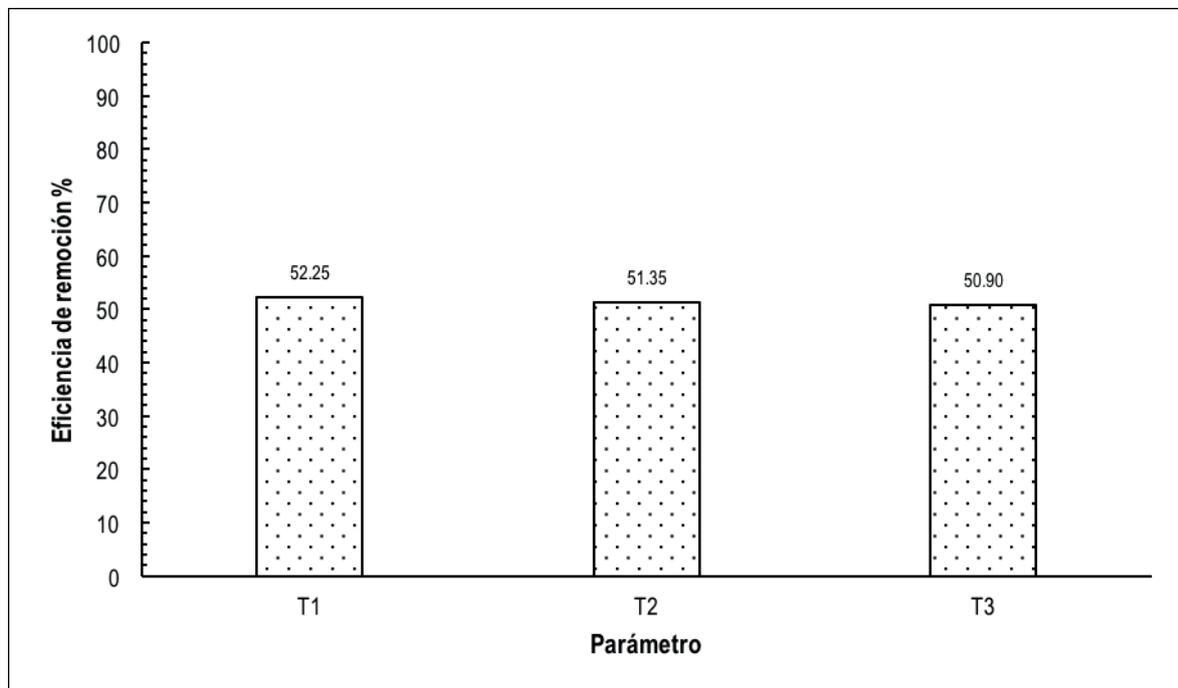
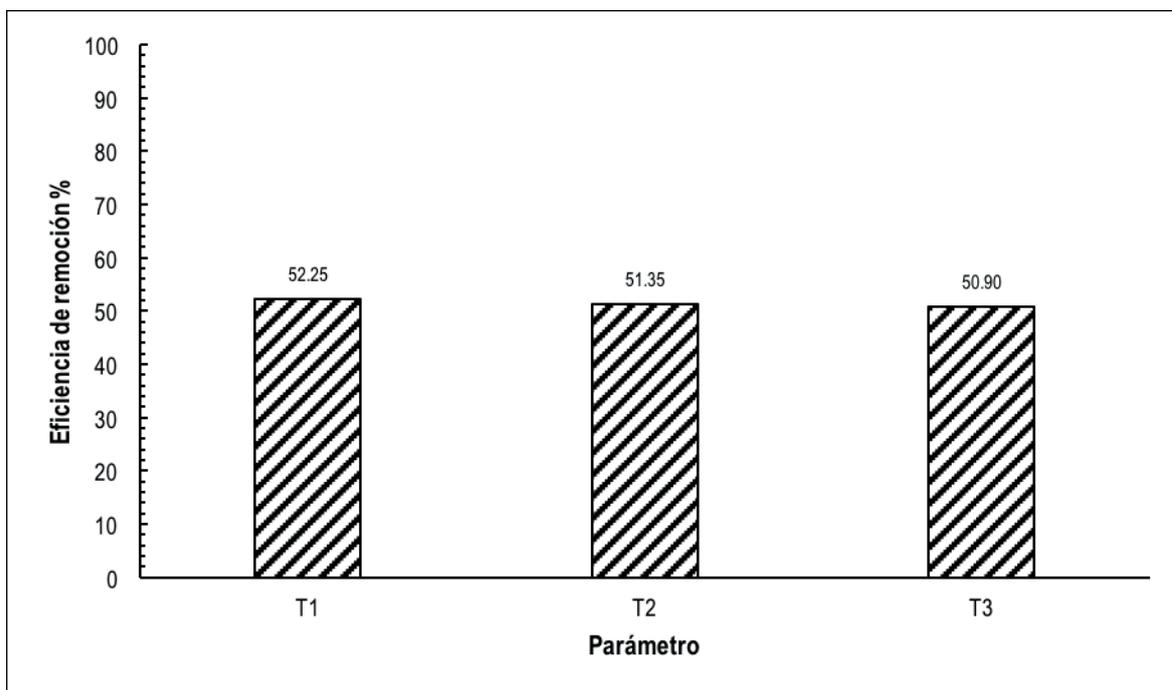


Figura 7. Porcentaje de remoción de DQO



Por su parte, como afirman Asthana et al. (2016), uno de los principales motivos por los que existe una reducción significativa de la DQO es el metabolismo de los macro y microorganismos heterótrofos aerobios y anaerobios que, a través de compuestos orgánicos del agua, producen biomasa, así como a las reacciones químicas de óxido reducción, mediante las cuales sucede dicho proceso.

B. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)

Al realizar un análisis de varianza para SST, se comprueba que existen diferencias significativas entre los tres tratamientos aplicados ($p < 0.0001$). Es decir, las diferencias de porcentajes de remoción no se deben al azar y, por lo tanto, se aprueba la hipótesis alternativa, porque existe un notable efecto de los caudales aplicados en el proceso de tratamiento del agua residual (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis de varianza (ANOVA) para sólidos suspendidos totales (SST)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Eficiencia	9	0.99	0.99	2.56	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1634.11	2	817.06	524.03	<0.0001
Tratamiento	1634.11	2	817.06	524.03	<0.0001
Error	9.35	6	1.56		
Total	1643.47	8			

De esta manera, al realizar una comparación de medias mediante la prueba de Tukey, con un 5 % de probabilidad de error, se identificaron tres grupos significativamente diferentes, de los cuales se observa claramente a T_1 como el más eficiente, con una eficiencia media de 66.74 % de remoción (Tabla 6).

Tabla 6. Prueba de Tukey para sólidos suspendidos totales (SST)

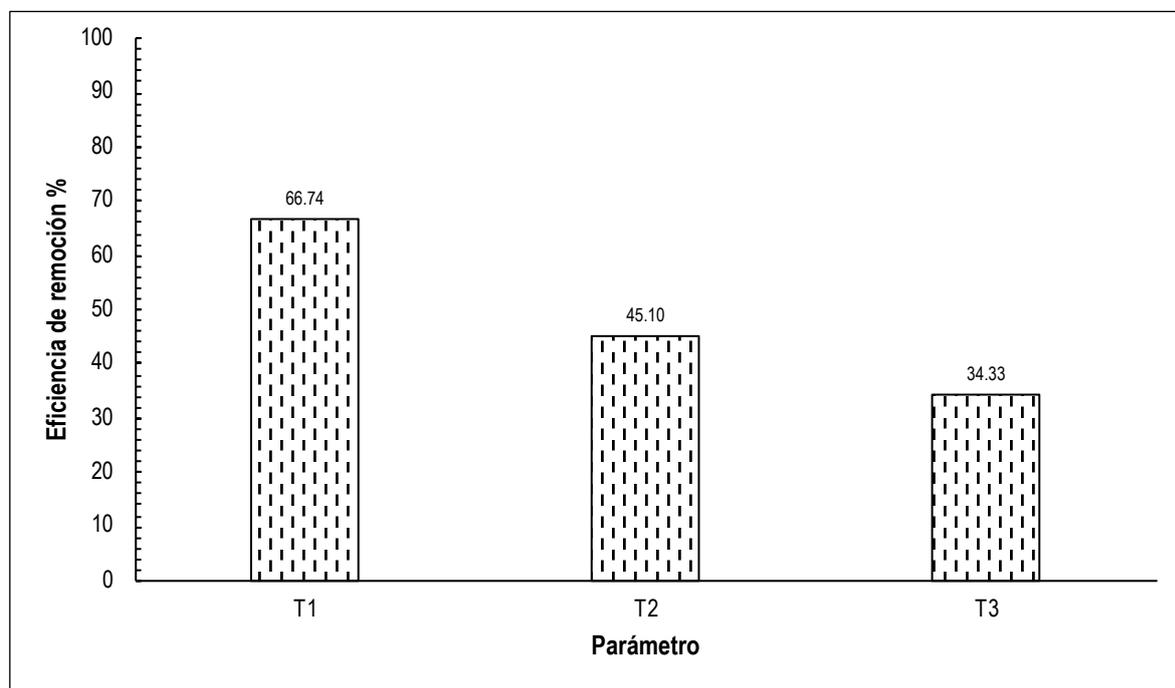
Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T_3	34.33	3	0.72	A		
T_2	45.10	3	0.72		B	
T_1	66.74	3	0.72			C

Nota: Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=3.12820

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En consideración con el comportamiento de los tratamientos frente a la eficiencia de remoción de SST, en la Figura 8 se muestra que T_1 logró obtener los mejores resultados alcanzando una media de 66.74 %, con una concentración final de 488.33 mg/l, la cual se asemeja a los reportes publicados por Cáceres et al. (2018), quienes consiguieron una eficiencia del 66.67 %.

Figura 8. Porcentaje de remoción de SST



Asimismo, los porcentajes de remoción de este parámetro en los tres tratamientos aplicados son superiores a los reportados por Loro (2018), el cual obtuvo un 40 % de remoción debido a que la capa de estiércol vacuno y aserrín aumentaron la carga de SST a la salida del lombrifiltro.

C. SÓLIDOS TOTALES (ST)

La Tabla 7 muestra el ANOVA correspondiente al parámetro ST, en la cual se aprecia una diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos, dado que el p-valor es menor a 0.05.

Tabla 7. Análisis de varianza (ANOVA) para sólidos totales (ST)

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Eficiencia	9	1.00	1.00	1.82	
Cuadro de análisis de la varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1365.03	2	682.51	1528.36	<0.0001
Tratamiento	1365.03	2	682.51	1528.36	<0.0001
Error	2.68	6	0.45		
Total	1367.71	8			

En la Tabla 8 se detalla la prueba de Tukey al 5 % de probabilidad de error, constatando nuevamente que existe diferencia significativa entre la media de porcentajes de remoción entre un tratamiento y otro. Por tanto, se comprueba que los caudales aplicados, así como los TRH tienen un aporte estadísticamente significativo en la remoción de ST.

Tabla 8. Prueba de Tukey para sólidos totales (ST)

Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T ₃	23.12	3	0.39	A		
T ₂	33.94	3	0.39		B	
T ₁	52.91	3	0.39			C

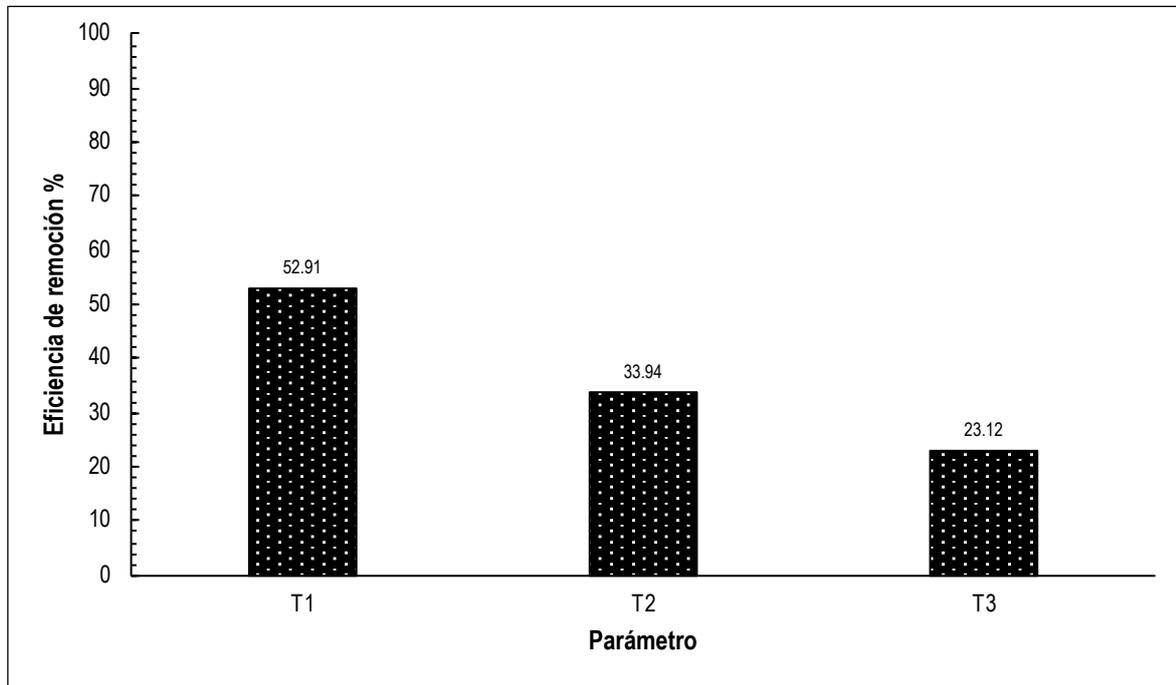
Nota: Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=1.67414

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

De acuerdo con la Figura 9, T₁ obtuvo la mayor eficiencia de remoción de sólidos totales, obteniendo una media de 52.91 % con una concentración final equivalente a 935.67 mg/l. Asimismo, se observó un promedio de 33.94 y 23.12 % de eficiencia de remoción para T₂ y T₃, con concentraciones finales que superan el límite máximo permisible establecido en la normativa ambiental vigente, las cuales fueron de 1312.67 y 1527.67 mg/l respectivamente.

Teniendo en cuenta a Xing et al. (2015), la disminución significativa de sólidos totales se atribuye a la actividad de las lombrices de tierra en la bioconversión del material sólido del agua residual en vermicompost, lo cual coincide con Singh et al. (2017), quienes confirman que los sólidos retenidos en el lecho filtrante de aserrín son consumidos por las lombrices de tierra y convertidos en humus y, por lo tanto, no hay generación de lodo como se ve en otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales. Por tal motivo, los sólidos de aguas residuales compostados por la *Eisenia foetida* pueden ser útiles aditivos para el suelo ya que ayudan a mejorar su fertilidad (Sinha et al., 2008).

Figura 9. Porcentaje de remoción de ST



En concordancia con los análisis descritos, se comprueba que T₁ con un caudal de 1.8×10^{-2} l/s y un TRH de 0.92 h obtuvo la mayor eficiencia de remoción para DBO₅, DQO, SST y ST, concluyendo que mientras más tiempo tarda el agua residual doméstica en descender por los lechos filtrantes, más eficiente es la remoción de materia orgánica de esta

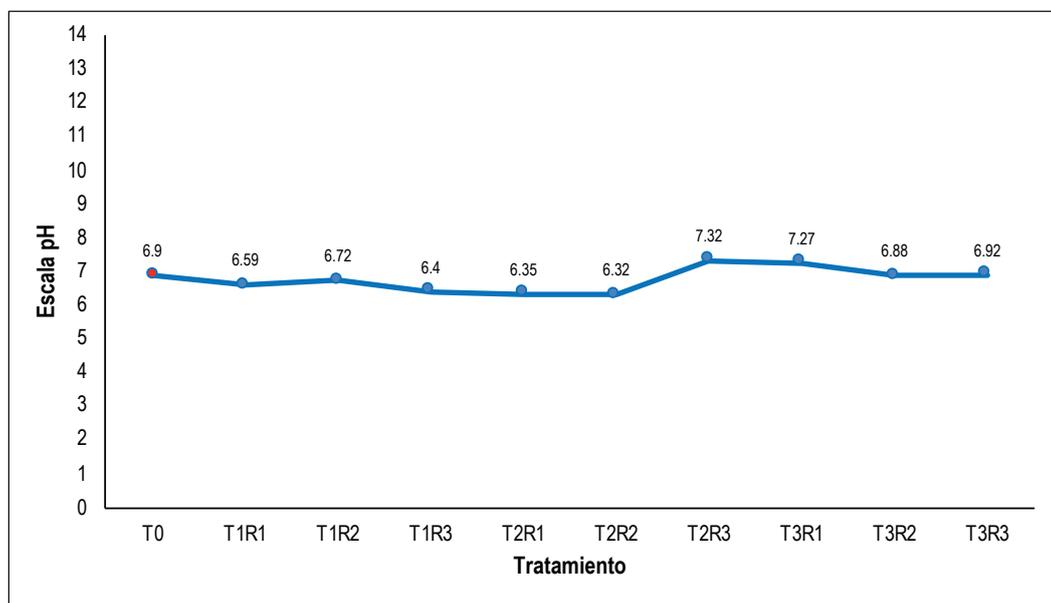
D. pH

El seguimiento del comportamiento del pH es un factor de suma importancia en los procesos de transformación química y biológica para tratamientos de aguas residuales (James et al., 2020). En la Figura 10 se presenta el seguimiento de este parámetro observando que en el agua residual sin tratamiento con el lombrifiltro fue de 6.9; mientras que el agua tratada no presentó variaciones bruscas con un pH entre 6.32 y 7.32 para los diferentes tratamientos. Es decir, el valor del pH del agua residual tratada fue prácticamente neutralizado por las lombrices *Eisenia foetida* en el lombrifiltro, manteniendo un promedio de 6.8.

Similar comportamiento reportó el estudio de Adugna et al. (2019) en el proceso de vermifiltración, en el cual, durante el tratamiento biológico, el pH se estabilizó con rangos similares.

En el estudio de Ghasemi et al. (2019), los valores de pH observados en la entrada y la salida con una tasa de carga de $2 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ resultaron ser en el rango de 6.75 ± 0.15 y 7.42 ± 0.15 con un valor medio de pH de 7.07 ± 0.15 y 6.94 ± 0.2 y 7.78 ± 0.2 , con un valor medio de 7.78 ± 0.2 , respectivamente. Durante el proceso de tratamiento, el pH aumentó inicialmente y luego se asentó en el rango neutro, lo que confirmó notablemente la capacidad inherente de las lombrices de aumentar el nivel de mineralización del compuesto orgánico a CO₂ y otras sales mineralizadas. Asimismo, estos autores indican que la ligera diferencia entre el valor de pH de entrada y de salida está relacionada con la eliminación de biocontaminantes por parte de las lombrices y su conversión posterior en vermicompost.

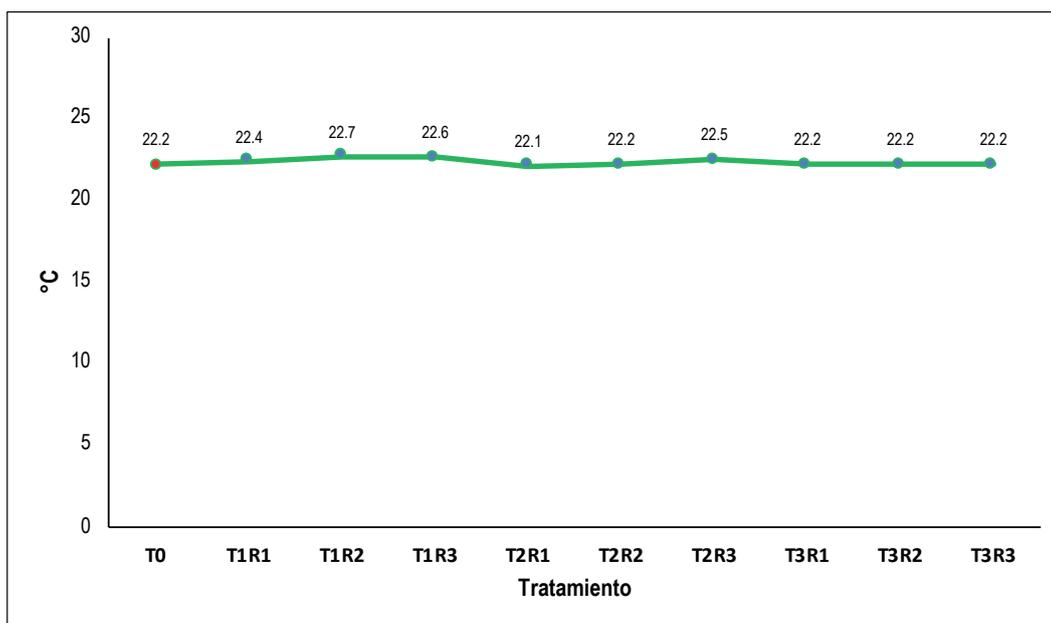
Figura 10. Comportamiento del pH del agua residual doméstica tratada



e. Temperatura

En el tratamiento de aguas residuales por vermifiltración, la eficiencia de remoción de materia orgánica depende, en gran medida, del metabolismo microbiano (Baumgartner, 2013). De acuerdo con la Figura 11, se puede ver que la temperatura se mantuvo entre 22.1 y 22.7 °C. En la investigación de Ramón et al. (2015), así como en la de Coronel (2015), no se consideraron claramente los efectos del tratamiento con la lombriz *Eisenia foetida* sobre este parámetro.

Figura 11. Comportamiento de la temperatura del agua residual doméstica tratada



Loro (2018) afirma que la temperatura es un parámetro de vital importancia, el cual debe ser monitoreado constantemente, ya que determina las condiciones esenciales para el desarrollo de microorganismos y de la *Eisenia foetida* en las reacciones químicas, pues su actividad metabólica se acelera con la temperatura y viceversa. Asimismo, de acuerdo con Jin et al. (2016), las especies de la lombriz de tierra *Eisenia foetida* favorecen las partículas orgánicas, toleran la fluctuación de la temperatura y se adaptan al ambiente húmedo. En comparación con otras especies, estas poseen una mayor tolerancia a la fluctuación de la temperatura y a la alta humedad, así como una mayor reproducción.

5. Conclusiones y recomendaciones

Se obtuvo un caudal de agua residual doméstica con un promedio de 5.18 m³/día, la cual, a través de los análisis de laboratorio, tenía una elevada concentración de materia orgánica en cuanto a SST y ST. Sin embargo, los parámetros de DBO₅ y DQO se encontraron por debajo del límite máximo permisible establecido en la legislación ambiental ecuatoriana.

Los diferentes caudales aplicados en el lombrifiltro influyeron significativamente en la eficiencia de remoción de materia orgánica, existiendo una variabilidad en el porcentaje de remoción de SST y ST. Mientras que la DBO₅ y DQO no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre un tratamiento y otro ya que el p-valor fue mayor a 0.05.

El T₁, con un caudal de 1.8×10⁻² l/s y un TRH de 0.92 h, obtuvo los mejores resultados de eficiencia, con medias de 52.25 % para DBO₅ y DQO, 66.74 y 52.91 % para SST y ST respectivamente, y un pH y temperatura promedio de 6.8 y 22.3 °C. Por esta razón, se identificó que mientras mayor es el TRH, la eficiencia de remoción de materia orgánica que tiene el lombrifiltro aumenta.

La implementación de lombrifiltros a base de *Eisenia foetida* para remover materia orgánica en aguas residuales domésticas representa un sistema ideal para las zonas rurales, debido a sus características de eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad ecológica.

Referencias

- Reforma del Texto Unificado de Legislación Secundaria (TULSMA), Acuerdo Ministerial 097-A, R. O. No. 387. Anexo 1. Tabla 9. (2015).
- Adugna, A., Andrianisa, H., Konate, Y., & Maiga, A. (2019). Fate of Filter Materials and Microbial Communities During Vermifiltration Process. *Journal of Environmental Management*, 242, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.076>
- Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras, NTE INEN 2169:2013. (2013a). <http://www.trabajo.gob.ec>
- Agua. Calidad del agua. Muestreo. Técnicas de muestreo, NTE INEN 2176:2013. (2013b). <http://www.trabajo.gob.ec>
- Alcívar, U., Dueñas, A., Sacon, E., Bravo, L., & Villanueva, G. (2016). Influencia de los tipos de secado para la obtención de harina de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) a escala piloto. *Tecnología Química*, 36(2), 187–196. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/4455/445546335007/index.html>
- Asthana, M., Kumar, A., & Sharma, B. S. (2016). Wastewater Treatment: *Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future*, 173–232. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1866-4_6
- Baumgartner, R. (2013). Developing a Testing Protocol for Vermifiltration-based Onsite Wastewater Treatment Systems (VOWTS), 1–60. <http://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/16946>

- Cáceres, D., Calisaya, G., & Bedoya, E. (2018). Eficiencia de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*, 4, 13–23. <https://revistas.ujcm.edu.pe/index.php/rctd/article/view/115>
- Caicedo, J. (2017). *Diseño, construcción y evaluación de un prototipo biológico compuesto de Eisenia foetida y agave filifera, para el tratamiento de aguas residuales en la granja del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, Riobamba 2015* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional ESPOCH. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6321>
- Coronel, N. (2015). *Diseño e implementación a escala de un biofiltro Tohá en la ESPOCH para la depuración de aguas residuales domésticas procedentes de la comunidad Langos La Nube* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional ESPOCH. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4802>
- De Anda, J. (2017). Saneamiento descentralizado y reutilización sustentable de las aguas residuales municipales en México. *Sociedad y Ambiente*, 14(1), 119–143. <http://www.scielo.org.mx/pdf/sya/n14/2007-6576-sya-14-119.pdf>
- De Lima Rodrigues, A., Mesak, C., Silva, M., Silva, G., Leandro, W., & Malafaia, G. (2017). Organic Waste Vermicomposting through The Addition of Rock Dust Inoculated with Domestic Sewage Wastewater. *Journal of Environmental Management*, 196, 651–658. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.072>
- Dharwal, M., Parashar, D., Shuaibu, M. S., Abdullahi, S. G., Abubakar, S., & Bala, B. B. (2020). Water pollution: Effects on Health and Environment of Dala LGA, Nigeria. *Materials Today: Proceedings*, S/p. Corpus ID: 229397024. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.496>
- García, Z. (2012). *Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI-Tesis. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1292>
- Ghasemi, S., Mirzaie, M., Hasan-Zadeh, A., Ashrafnejad, M., Hashemian, S. J., & Shahnemati, S. R. (2019). Design, Operation, Performance Evaluation and Mathematical Optimization of a Vermifiltration Pilot Plan for Domestic Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1), 103–587. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103587>
- Guzmán, T. M., Pérez Chamorro, O., & Valdés Pérez, O. (2020). Biodegradación de residuos sólidos urbanos utilizando cultivos microbianos y biofiltro estático de *Eisenia foetida*. *Tecnología Química*, 40(1), 81–92.
- Huiza, J., & Ordoñez, N. (2018). *Eficiencia de lombrifiltro implementando la técnica de pared caliente en el tratamiento de aguas residuales domésticas del centro poblado de Huaylacucho del distrito de Huancavelica*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio Institucional UNH. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2429>
- Chippymol, J., Meenal, S. H., Elakkiya, S., & Logarshani, S. (2020). Sustainable Environment Through Treatment of Domestic Sewage Using MFC. *Materials Today: Proceedings*, 37(2), 1495-1502. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.110>
- Jin, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Effect of Earthworm *Eisenia foetida* in Constructed Wetland on Purification of Country Wastewater. *Procedia Engineering*, 154, 406–411. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.505>
- Kumar, T., Rajpal, A., Arora, S., Bhargava, R., Prasad, K., & Kazmi, A. (2016). A Comparative Study on Vermifiltration Using Epigeic Earthworm *Eisenia fetida* and *Eudrilus eugeniae*. *Desalination and Water Treat* 57(14), p 6347–6354. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1010230>
- Lohani, S. P., Khanal, S. N., & Bakke, R. (2020). A Simple Anaerobic and Filtration Combined System for Domestic Wastewater Treatment. *Water-Energy Nexus*, 3(1), 41–45. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.03.004>

- Loro, A. (2018). Evaluación de la eficiencia del tratamiento secundario de aguas residuales domésticas utilizando un biofiltro con *Eisenia foetida* y un biofiltro convencional [Tesis de pregrado, Universidad Científica del Sur]. Repositorio UCSUR-Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12805/567>
- Manyuchi, M. M., Mupoperi, N., Mbohwa, C., & Muzenda, E. (2019). *Treatment of Wastewater Using Vermifiltration Technology. Water Conservation, Recycling and Reuse: Issues and Challenges*, 215–230. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3179-4_12
- Mejía, A., Cabrera, M., & Carrillo, Y. (2017). Remoción de contaminantes orgánicos presentes en agua residual doméstica mediante prototipo a escala de laboratorio. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 26(2), 72–83. <https://doi.org/10.17163/lgr.n26.2017.06>
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización* (3.ª ed). McGraw Hill.
- NBS (National Bureau of Statistics). (2017). Report on the State of Agriculture of China. <http://www.stats.gov.cn/english/>
- Paico, D. (2017). *Sistema Tohá, para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad Cesar Vallejo*. [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/10890>
- Pramanik, P., & Chung, Y. (2011). Changes in Fungal Population of Fly Ash and Vinasse Mixture During Vermicomposting by *Eudrilus eugeniae* and *Eisenia fetida*: Documentation of Cellulase Isozymes in Vermicompost. *Waste Manag*, 1(31), 1169–1175. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.12.017>
- Priya, A. K., Pachaiappan, R., Kumar, P. S., Jalil, A. A., Vo, D. V. N., & Rajendran, S. (2021). The War Using Microbes: A Sustainable Approach for Wastewater Management. *Environmental Pollution*, 275, 116598. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116598>
- Ramón, J., León, J., & Castillo, N. (2015). Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*. *Revista Mutis*, 5(1), 46–54. <https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/view/1018/1053>
- Reyes, J. (2016). Determinación de la eficiencia del aserrín y la fibra de coco utilizados como empaques para la remoción de contaminantes en biofiltros para el tratamiento de aguas residuales. *Enfoque UTE*, 7(3), 41–56. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n3.104>
- Saboya, X. (2018). *Eficiencia del método de lombrifiltro en la remoción de los contaminantes de las aguas residuales domésticas en el Distrito de Chachapoyas-Amazonas*. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. Repositorio UPU. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/1123>
- Salazar, M. (2005). *Sistema Tohá: Una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales en sectores rurales* [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile]. Repositorio Institucional UACH. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfcs161s/doc/bmfcs161s.pdf>
- Samal, K., Dash, R. R., & Bhunia, P. (2018). A Comparative Study of Macrophytes Influence on Performance of Hybrid Vermifilter for Dairy Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4714–4726. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.07.018>
- Singh, R., Bhunia, P., & Dash, R. (2017). A Mechanistic Review on Vermifiltration of Wastewater: Design, Operation and Performance. *Journal of Environmental Management*, 1(1), 656–672. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.042>
- Singh, R., Bhunia, P., & Dash, R. R. (2017). A Mechanistic Review on Vermifiltration of Wastewater: Design, Operation and Performance. *Journal of Environmental Management*, 197, 656–672. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.042>
- Sinha, R., Bharambe, G., & Chaudhari, U. (2008). Sewage Treatment by Vermifiltration with The Synchronous Treatment of Sludge by Earthworms: A Low-Cost Sustainable Technology Over Conventional Systems with Potential for Decentralization. *Environmentalist*, 28(4), 409–420. <https://doi.org/10.1007/s10669-008-9162-8>
- Sosa, D., Viguera, J., & Holguín, E. (2014). La biofiltración: Una alternativa sustentable para el tratamiento de aguas residuales. *Vid supra Visión Científica*, 6(2), 56–60. <https://www.ciirdurango.ipn.mx>

- Sudipti, A., & Sakshi, S. (2021). Vermifiltration as A Natural, Sustainable and Green Technology for Environmental Remediation: A New Paradigm for Wastewater Treatment Process. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4(44), 7513-7520. <https://doi.org/10.5897/AJB10.811>
- Tejada, A., Chura, E., & Apaza, H. (2018). Mejoramiento del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, modelo Rotoplas para familias del sector rural. *Revista Científica de Investigaciones Ambientales*, 1(1), 43-54. <http://revistas.upsc.edu.pe/journal/index.php/RIAM/article/view/12>
- Xing, M., Li, X., & Yang, J. (2015). Treatment Performance of Small-Scale Vermifilter for Domestic Wastewater and Its Relationship to Earthworm Growth, Reproduction and Enzymatic Activity. *African Journal of Biotechnology*, 9(44), 7513-7520. <https://doi.org/10.5897/AJB10.811>
- Yang, S., Zheng, Y., Mao, Y., Xu, L., Jin, Z., Zhao, M., Kong, H; Huang, X., & Zheng, X. (2020). Domestic Wastewater Treatment for Single Household Via Novel Subsurface Wastewater Infiltration Systems (SWISs) with NiiMi Process: Performance and Microbial Community. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123434>