



REVISTA POLITÉCNICA

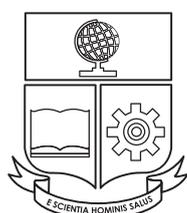


ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990
Volumen 49, Nro. 2, Mayo · Julio 2022



REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990

Volumen 49, Nro. 2, Mayo · Julio 2022

TEMÁTICA Y ALCANCE

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

EDITORORA

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

CO-EDITOR

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

CONSEJO EDITORIAL

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

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

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

Ph.D. Hernán Álvarez
Universidad Nacional Colombia, Colombia

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

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

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

Ph.D. Hugo Leiva
Yachay Tech University, Ecuador

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

Ph.D. Carlos Ávila
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

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

Ph.D. Andrés Rosales
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Leonardo Basile
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Orestes Llanes
Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba
Ph.D. Gabriel Salazar
Organización Latinoamericana de Energía, Ecuador

Ph.D. Silvia Calderón
Finnish Meteorological Institute, Finlandia

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

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

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

Ph.D. Diego Ordóñez
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

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

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

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

Ph.D. Sebastián Taco
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Pamela Flores
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

La Revista Politécnica está incluida en SCOPUS, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ), Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (REDIB), Matriz de Información para el Análisis de Revistas (MIAR), Bielefeld Academic Search Engine (BASE), CiteFactor, PKP Index, Google Scholar, ResearchBib, International Institute of Organized Research (I2OR) e ICI Journals Master List 2020.

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

Coordinador Técnico Operativo

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

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

Proofreader

MSc. María Eufemia Torres

Diseño de Portada

Cristian Basurto
Diseñador Gráfico

AUTORIDADES

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

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

Rectora
Florinella Muñoz, Ph.D.

Vicerrector de Docencia
Iván Bernal, Ph.D.

Editorial

Para aprender a investigar es necesario hacer investigación

La investigación como tal, es un proceso sistemático y riguroso que tiene como objetivo responder a una pregunta fundamental o aplicada, lo cual nos permite conocer información sobre algo desconocido. Sin embargo, una definición más global de lo que es la investigación abarca a las diferentes actividades intelectuales o experimentales que se realizan con el fin de aumentar los conocimientos sobre un tema.

Hoy en día, una de las funciones fundamentales de la universidad es generar nuevos conocimientos a través de la investigación científica y tecnológica, por medio de las publicaciones. Esto quiere decir que la investigación se ha vuelto uno de los objetivos primordiales en la universidad ya que, sin ella, esta se limitaría a ser un establecimiento de enseñanza.

Estas definiciones nos permiten afirmar que la investigación y la docencia se encuentran directamente relacionadas. Pues la práctica docente se debe apoyar en la investigación como una estrategia de aprendizaje en donde se brinde a los estudiantes un espacio para investigar, analizar, experimentar, y aplicar sus conocimientos, destrezas y valores adquiridos durante sus estudios.

Es por esto que vemos cada vez más la importancia de proporcionar a los estudiantes capacidades para adquirir por si mismos estos nuevos conocimientos. Lo que significa que el aprendizaje dejó de ser una adquisición pasiva de conocimientos (saber todo) y pasó a ser un aprendizaje activo en cuanto a la búsqueda de soluciones a problemas específicos (saber cómo).

En este contexto, el docente debe asumir su rol de investigador para su práctica docente y generar un ambiente de investigación en el aula con el principal objetivo de enseñar a los estudiantes a reflexionar, comprender y crear nuevos conocimientos permitiéndoles en el tiempo desarrollar habilidades como la creatividad, el análisis, la validación de resultados, y el manejo de técnicas de divulgación científica.

Visualizar a la docencia como investigación y al docente como investigador es una herramienta de transformación de la enseñanza que activa las capacidades de los estudiantes volviéndolos críticos, reflexivos y comprometidos con las situaciones que se les presenten en su entorno. Al plasmar sus investigaciones en publicaciones, profesores y estudiantes contribuyen no sólo al avance del conocimiento científico sino también al progreso de la sociedad.

El Comité Editorial de la Revista reitera el agradecimiento a la confianza de la comunidad científica y sobre todo al equipo de revisores de nuestra revista quienes realizan un trabajo excepcional para enriquecer la calidad de los artículos garantizando el desarrollo y crecimiento de la Revista Politécnica.

Estamos seguros que los artículos de este número sean de interés y utilidad para nuestros lectores.

Editorial

To learn how to research, it is necessary to do research

Research as such is a systematic and rigorous process that aims to answer a fundamental or applied question, which allows us to know information about something unknown. However, a global definition of what research is, includes the different intellectual or experimental activities that are made in order to increase knowledge about a topic.

Nowadays, one of the fundamental functions of the university is to generate new knowledge through scientific and technological research, by means of publications. This means that research has become a fundamental objective in the university since, without it, the university would be limited to be only a teaching institution.

These definitions allow us to affirm that research and teaching are directly related. Teaching should be supported by research as a learning strategy where students have a space to investigate, analyze, experiment, and apply their knowledge, skills, and values acquired during their studies.

Therefore, we see the importance of providing students abilities to acquire this new knowledge by themselves. This means that learning ceased to be a passive acquisition of knowledge (know everything) and became an active learning in terms of finding solutions to specific problems (know how).

In this context, the teacher must assume his role as a researcher for his teaching practice and generate a research environment in the classroom with the main objective of teaching students to reflect, understand and create new knowledge allowing them, over the time, to develop skills such as creativity, analysis, validation of results, and the management of scientific dissemination techniques.

Visualizing teaching as research and the teacher as a researcher is a teaching transformation tool that activates the capacities of the students to become critical, reflective and committed to the situations in their environment. By translating the research into publications, professors and students contribute not only to the advancement of scientific knowledge but also to the progress of the society.

The Editorial Committee of the journal reiterates its gratitude for the trust of the scientific community and especially to the reviewers of our journal who make an exceptional work to enrich the quality of the articles guaranteeing the development and growth of the Revista Politécnica.

We are sure that the articles in this issue will be of interest and use to our readers.

Contenido
Vol. 49, No. 2
Mayo – Julio 2022

7

Rivera Claudio Enrique; Figueroa Víctor Manuel; Ramírez Maribel del Carmen;
Goyes Víctor Julio

**Estructura y Composición Florística del Bosque de la Planicie de Maracaibo, Estado
Zulia, Venezuela**

*Structure and Floristic Composition of the Lake Maracaibo Plain Forest, Zulia State,
Venezuela*

17

García-Ramírez Yasmany

**Rampas de Escape para Camiones en Carreteras: Un Nuevo Procedimiento para
Justificar su Necesidad y Estimar su Ubicación**

Truck Escape Ramps in Roads: A New Procedure to Justify its Need and Estimate its Location

27

Montaluisa Diego; Villacis William

**El Análisis Probabilístico de Seguridad como Método para Evaluar el Diseño de Sistemas
Instrumentados de Seguridad de un Irradiador de Cobalto- 60 (Categoría IV)**

*Probabilistic Safety Analysis as Method for Design Assessment of Safety Instrumented Systems
of a Cobalt-60 Irradiator (Category IV)*

37

Lara M. Lenin; Bustamante Rosa

Caracterización y Patología de los Muros de Tierra de las Construcciones Andinas Ecuatorianas

Characterization and Pathology of Earthen Building Walls in the Ecuadorian Andean Area

47

Cabrera Marcelo; Montenegro Lucía; Jiménez Andrea

Análisis de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de una Industria de Embutidos

Analysis of a Wastewater Treatment System from a Sausage Factory

55

Rodríguez Suly; Jaramillo Soraya; Zurita Dominic; Valdiviezo Amanda; Choloquina Carlos

Evaluación de la Calidad del Agua de Riego Proveniente de la Acequia Tilipulo Enríquez-Cotopaxi Mediante la Relación de Absorción de Sodio (RAS)

Evaluation of the Quality of Irrigation Water from the Tilipulo Enríquez-Cotopaxi Acequia Through the Sodium Absorption Ratio (SAR)

Estructura y Composición Florística del Bosque de la Planicie de Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela

Rivera, Claudio Enrique¹ ; Figueroa, Víctor Manuel^{1,*} ; Ramírez, Maribel del Carmen¹ ; Goyes, Víctor Julio² 

¹Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia. ZU4005, Apartado postal 15205, Venezuela

²Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador

Resumen: Para conocer la estructura y la composición florística de las especies leñosas del Jardín Botánico de Maracaibo (JBM) para el año 2019, área de suma importancia para la conservación de especies autóctonas en la región, se determinó el área basal, densidad, frecuencia e índice de valor de importancia (IVI). Se establecieron diez parcelas de 20 m x 50 m, subdivididas en diez subparcelas de 10 m x 10 m, donde se registraron todos los individuos leñosos con diámetro a la altura del pecho (DAP) a partir de 2,5cm. La flora del bosque registró: 50 especies, 42 géneros y 17 familias Dicotiledóneas, representadas por 1 389 individuos por hectárea. Las familias Cactaceae, Capparaceae, Fabaceae y Malvaceae mostraron mayor número de géneros y especies. En cuanto a la estructura del bosque, predominaron dos estratos arbóreos: el primero (<5 m) con 721 individuos (51,91 %) y el segundo (5-13 m) con 663 individuos (47,73 %), y cinco individuos emergentes (>13 m) con (0,36 %). Los individuos con DAP<10 cm representaron el 59,90 % y con DAP≥10 cm el 40,10 %, lo que indica la presencia de un bosque relativamente joven. El área basal es baja, se observaron dos grupos: uno entre 4,71-5,09 m² y otro entre 2,13 y 3,33 m². *Handroanthus billbergii* registró el primer lugar (100 %) entre las cinco especies con mayor IVI, seguida por *Pithecelobium ambiguum*, *Bulnesia arborea* y *Cnidocolus urens*. Se concluye que el bosque del JBM es heterogéneo en cuanto a riqueza de especies y que el número de especies leñosas está por debajo del promedio para un bosque muy seco tropical (bms-T).

Palabras clave: Estructura de bosque, diversidad florística, flora del Zulia, reserva forestal, flora leñosa.

Structure and Floristic Composition of the Lake Maracaibo Plain Forest, Zulia State, Venezuela

Abstract: To know the structure and the floristic composition of the woody species of the Maracaibo Botanical Garden (JBM) for the year 2019, an extremely important area for the conservation of native species in the region, the basal area, density, frequency and index importance value (IVI) was determined. Ten plots of 20 m x 50 m were established, subdivided into ten subplots of 10 m x 10 m, where all the woody individuals with diameter at breast height (DBH) from 2.5 cm were recorded. The flora of the forest registered: 50 species, 42 genera and 17 Dicotyledonous families, represented by 1,389 individuals per hectare. The Cactaceae, Capparaceae, Fabaceae and Malvaceae families showed the greater number of genera and species. Regarding the structure of the forest, two arboreal strata predominated: the first (<5 m) with 721 individuals (51.91 %) and the second (5-13 m) with 663 individuals (47.73 %), and five emerging individuals (> 13 m) with (0.36 %). Individuals with DBH <10 cm represented 59.90 % and with DBH ≥10 cm 40.10%, which indicate the presence of a relatively young forest. The basal area is low, two groups were observed: one between 4.71-5.09 m² and another between 2.13 and 3.33 m². *Handroanthus billbergii* registered the first place (100%) among the five species with the highest IVI, followed by *Pithecelobium ambiguum*, *Bulnesia arborea* and *Cnidocolus urens*. It is concluded that the JBM forest is heterogeneous in terms of species richness and that the number of woody species is below the average for a very dry tropical forest (bms-T).

Keywords: Forest structure, floristic diversity, flora of Zulia, forest reserve, woody flora.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la cobertura boscosa supera los 4 000 millones de ha, lo que es 31 % de la superficie total de la tierra (FAO, 2002; 2011), de los cuales los bosques tropicales representan

aproximadamente el 10 %, distribuyéndose por más de 80 países en las zonas ecuatoriales de América, África y Asia (FAO, 1999a y 1999b). Los bosques muy secos tropicales en Venezuela cubren un área de regular extensión y están distribuidos por varios lugares en el norte del país, siendo sus extensiones más

*victorfigueroa621@gmail.com

Recibido: 17/02/2021

Aceptado: 25/02/2022

Publicado en línea: 23/03/2022

10.33333/rp.vol49n2.01

CC 4.0

grandes, una faja este-oeste en los estados Falcón y Zulia (donde está ubicado el Jardín Botánico de Maracaibo), y al oeste y sur de Barcelona, en el estado Anzoátegui, que se extiende desde el nivel del mar hasta los 600 m de altura (Ewel y Madriz, 1968).

La marcada estacionalidad de las precipitaciones en Venezuela determina un período de sequía que afecta notoriamente la estructura, composición florística y funcionamiento de las comunidades boscosas (González, 2003). Estas comunidades son ampliamente conocidas en la literatura internacional como Bosques Tropicales Estacionalmente Secos o Bosques Secos Tropicales (Murphy y Lugo, 1986).

En el estado Zulia, los estudios florísticos de especies leñosas son pocos, por lo que se requiere la ampliación de dichos estudios a nivel regional y nacional, con la finalidad de obtener información detallada de las especies leñosas del bosque muy seco tropical, que permitan aportar conocimientos para la planificación de uso conservación, preservación y protección de estas especies.

Los bosques nativos de la región zuliana han pasado por procesos de transformación y pérdida de una gran cantidad de ecosistemas forestales, debido al crecimiento demográfico y anárquico de las ciudades, agrícola, pecuaria, industrial, entre otros, aspectos que han favorecido la deforestación, los cambios en las precipitaciones (cantidad y distribución) y el aumento de la temperatura del ambiente, estos dos últimos asociados al fenómeno de El Niño (Ramírez et al., 2017).

La poca precipitación y el aumento de la temperatura también ocasionan la degradación del suelo y la reducción de la biodiversidad. Cabe destacar que existen pocas investigaciones en este tipo de bosques en Venezuela; es decir que no se cuenta con las bases apropiadas para conocer cómo se desarrollan estos ecosistemas (Figueroa, 2017).

El conocimiento de la estructura y composición florística del ecosistema de un bosque constituye el primer paso hacia el entendimiento de la dinámica ecológica del mismo, lo que a su vez es fundamental para comprender aspectos ecológicos y productivos, que se incluyen en el manejo sostenible de los bosques (Albesiano et al., 2003). Es por ello que, en este trabajo se describen la estructura y composición florística de los componentes leñosos del Bosque muy seco tropical del Jardín Botánico de Maracaibo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

2.1.1. Breve reseña histórica

Con miras de crear un reservorio de vegetación, el 9 de enero de 1973, el Botánico venezolano Dr. Leandro Aristeguieta, apoyado por el maestro paisajista brasilero Roberto Burle Marx, funda el Jardín Botánico de Maracaibo y asume el cargo como primer director, en el mismo año se inicia su construcción (1773-1983). Diseñado sobre la base de un bosque muy seco tropical conformado por especies nativas y exóticas, y conformado por un área típica de climas desérticos; un área con diferentes lagunas para representar la vegetación acuática; un espacio

conocido como cuadro filogenético, el cual representa el estado evolutivo de las plantas; una estructura arquitectónica denominada "Orquidiario"; así como árboles de corteza ornamental de gran porte, dispersos en sus espacios paisajísticos y un área de reserva natural de la flora nativa del estado Zulia. En 1999 fue cerrado al público y abandonado en su totalidad. En septiembre de 2011, la junta directiva de la Fundación Jardín Botánico de Maracaibo, con el respaldo de instituciones públicas y privadas, iniciaron los trabajos de la restauración integral. Se logró su reapertura al público el 9 de noviembre de 2013 (Portillo y Pietrangeli, 2014).

2.1.2. Descripción del área de estudio

El estudio se realizó durante el período agosto 2018 - abril 2019, en los terrenos del Jardín Botánico de Maracaibo, ubicado en el municipio San Francisco, parroquia Marcial Hernández, avenida Manuel Belloso, cruce con calle 148 vía La Concepción, Maracaibo, estado Zulia, entre las coordenadas 09° 50' N; 72° 01' O y 10° 38' N; 71° 38' O.

Los registros de las variables climáticas de precipitación, evaporación y temperatura se obtuvieron de la estación meteorológica Maracaibo-Aeropuerto, por un período de diez años (2003 - 2012); los promedios mensuales aparecen en la Figura 1.

En el sector, el régimen pluviométrico tiene una distribución bimodal durante el año. Los picos máximos de precipitación ocurren desde mediados de abril hasta mayo y desde agosto hasta octubre, siendo periodos muy cortos de disponibilidad de agua en el suelo, mientras que el periodo seco es de casi nueve meses. Las precipitaciones mínimas mensuales promedian 6,4 mm, en febrero, y las máximas 157,6 mm, en octubre.

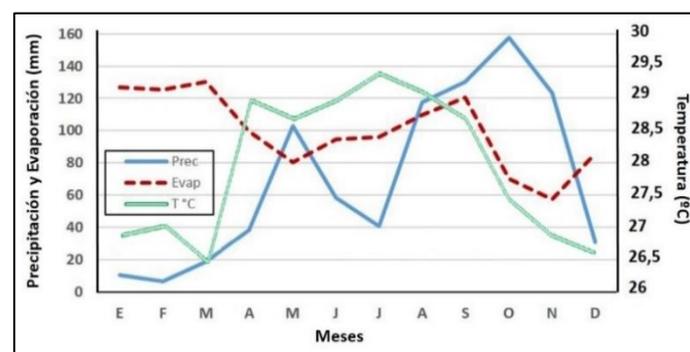


Figura 1. Distribución anual de la precipitación, evaporación y temperatura promedio (2003-2012) en la estación meteorológica Maracaibo-Aeropuerto
Fuente: Estación meteorológica Maracaibo-Aeropuerto (2003-2012)

La precipitación anual es de 835,5 mm, la temperatura varía entre 27,3 °C y 29,4 °C, con un promedio de 28,3 °C. La evaporación promedio anual es de 1 195,1 mm (Figura 2) y la humedad relativa promedio de 76,7 %.

2.2. Métodos de muestreo

Para determinar la estructura y composición florística se aplicó la metodología de Gentry (1982), modificada por Aymard y Cuello (1995); se establecieron 10 parcelas de dimensiones 50 x 20 m (1 000 m² o 0,1 ha), distribuidas al azar en el área boscosa

de los terrenos del Jardín Botánico de Maracaibo. Cada uno de estos rodales, se dividió a su vez en 10 subparcelas de 10 x 10 m (100 m²). El trazado de las parcelas se realizó mediante la apertura de caminerías externas y cada 10 metros se establecieron los límites alineados con ayuda de una brújula, para luego realizar el tendido de cuerdas.

El censo de las especies se realizó dentro de cada subparcela y se midieron, identificaron y registraron todos los individuos leñosos enraizados (árboles, arbustos y lianas), con el perímetro a la altura del pecho (PAP) mayor o igual a 2,5 cm, lo que garantizó la inclusión de la mayor cantidad posible de individuos en la realización del estudio fitosociológico, siguiendo a Gentry (1982 y 1998).

El diámetro a la altura del pecho (DAP) se determinó mediante la relación del perímetro o circunferencia a esta altura (PAP) dividido por Pi ($\pi = 3,14159226$), según la siguiente fórmula:

$$DAP = PAP/\pi \quad (1)$$

El área basal (AB) se determinó con la ecuación:

$$AB = \pi * (DAP)^2 / 4 \quad (2)$$

2.3. Distribución de las parcelas

La distribución de las parcelas se ordenó de acuerdo con la forma del área boscosa y evadiendo las áreas muy intervenidas, de manera equitativa; mientras que la asignación de los nombres o códigos de las mismas se realizó secuencialmente, según el orden de registro, denotándolas como P1, P2, P3, hasta llegar a P10, según se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Distribución de las parcelas de estudio en el JBM

El registro de los parámetros en cada parcela se llevó a cabo con una cinta métrica.

Las muestras botánicas vegetativas y reproductivas se recolectaron en el mismo sitio. Se identificaron las especies conocidas y a las demás se les asignó un código para su posterior identificación en el laboratorio. Los individuos censados en campo de las diferentes especies leñosas no identificadas, se marcaron con cintas de colores, con el objeto de retornar al sitio periódicamente y observar a la especie en periodo de floración y/o fructificación y de esta forma facilitar la identificación.

2.4. Identificación de muestras

El material botánico recolectado se procesó con el apoyo de técnicas clásicas de herborización (Cascante, 2008). La identificación se determinó siguiendo el sistema APG IV hasta el nivel de especie con el soporte de literatura especializada y claves taxonómicas, entre ellas: Catálogo de la Flora Vascular de Venezuela (Hokche et al., 2008), Los bosques secos de la costa oriental del lago de Maracaibo, estado Zulia, Venezuela (Figuroa, 2011), Algunas malezas de potreros en el municipio Machiques de Perijá, estado Zulia, Venezuela (Figuroa et al., 2018), Árboles Tropicales Ornamentales (Hoyos, 1992), Clave de las Familias de las Plantas Superiores de Venezuela (Badillo et al., 1985), Plantas comunes de Venezuela (Schnee, 1984), Florewing Plants of the Neotropics (Smith et al., 2004), Checklist of the Plants of the Guianas (Boggan et al., 1997), Preliminary Check List of the Plants of the Guiana Shield (Hollowel et al., 2001), y Diagnóstico Florístico de la Ciudad Universitaria de LUZ (Figuroa, 1998). También se consultó a especialistas regionales y nacionales, y se hizo una revisión y comparación crítica de las muestras recolectadas con las exsiccata depositadas en los herbarios de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia (HERZU) y del Museo de Biología de la Universidad del Zulia (HMBLUZ). Las listas de las especies se ordenaron alfabéticamente por familia y los nombres científicos se actualizaron de acuerdo con las bases de datos The Plant List (2013) y Stevens (2017).

2.5. Variables de estudio

Con los datos de densidad, cobertura y frecuencia absoluta, provenientes del censo del componente leñoso de cada una de las parcelas en estudio, se procedió a calcular las siguientes variables estructurales, según Curtis y Cottam (1962):

- ✓ Densidad Relativa (abundancia relativa) = (N° de individuos de una especie (densidad absoluta) x 100 / Total de individuos de la muestra o total de la densidad absoluta. (3)
- ✓ Cobertura Relativa (dominancia relativa) = (Área basal de la especie (cobertura absoluta) x 100 / Total área basal en la muestra o total de la cobertura absoluta. (4)
- ✓ Frecuencia Relativa = (N° de subparcelas conteniendo la especie (frecuencia absoluta) x 100) / Sumatoria de todas las frecuencias o NI/ha de la especie. (5)
- ✓ Índice de Valor de Importancia (IVI): (Densidad relativa + Cobertura relativa + Frecuencia relativa). (6)
- ✓ Los valores de IVI, que oscilan entre 1 y 300, se usaron para determinar las especies de mayor importancia ecológica en cada rodal y comparar las parcelas.

Los valores del IVI se clasificaron según Figuroa (2011) de la siguiente manera: las especies con IVI entre 0 – 3 como especies raras, de 3 – 7 como especies de baja importancia, de 7 – 10 como especies de moderada importancia, 10 – 30 como especies codominantes, 30 – 60 como especies dominantes y >60 como especies muy dominantes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Inventario florístico del Jardín Botánico de Maracaibo

Los resultados obtenidos en la muestra de una hectárea de terreno del Jardín Botánico de Maracaibo, clasificado como bosque muy seco tropical, se registraron 50 especies leñosas, 42 géneros y 17 familias, representadas por 1 389 individuos por hectárea, todas del grupo taxonómico de las Dicotiledóneas (Tabla 1).

La familia dominante en el área estudiada fue la *Fabaceae*, al acumular 10 de las 50 especies (20 %), seguida por las *Capparaceae* con 8 especies (16 %), *Cactaceae* con 6 (12 %), *Malvaceae* con 5 (10 %), *Boraginaceae* con 4 (8 %), *Bignoniaceae* con 3 especies (6 %), se completó la población con tres familias con dos y ocho con una especie (Tabla 2).

Fajardo et al. (2005) mencionan que, en los bosques secos de Venezuela, las 10 familias de mayor relevancia son: *Bignoniaceae*, *Boraginaceae*, *Capparaceae*, *Euphorbiaceae*, *Fabaceae*, *Flacourtiaceae*, *Malpighiaceae*, *Rubiaceae*, *Rutaceae* y *Sapindaceae*. El bosque estudiado comparte nueve de ellas en orden de importancia, aunque cinco agrupan el 67 % de las especies registradas (*Fabaceae*, *Capparaceae*, *Cactaceae*, *Malvaceae* y *Boraginaceae*).

Tabla 1. Número de familias, géneros y especies del Jardín Botánico de Maracaibo

FAMILIA	Géneros	Especies
<i>Anacardiaceae</i>	1	1
<i>Bignoniaceae</i>	2	3
<i>Bixaceae</i>	1	1
<i>Boraginaceae</i>	1	4
<i>Burseraceae</i>	1	1
<i>Cactaceae</i>	6	6
<i>Capparaceae</i>	7	8
<i>Euphorbiaceae</i>	2	2
<i>Fabaceae</i>	9	10
<i>Malvaceae</i>	5	5
<i>Phytolaccaceae</i>	1	1
<i>Polygonaceae</i>	1	1
<i>Rhamnaceae</i>	1	1
<i>Rubiaceae</i>	1	2
<i>Sapindaceae</i>	1	2
<i>Vitaceae</i>	1	1
<i>Zygophyllaceae</i>	1	1
Total: 17	42	50

Con los resultados obtenidos se evidencia que la zona estudiada tiene un número de especies leñosas muy por debajo de la cota reportada para un bosque seco tropical en Venezuela, que posee entre 110 y 170 especies y de 40 a 50 familias (González, 2003; Fajardo et al., 2005). Sin embargo, está más cercana a la registrada en la zona de protección y defensa del complejo petroquímico “El Tablazo”, donde Pietrangeli et al. (1997) censaron 79 especies, incluidas en 68 géneros y 33 familias, transición entre las zonas de vida bosque muy seco tropical y monte espinoso.

Zambrano y Fuenmayor (1977) identificaron un total de 32 familias incluyendo árboles, arbustos, lianas y especies herbáceas en el área del JBM. Sin embargo, la cota registrada en dicho estudio es superior a la reportada por Portillo y Pietrangeli (2014) en el mismo sistema boscoso, donde registraron cinco especies leñosas forestales agrupadas en cuatro familias: *Bignoniaceae*, *Fabaceae*, *Cactaceae* y *Capparaceae*; en su estudio establecieron tres parcelas de 0,1 ha y solo tomaron en cuenta las especies arbóreas con un DAP > 10 cm.

Posiblemente, en el trabajo de Portillo y Pietrangeli (2014) hubo una subestimación en el número de especies encontradas, debido a que solo se muestreó en una hectárea y la zona reconocida tiene características climáticas muy particulares, además de presentar fuertes signos de intervención antrópica, de las cuales las más perceptibles son la tala selectiva y los incendios forestales.

Los bosques muy secos tropicales son, en comparación con otro tipo de bosques tropicales, por lo general menos diversos florísticamente. Murphy y Lugo (1986) y Gentry (1995) han indicado que los rangos de riqueza en estos ecosistemas se mantienen entre las 30 y 90 especies por hectárea. Mientras que en Venezuela y particularmente en las comunidades forestales deciduas de la Costa Oriental de Lago de Maracaibo, estos números pueden ascender a 170 especies (Fajardo et al., 2005; Aymard et al., 2009; Figueroa, 2011; Pietrangeli et al., 2011).

Por otra parte, se confirma lo dicho por Gentry (1995), que las *Fabaceae* corresponden a una de las familias más dominantes en cuanto al número de especies en los bosques secos, incluso en bosques transicionales (húmedos-secos) como refiere Zamora (2010) en Costa Rica; además, que los bosques secos de Venezuela no son tan ricos en especies, géneros y familias en comparación con otros bosques descritos en otras regiones. Por ejemplo, Carrillo et al. (2007) reportaron 60 especies en el bosque seco tropical del cerro Tasajero, San José de Cúcuta, al norte del Departamento de Santander, Colombia.

El 72 % de las especies registradas (36 taxa) está contenida en seis familias: *Fabaceae*, *Capparaceae*, *Cactaceae*, *Malvaceae*, *Boraginaceae* y *Bignoniaceae*, se completa con tres familias con dos especies cada una con un 12 % y el restante 16 % está representado por ocho familias con una especie cada una (Tablas 1 y 2). Estas familias con bajo número de representantes contribuyen considerablemente con la diversidad de estos bosques secos como lo reportan Pietrangeli (2006) y Figueroa (2011).

De los 42 géneros registrados, los que agruparon mayor número de especies fueron: *Cordia* con 4, de la familia *Boraginaceae*, seguido de *Handroanthus*, *Cynophalla*, *Caesalpinia*, *Randia* y *Melicoccus* con dos especies cada uno, el resto fue representado solo por una especie. Estos resultados demuestran la gran diversidad que presentan estos bosques, producida por el alto número de géneros con bajo número de representantes.

En cuanto al número de géneros por familia, la *Fabaceae* fue la dominante en el área estudiada, al acumular 9 de los 42 géneros (21 %), seguida por las *Cactaceae* y *Capparaceae* con 7 (16 %) y *Malvaceae* con 5 géneros (12 %) (Tabla 2).

Tabla 2. Lista de especies leñosas del Jardín Botánico de Maracaibo

FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMÚN
Anacardiaceae	<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	Gateado
Bignoniaceae	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	Curarire
	<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S.O. Grose	Curarí
	<i>Roseodendron chryseum</i> (S. F. Blake) Miranda	Alumbre, Cañaguata, Puy
Bixaceae	<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd) Spreng.	Bototo, Carnaval
Cordiaceae	<i>Cordia alba</i> (Jacq.) Roem. & Schult.	Caujaro
	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken.	Pardillo, Mecoque
	<i>Cordia curassavica</i> (Jacq.) Roem. & Schult.	Basura prieta
	<i>Cordia thaisiana</i> G. Agostini	Pardillo negro
Burseraceae	<i>Bursera tomentosa</i> (Jacq.) Triana & Planch.	Indio desnudo
Cactaceae	<i>Acanthocereus tetragonus</i> (L.) Hummelinck	Pitahaya
	<i>Cereus hexagonus</i> (L.) Mill.	Cardón
	<i>Cylindropuntia caribaea</i> (Britton & Rose) F. M. Knuth.	Tuna guasábara
	<i>Stenocereus griseus</i> (Haw.) Buxb.	Cardón de dato
	<i>Opuntia caracasana</i> Salm-Dyck.	Tuna blanca
	<i>Pereskia guamacho</i> F. A. C. Weber	Guamacho, Suspiro
	<i>Belencita nemorosa</i> (Jacq.) Dugand.	Taparita
Capparaceae	<i>Capparidastrum elegans</i> (Mart.) Hutch.	Limón de montaña
	<i>Capparis pittieri</i> Standl.	Naranjillo, Toco, Parcha
	<i>Crateva tapia</i> L.	Gatillo
	<i>Cynophalla linearis</i> (Jacq.) J. Presl.	Limpiadiente, Arará
	<i>Cynophalla flexuosa</i> (L.) J. Presl.	Zorrocloco
	<i>Morizonia americana</i> L.	Olivo
	<i>Quadrella odoratissima</i> (Jacq.) Hutch.	Guarítoto, Pringamosa
Euphorbiaceae	<i>Cnidioscolus urens</i> (L.) Arthur	Tuatúa
	<i>Jatropha gossypifolia</i> L.	Cují torcido, Cují negro
Fabaceae	<i>Acacia tortuosa</i> (L.) Willd.	Lara, Samán ruidoso
	<i>Albizia lebbek</i> (L.) Benth	Dividive
	<i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd.	Ébano, Granadillo
	<i>Caesalpinia granadillo</i> Pittier.	Bolsa de gato
	<i>Diphysa americana</i> (Mill.) M.Sousa	Algarrobo
	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Jebe, Nazareno
	<i>Lonchocarpus atropurpureus</i> Benth.	Yabo, Espinillo
	<i>Parkinsonia praecox</i> (Ruiz & Pav.) Hawkins	Yacure
	<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.	Cují yaque, Cují llorón
	<i>Prosopis juliflora</i> (Sw.) DC.	Ceiba
	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Guásimo
Malvaceae	<i>Pachira quinata</i> (Jacq.) W.S. Alverson.	Castaño, Ceiba roja
	<i>Pseudobombax septenatum</i> (Jacq.) Dugand	Sibucara
	<i>Sterculia apetala</i> (Jacq.) Karst.	Camoruco, Cacaíto
	<i>Segueiria americana</i> L.	Araña gato
Polygonaceae	<i>Triplaris caracasana</i> Cham.	Palo maría
Rhamnaceae	<i>Ziziphus mairei</i> Dode	Ponsigué, Manzanita
Rubiaceae	<i>Randia aculeata</i> L.	Cruceto
	<i>Randia armata</i> (Sw) DC	Cruceto
Sapindaceae	<i>Melicococcus bijugatus</i> Jacq.	Mamón
	<i>Melicococcus oliviformis</i> Kunth	Cotoperiz
Vitaceae	<i>Cissus siamica</i> Planch	Bejuco de carro
Zygophyllaceae	<i>Bulnesi arborea</i> Jacq. Engler.	Vera

Figuroa (2011) describió que las 10 familias más importantes en el estudio realizado en el Parque Recreacional Pueblo Viejo, en cuanto al número de especies, fueron las *Fabaceae*, *Capparaceae*, *Euphorbiaceae*, *Malpighiaceae*, *Bignoniaceae*, *Flacourtiaceae*, *Rutaceae*, *Sapindaceae*, *Anacardiaceae* y *Cactaceae*; el bosque del Jardín Botánico de Maracaibo comparte siete de las familias registradas: *Fabaceae*, *Capparaceae*, *Cactaceae*, *Bignoniaceae*, *Euphorbiaceae*, *Sapindaceae* y *Anacardiaceae*, las cuales agrupan el 65 % de las especies censadas en este estudio, con 33 taxa.

De acuerdo con Portillo y Pietrangeli (2014), las familias más importantes para este bosque son: *Fabaceae*, *Capparaceae*, *Cactaceae* y *Bignoniaceae*, pero en este estudio se le suman las familias *Malvaceae* y *Boraginaceae*, las cuales serían las 6 familias más importantes en número de especies para este

remanente boscoso. Este resultado demuestra la diferencia florística de esta área con respecto a las referidas, probablemente debido a las diferencias en los regímenes pluviométricos que, por ejemplo, para el Jardín Botánico de Maracaibo son menores a los 850 mm anuales y para el Parque Recreacional Pueblo Viejo son mayores a los 1 200 mm anuales (Figuroa, 2011).

3.2. Características estructurales

Con la conformación estructural del bosque estudiado a través de las 10 parcelas, se constató que la comunidad vegetal presenta por lo general dos estratos arbóreos. El estrato alto más o menos continuo con el 47,73 % (663) de los individuos, se encuentra entre los 5 y los 13 m de altura con muy pocos árboles emergentes (5), los cuales pueden alcanzar hasta los 16 m de altura, como es el caso de la *Ceiba pentrandia* (L.) Gaertn,

Sterculia apetala (Jacq.) Karst. *Handroanthus billbergii* (Bureau & Schum.) Grose y *Cordia thaisiana* G. A gostini; el segundo estrato está conformado por individuos menores a 5 m y presenta la mayor densidad de especies leñosas (51,91 %), en comparación con el estrato superior, pero estos son de menor diámetro (Tabla 3); la comunidad vegetal se completó con la presencia de muy pocas hierbas y epífitas de las familias *Annonaceae*, *Asparagaceae*, *Bromeliaceae*, *Commelinaceae*, *Orchidaceae*, *Poaceae* y *Sterculiaceae*.

El número de estratos de bosque del JBM difiere a los referidos por González (2003), para los llanos orientales de Venezuela, ya que estos solo presentaron un estrato arbóreo relativamente continuo de 12 m promedio en altura y con taxa como *Bourreria cumanensis* y *Capparis odoratissima*. Sin embargo, coinciden con los reportados por Portillo y Pietrangeli (2014) en el Jardín Botánico de Maracaibo, Figueroa (2011) en la costa oriental del lago de Maracaibo y Pietrangeli (2006) en los alrededores de los embalses Socuy y Tulé del estado Zulia.

La densidad total en los 10 rodales censados fue de 1 389 individuos, lo que representó una hectárea de muestreo, con una densidad promedio de 138 individuos/parcela. Las densidades máximas encontradas fueron en los rodales P9, P5 y P3 con 165, 164 y 156 individuos respectivamente y las mínimas registradas en las parcelas P1 con 99, P2 y P8 con 123 cada una (Figura 3), lo que evidencia la diversidad de individuos entre parcelas. Esto difiere ampliamente de lo reportado por Figueroa (2011) en los bosques deciduos del parque recreacional Pueblo Viejo de la costa oriental del estado Zulia, donde la densidad total en los 10 rodales censados fue de 2 036 individuos/ha, con una densidad promedio de 203,6 individuos/parcela.

Alrededor del 83 % de las especies son de reducido diámetro a la altura del pecho (DAP < 20 cm) (Figura 4), se destacan las de menor DAP: *Cissus siamica* Planch, *Handroanthus billbergii* (Bureau & Schum.) Grose, *Cordia thaisiana* G.A gostini, *Caesalpinia coriaria* (Jacq.) Willd y *Cnidocolus urens* (L.) Arthur, todas con DAP de 2,50 cm; mientras que las pocas de mayor diámetro fueron: *Cereus hexagonus* (L.) Mill, *Caesalpinia coriaria* (Jacq.) Willd., *Ceiba pentrandia* (L.) Gaertn, *Handroanthus billbergii* (Bureau & Schum.) Grose y *Cordia alba* (Jacq.) Roem. & Schult., con DAP > 97 cm, tomando en cuenta que la mayoría de ellas alcanzan estas dimensiones porque son individuos multicaules, aunque estos valores son relativamente bajos en comparación con los de otros bosques tropicales (Tabla 4).

Tabla 3. Distribución por estratos de las especies del JBM

Estrato	NI	Porcentaje (%)
Sobresaliente (> 13 m)	5	0,36
Alto (5-13 m)	663	47,73
Bajo (< 5 m)	721	51,91

NI= Número de individuos

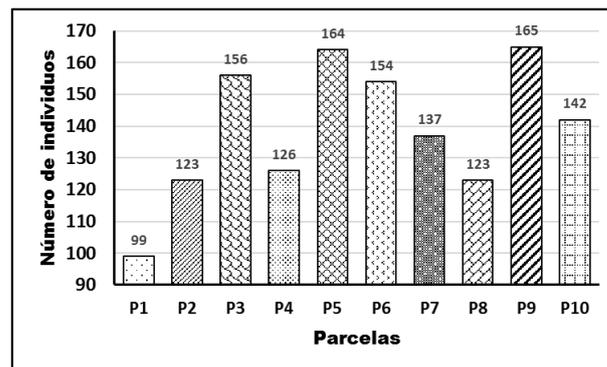


Figura 3. Número de individuos por parcela en el JBM

Tabla 4. Cinco especies con menor y mayor DAP del JBM

ESPECIE	DAP (cm)
<i>Cissus siamica</i> Planch	2,50
<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	2,50
<i>Cordia thaisiana</i> G. Agostini	2,50
<i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd.	2,50
<i>Cnidocolus urens</i> (L.) Arthur	2,50
<i>Cordia alba</i> (Jacq.) Roem. & Schult.	97,40
<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	98,04
<i>Ceiba pentrandia</i> (L.) Gaertn.	103,71
<i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd.	106,16
<i>Cereus hexagonus</i> (L.) Mill.	108,23

El diámetro promedio de la mayoría de los individuos leñosos, fue menor a 20 cm, hace suponer que se trataría de una serie de bosques relativamente jóvenes, que fueron intervenidos y están en recuperación; adicionalmente, las condiciones edáficas y meteorológicas impiden que los árboles adquieran mayor grosor de tallo (Figura 4).

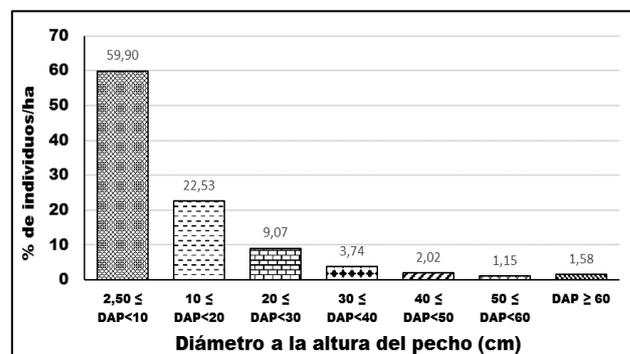


Figura 4. Distribución relativa de los individuos del bosque

Para el área basal de los componentes leñosos muestreados, se observa que existen dos grupos bien definidos por la diferencia de más de 1 m², compuestos en primer lugar con los valores mayores en las parcelas P2, P3 y P8 con 5,53; 5,09 y 4,71 m² respectivamente, luego el segundo grupo lo forman las restantes parcelas con valores comprendidos entre 2,13 y 3,33m²; comportándose muy homogéneos. Resalta que los dos rodales de mayor cobertura son continuos, mientras que la tercera se encuentra entre las de menor área basal de la muestra de una hectárea (Figura 5).

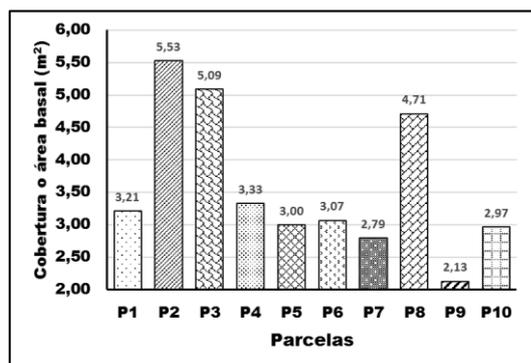


Figura 5. Cobertura de los componentes leñosos de la muestra

3.3 Índice de valor de importancia (IVI)

Con el IVI encontrado y de acuerdo con Figueroa (2011), el bosque del JBM está compuesto por el 1,45 % de especies raras,

presentes solamente en una parcela que coincide con la misma donde no hubo especies muy dominantes; el mayor grupo lo conforman las de baja importancia con 36,26 %, seguido de las codominantes con 31,16 %, las de moderada importancia cubren el 15,94 %, completándose con las especies dominantes y muy dominantes con valores relativos de 7,97 % y 7,25 %, respectivamente.

Handroanthus billbergii (Bureau & Schum.) Grose es la especie que obtuvo el primer lugar con el 100 % de presencia en las parcelas, seguido de *Pithecelobium ambiguum* Hemsl., con el IVI en nueve parcelas, completándose los primeros lugares de las parcelas restantes con *Bulnesia arborea* Jacq. Engler y *Cnidoscolus urens* (L.) Arthur en tres de ellas. En la Tabla 5, se presentan las cinco especies con mayor IVI para cada una de las parcelas.

Tabla 5. Las cinco especies con mayor Índice de Valor de Importancia por parcela

	ESPECIE	NI	IVI
P1	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	28	93,18
	<i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd.	25	78,73
	<i>Pereskia guamacho</i> Weber	21	48,25
	<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng.	9	27,39
	<i>Lemairecereus griseus</i> Haw. Bridt.	4	12,41
P2	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	40	86,55
	<i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd.	36	64,49
	<i>Pithecelobium ambiguum</i> Hemsl.	10	27,41
	<i>Cereus hexagonus</i> (L.) Mill.	8	24,37
	<i>Lemairecereus griseus</i> Haw. Bridt.	6	23,16
P3	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	108	117,12
	<i>Cordia alba</i> (Jacq.) Roem. & Schult.	8	36,51
	<i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd.	8	35,67
	<i>Pithecelobium ambiguum</i> Hemsl.	9	23,47
	<i>Cereus hexagonus</i> (L.) Mill.	2	23,00
P4	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	77	146,45
	<i>Pithecelobium ambiguum</i> Hemsl.	15	54,75
	<i>Opuntia caracasana</i> Salm-Dyck.	11	22,63
	<i>Randia aculeata</i> L.	3	10,41
	<i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken.	2	10,20
P5	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	123	171,91
	<i>Bulnesia arborea</i> Jacq. Engler	11	33,53
	<i>Cnidoscolus urens</i> (L.) Arthur	6	14,94
	<i>Pithecelobium ambiguum</i> Hemsl.	2	14,76
	<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng.	6	13,73
P6	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	113	170,83
	<i>Bulnesia arborea</i> Jacq. Engler.	11	33,32
	<i>Stenocereus griseus</i> (Haw.) Buxb.	4	15,77
	<i>Cnidoscolus urens</i> (L.) Arthur	6	14,88
	<i>Pithecelobium ambiguum</i> Hemsl.	2	14,53
P7	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	97	165,47
	<i>Bulnesia arborea</i> Jacq. Engler.	11	38,13
	<i>Stenocereus griseus</i> (Haw.) Buxb.	4	16,32
	<i>Pithecelobium ambiguum</i> Hemsl.	2	15,71
	<i>Cnidoscolus urens</i> (L.) Arthur	6	15,38
P8	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	50	93,29
	<i>Pithecelobium ambiguum</i> Hemsl.	20	50,41
	<i>Cordia thaisiana</i> G. Agostini	9	22,43
	<i>Ceiba pentrandia</i> (L.) Gaertn.	1	20,83
	<i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd.	8	19,13
P9	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	81	128,54
	<i>Cordia curassavica</i> (Jacq.) Roem. & Schult.	37	44,85
	<i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd.	11	33,28
	<i>Acacia tortuosa</i> (L.) Willd.	6	19,64
	<i>Pithecelobium ambiguum</i> Hemsl.	8	14,14
P10	<i>Handroanthus billbergii</i> (Bureau & Schum.) Grose	89	122,41
	<i>Pithecelobium ambiguum</i> Hemsl.	11	28,14
	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	2	24,16
	<i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd.	9	23,85
	<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S. O. Grose	6	20,19

La especie *Handroanthus billbergii* (Bureau & Schum.) Grose ejerce el dominio absoluto del bosque del JBM, con valores de $86,55 \leq \text{IVI} \leq 171,91$; supera en todas las parcelas al resto de las especies. También, se observa que las especies que la secundan están presentes escasamente en tres parcelas, siendo ellas *Bulnesia arbórea* Jacq. Engler y *Pithecelobium ambiguum* Hemslecon con 38,13 y 54,75 como valores mayores, respectivamente, en las tres parcelas donde ocupan el segundo lugar; las demás poseen valores de IVI mucho menores que los de las especies antes mencionadas.

De las 50 especies censadas, existen 20 con valores altos de IVI, lo que indica que el bosque del JBM es muy heterogéneo en cuanto a riqueza de especies y estas tienen alta incidencia en el mismo.

4. CONCLUSIONES

- ✓ El censo florístico del Jardín Botánico de Maracaibo demostró que sus variables florísticas y estructurales fueron muy similares a las de otros bosques deciduos de Venezuela, aunque la diferencia más notable fue el menor número de especies.
- ✓ El bosque muy seco tropical del Jardín Botánico de Maracaibo posee una composición de familias típica de los bosques secos similares del noroeste de Venezuela, pero con menor cantidad de especies.
- ✓ La dominancia de *Handroanthus billbergii* (Bureau & Schum.) Grose (Curarire) fue absoluta ante las demás especies del bosque y fue la única en poseer valores de Índice de Importancia mayores a 100.
- ✓ Las familias *Fabaceae* (en sentido amplio), *Capparaceae*, *Cactaceae* y *Malvaceae* predominaron sobre las demás familias presentes en el área de estudio.
- ✓ La cobertura o área basal fue muy baja, lo que ratifica que el bosque es joven.
- ✓ La densidad de especies por parcela demostró que existe mucha variación, lo que determina la heterogeneidad del bosque del JBM.
- ✓ El bosque del JBM presentó la mayoría de los componentes arbóreos con bajo valor de DAP lo que sugiere que es un bosque joven o que atraviesa un proceso sucesional secundario.

REFERENCIAS

Albesiano, S, Rangel, J, y Cadena, A. (2003). La vegetación del Cañón del Río Chicamocha. *Caldasia* 25(1):73-99. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/39402>

Aymard, G. & Cuello, N. (1995). The 0.1 Hectary Methodology: A Method for Rapid Assessment of Woody Plant Diversity. *Handout*. 7(1):16. <http://revistaecovida.upr.edu.cu/index.php/ecovida/article/view/72>

Aymard, G., Schargel, R., Berry, P., y Stergios, B. (2009). Estudio de los suelos y la vegetación (estructura, composición florística y diversidad) en bosques macrotérmicos no-inundables, estado Amazonas Venezuela (aprox. 01° 30' -- 05° 55' N; 66° 00' -- 67° 50' O). *Biollania* (Edic. Esp.) 9: 6-251.

Badillo, V., Schnee, L., Benitez, C. (1985). Clave de las familias de las plantas superiores de Venezuela. 7ma Edición. Caracas, Venezuela. Espasandes.

Boggan, J, Funk, V, Kelloff, C, Hoff, M, Cremers, G, Feuillet, C. (1997). Checklist of the Plants of the Guianas (Guyana, Surinam, French Guiana). 2nd Edition. Prepared under the auspices of the Centre for the study of Biological. Georgetown, Guyana: Diversity University of Guyana.

Cascante, A. (2008). Guía para la recolección y preparación de muestras botánicas. Herbario nacional (CR), Museo Nacional de Costa Rica, San José. Costa Rica. 10 p.

Curtis, J, Cottam, G. (1962). Plant Ecology Workbook. Burgess, Minneapolis, US.

Ewel, J, Madriz, A. (1968). Zonas de vida de Venezuela. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico. Editorial Sucre.

Fajardo, L, González, V, Nassar, J, Lacabana, P, Portillo, C, Carrasquel, F, Rodríguez, J. P. (2005). Tropical Dry Forests of Venezuela: Characterization and Current Conservation Status. *Biotropica* 37(4): 531-546. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.00071.x>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (1999a). Directrices para la Ordenación de los Bosques Tropicales. <http://www.fao.org/3/a-w8212s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (1999b). Actualización de la evaluación de los recursos forestales mundiales. <https://www.fao.org/forestry>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2002). Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2000 Informe principal. <http://www.fao.org/3/y1997s/y1997s00.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO] . (2011). Situación de los Bosques del Mundo 2011. <http://www.fao.org/3/i2000s/i2000s00.pdf>

Figueroa, V. (1998). Diagnóstico florístico de la ciudad universitaria de LUZ. Trabajo de Ascenso. Facultad de Agronomía. LUZ. Maracaibo. Venezuela.

Figueroa, V. (2011). Los bosques secos de la costa oriental del lago de Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. *Biollania*. Edición especial N° 10. 189-196. https://nanopdf.com/download/los-bosques-secos-de-la-costa-oriental-del-lago-de-maracaibo_pdf

Figueroa, V. (2017). Degradación del suelo, vegetación y desertificación del sector San Julián, municipio Machiques de Perijá, Zulia, Venezuela. Tesis doctoral presentada para optar al título de Doctor en Ciencias Agrarias. Facultad de Agronomía. Universidad del Zulia.

Figueroa, V, Jaimes, E, Larreal, M, Dexy, L. (2018). Algunas malezas de potreros en el municipio Machiques de Perijá, estado Zulia,

- Venezuela. Proagro. Vol. 6(1):10-19. <http://investigacion.unesur.edu.ve/index.php/rpa/article/view/83>
- Gentry, A. (1982). Patterns of neotropical plant species diversity. *Evol. Biol.* 15: 1-84. doi: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-6968-8_1
- Gentry, A. (1998). Tree species richness of upper Amazonian forests. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 85:156-159. doi: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC279502/>
- Gentry, A. (1995). Diversity and floristic composition of neotropical dry forest. Seasonally dry tropical forest. Bullock S, Money H, Medina E, editores. p. 146-194.
- González, V. (2003). Bosques secos. Aguilera M, Azocar A, González, E. Editores. Biodiversidad en Venezuela. Fundación Polar y Editorial Ex Libris. Tomo II. p. 735-744.
- Hokche, O, Berry, P, Huber, O. (2008). Nuevo catálogo de la flora vascular de Venezuela. Fundación Instituto Botánico de Venezuela. Tobías Lasser, Paul E. Berry, Otto Huber. Editores.
- Hollowel, T, Berry, B, Funk, V, Kelloff, C. (2001). Preliminary Checklist of the Plants of the Guiana Shield (VENEZUELA: Amazonas, Bolívar, Delta Amacuro; GUYANA, SURINAM, FRENCH GUIANA). Volume 1: Acanthaceae – Lythraceae.
- Hoyos, J. (1992). Árboles tropicales ornamentales, cultivados en Venezuela. Monografía 38. Sociedad de Ciencias Naturales La Salle.
- Murphy, P, Lugo, A. (1986). Ecology of tropical dry forest. *Annu. Ecol. Syst.* 17:67-88. doi: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.es.17.1.10186.000435>
- Pietrangeli, M., Villarreal, A., Gil, B. (2011). Florística de las comunidades forestales de zonas aledañas al embalse Pueblo Viejo (Burro Negro). *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas.* 45(3): 237-286. doi: <https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/boletin/article/view/297>
- Pietrangeli, M., Larreal, A., Gil, B. (2006). Inventario florístico y caracterización fisionómica - estructural de los bosques y vegetación riparina buffer asociada, presentes en los alrededores de los embalses Socuy y Tulé, Edo. Zulia. Informe de avance segundo año de financiamiento con fondos del Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT). Mimeografiado.
- Pietrangeli, M, Leal, A, Villarreal, A, Herrera, F. (1997). Caracterización de la vegetación presente en la zona de seguridad y defensa del complejo petroquímico El Tablazo, "Viejo Hornito". Informe de Avance Palmichal S. A.
- Portillo, M, Pietrangeli, M. (2014). Evaluación de la estructura, extensión y distribución espacial de los estadios sucesionales en un remanente de bosque seco tropical ubicado en el Jardín Botánico de Maracaibo mediante la teledetección. Trabajo Especial de Grado. Facultad Experimental de Ciencias. LUZ. Maracaibo. Venezuela.
- Ramírez, M, Urdaneta, A, Urdaneta, V, García, D. (2017). Efecto de los tratamientos pregerminativos en la emergencia y en el desarrollo inicial del cotoperiz [*Talisia oliviformis* (Kunth) Radlk]. *Pastos y Forrajes* 40(1): 16-22. Doi: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0864-03942017000100002&lng=es&nrm=iso
- Schnee, L. (1984). Plantas comunes de Venezuela. Tercera Edición. Ediciones de la biblioteca. Universidad Central de Venezuela
- Smith, N, Mori, S, Henderson, A, Stevenson, D, Heald, S. (Edit.). (2004). Flowering plants of the neotropics. Princeton University Press in Association with The New York Botanical Garden
- Stevens, P. F. (2017). Phylogeny Website. Version 14, July 2017 [and more or less continuously updated since]. Doi: <http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb/>.
- The Plant List (2013). Base de datos libre. <http://www.theplantlist.org/>
- Zambrano, J, Fuenmayor, E. (1977). El bosque muy seco tropical del Jardín Botánico de Maracaibo. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 3(4): 79-87. Doi: <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/25880>
- Zamora, M. (2010). Caracterización de la flora y estructura de un bosque transicional húmedo a seco, Miramar, Puntarenas, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal

BIBLIOGRAFÍAS



Claudio Enrique Rivera Saturno, Ingeniero Agrónomo, egresado en 2019 de la Facultad de Agronomía de La Universidad del Zulia, Venezuela; personal adscrito al Jardín Botánico de Maracaibo en el área de Sistemática y guía ecológico en el mismo y en excursiones científicas.



Víctor Manuel Figueroa, Ingeniero Agrónomo (UNELLEZ, 1988), M. Sc. en Botánica Agrícola (UCV, 2010), Doctor en Ciencias Agrarias (LUZ, 2017). Profesor titular jubilado en el área de Botánica (Morfología, Anatomía y sistemática) y control de malezas de la Facultad de Agronomía de La Universidad del Zulia, Venezuela. Investigador Acreditado en Venezuela (V08463421-0102-2013) y Ecuador (REG-INV-04898). Tutor, cotutor y asesor de Trabajos Especiales de Grado en pregrado, postgrado y tesis doctorales Autor de artículos científicos, ponente en congresos

nacionales en internacionales. Investigador responsable, coinvestigador y asesor de proyectos de investigación.



Maribel del Carmen Ramírez Villalobos, Ingeniera Agrónoma egresada de la Universidad del Zulia (LUZ, 1994), Magister Scientiarum en Fruticultura (LUZ, 1998), Doctora en Ciencias mención Botánica (Universidad Central de Venezuela, 2009). Profesora Titular a dedicación Exclusiva adscrita al

Departamento de Botánica, Facultad de Agronomía, LUZ. Cargos desempeñados: Jefa del Departamento de Botánica y de las Cátedras de Fisiología Vegetal y Botánica. Coordinadora y miembro del Programa de Doctorado en Ciencias Agrarias, Jefa de Laboratorio (Cultivo de Tejidos, Propagación de Plantas); Editora de la “Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)”. Investigadora responsable, coinvestigadora y asesora de proyectos de investigación.



Víctor Julio Goyes Cabezas, Ingeniero Agrónomo, MBA, Estudiante del programa de Doctorado en Ciencias Agrarias de la Universidad del Zulia, Venezuela. Docente titular de la Universidad Técnica de Babahoyo. Investigador y desarrollista en el área de fitomejoramiento y ambiente. Gerente de la empresa rental de la Universidad de Babahoyo.

Rampas de Escape para Camiones en Carreteras: Un Nuevo Procedimiento para Justificar su Necesidad y Estimar su Ubicación

García-Ramírez, Yasmany^{1,*} 

¹Universidad Técnica Particular de Loja, Departamento de Ingeniería Civil, Loja, Ecuador

Resumen: Los conductores de camiones en pendientes descendentes pronunciadas pueden perder el control del vehículo por sobrecalentamiento del sistema de frenos. Ante esta posibilidad, las rampas de escape para camiones ayudan a detener esos vehículos errantes, reduciendo la fatalidad y daños materiales. La AASHTO presenta recomendaciones sin mostrar un procedimiento analítico para justificar su necesidad o estimar su ubicación. En Chile, se propuso un procedimiento, sin embargo, tiene ciertas limitaciones de aplicación y actualización; por lo tanto, el objetivo de este estudio es proponer un nuevo procedimiento para justificar la necesidad de las rampas de escape para camiones en carreteras y estimar su ubicación. Este procedimiento incluye las recientes actualizaciones del Sistema de Calificación de Peligrosidad de la Pendiente (GSRs por sus siglas en inglés). El sistema GSRs permite estimar la velocidad máxima de descenso seguro en una pendiente en descenso. Se explica el nuevo procedimiento mediante un ejemplo detallado de cálculo. El procedimiento propuesto resuelve las limitaciones del propuesto en Chile y completa las recomendaciones dadas por la AASHTO. Además, ofrece una base teórica, de fácil aplicación, para países en donde aún no se han construido este tipo de infraestructuras.

Palabras clave: rampas de escape para camiones, GSRs, necesidad y ubicación, nuevo procedimiento.

Truck Escape Ramps in Roads: A New Procedure to Justify its Need and Estimate its Location

Abstract: Truck drivers on steep downgrades can lose control of the vehicle from overheating the brake system. Given this possibility, truck escape ramps stop those errant vehicles, reducing fatality and property damage. The AASHTO makes recommendations without showing an analytical procedure to justify their need or estimate their location. In Chile, a method that tries to cover that gap has limited application and updating concerns. Therefore, this study proposes a new procedure to justify the truck escape ramps on roads and estimate their location. This procedure includes the recent updates in the Grade Severity Rating System (GSRs). The GSRs system allows estimating the maximum safe speed on downgrades. A detailed calculation example was employed to explain the new procedure. The proposed procedure solves the limitations of the proposal of Chile and completes the recommendations given by the AASHTO. In addition, it offers a theoretical basis, easy to apply, for countries where this type of infrastructure has not been built yet.

Keywords: truck escape ramp, GSRs, need and location, new procedure.

1. INTRODUCCIÓN

En carreteras, en pendientes descendentes pronunciadas, los vehículos, principalmente camiones, pueden perder su capacidad de frenado por el sobrecalentamiento de los frenos. Esta fatiga térmica se debe a fallas mecánicas o por el uso inadecuado del sistema de frenos. Esta reducción en la capacidad del frenado puede llevar a que el conductor pierda el control del vehículo. Para reducir la velocidad del vehículo sin control y alejarlo de la corriente principal del tránsito se construyen las rampas de escape para camiones.

Las rampas de escape han permitido salvar vidas y reducir los daños materiales (Bowman & Coleman, 1990). Esto se debe a que principalmente en la rampa, se desarrollan tasas de desaceleración aceptables y permiten que el conductor tenga el control adecuado sobre el vehículo dentro de ella (Witthof, 1992). También, mejora la seguridad del resto de usuarios viales, dado que el vehículo errante se detiene fuera del flujo vehicular. La señalización anticipada y antes del ingreso a la rampa debe realizarse en base al MUTCD (FHWA, 2009), permite avisar a los conductores acerca de su presencia. Hay tres categorías de las rampas de escape para camiones, basados en la forma de detención del camión: gravedad, pila de arena y lecho de frenado. El más utilizado y extendido la

*ydgarcia1@utpl.edu.ec

Recibido: 10/05/2021

Aceptado: 22/02/2022

Publicado en línea: 23/03/2022

10.33333/rp.vol49n2.02

CC 4.0

rampa con el lecho de frenado, cuyo esquema típico se muestra en la Figura 1. Esta rampa consta principalmente de un ingreso pavimentado, el lecho de frenado, y en algunos casos, amortiguadores de choque. El vehículo queda atrapado en los áridos debido a la fricción que tienen con los neumáticos. La vía de servicio y los puntos de anclaje permite acceder y anclar la grúa para remover los vehículos que quedan atrapados en la rampa.

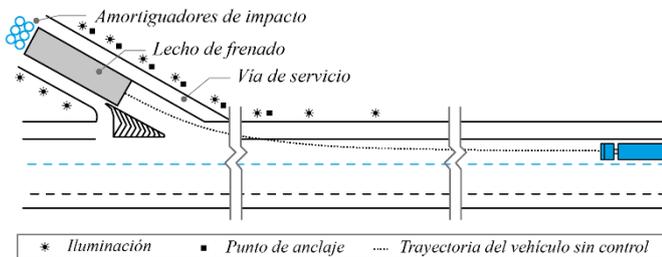


Figura 1. Esquema típico de la rampa de escape para camiones

El lecho de frenado es el más utilizado en Latinoamérica: Chile (MOP, 2019), Argentina (Espinoza et al., 2016) o Brasil (Moreira, 2011; Zanoli, 2003), por citar algunos ejemplos. A pesar de sus buenos resultados, otros países de la región no los han usado, por ejemplo, en Ecuador no se conoce que se haya hecho este tipo de intervención. El diseño del lecho de frenado está ampliamente explicado por el *Green Book* (AASHTO, 2011), y soportado por diversos estudios (por ejemplo: Valdes et al., 2018). En cuanto a la justificación de la necesidad y localización de la rampa, la AASHTO sólo presenta algunas recomendaciones.

La AASHTO (2011) menciona que es necesaria una rampa de escape cuando existan registros o indicios de que se están produciendo siniestros relacionados con el sobrecalentamiento del sistema de frenos. También, recomienda que se deben construir en alineamientos rectos de la carretera y antes de curvas circulares para evitar que el vehículo sin control negocie con ellas. Así mismo, se debe ubicar antes de áreas pobladas y que se deben colocar al lado derecho de la calzada. La AASHTO también menciona que se puede utilizar el GSRS o *Grade Severity Rating System* (FHWA, 1989) como complemento a estas recomendaciones. Sin embargo, la AASHTO no presenta procedimientos analíticos para determinar la necesidad y ubicación de la rampa.

Uno de los primeros intentos en proveer un procedimiento de cálculo es el propuesto en Chile (Echaveguren et al., 2007). Esta metodología usa el GSRS (FHWA, 1989) para determinar la necesidad y localización de la rampa de escape. Para justificar su necesidad, analiza la velocidad máxima de descenso seguro con el GSRS y la compara con la velocidad de operación de los vehículos. Cuando ésta última es mayor, existe la posibilidad de que se produzca una falla de frenos, por lo que justifica colocar una rampa. Propone ábacos para pesos de vehículos entre 30 a 40 Ton y 40 a 45 Ton. En estas gráficas, se puede emplear para estimar la velocidad máxima de descenso seguro y para determinar en dónde se debe ubicar la rampa (utilizando la velocidad de operación). A pesar de su base racional y fácil aplicación, este procedimiento presenta algunos inconvenientes: a) solo son aplicables para el rango de pesos con el que fueron desarrollados, b) solo son aplicables

para una pendiente simple, es decir, una pendiente compuesta por 2 o más valores de inclinación, no se pueden utilizar directamente, y c) el GSRS tuvo una actualización reciente (Moomen & Ksaibati, 2020), debido a las mejoras realizadas a los camiones que circulan en la actualidad. Se perfeccionó este procedimiento chileno por dos investigadores (Echaveguren & Vargas, 2013), sin embargo, fue publicada en el año 2013, donde no hubo la actualización mencionada.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es proponer un nuevo procedimiento para justificar la necesidad de las rampas de escape para camiones en carreteras y determinar su ubicación. Se utiliza el nuevo modelo GSRS para proponer el nuevo procedimiento analítico. Este procedimiento se complementa con un ejemplo de aplicación detallado. Este nuevo procedimiento resuelve las limitaciones del procedimiento propuesto en Chile y completa lo desarrollado por la AASHTO. Además, sirve como una base teórica y de fácil aplicación para países en donde aún no se han construido este tipo de infraestructura.

2. SISTEMA DE CALIFICACIÓN DE PELIGROSIDAD DE LA PENDIENTE (GSRS)

El GSRS fue desarrollado en 1974 por la FHWA (FHWA, 1989). Tuvo una actualización en el 2006 con respecto a la difusividad del sistema de frenado (Ruhl et al., 2006). Sin embargo, ante las mejoras que han existido en los camiones actuales hay una nueva actualización del sistema GSRS (Moomen & Ksaibati, 2020). El principio original no ha cambiado, pero se han actualizado algunas constantes del modelo.

El modelo considera el peso bruto del camión junto a su rendimiento, el porcentaje de descenso de pendiente y la longitud de frenado del camión para recomendar velocidades de descenso seguras. El GSRS asume una velocidad de descenso constante, la potencia de retardo del motor se mantiene cerca del máximo permitido para el motor, y la presencia de un camión de cinco ejes, como vehículo tipo. En la actualización, este vehículo es un modelo Kenworth T680 Series (2016), cuyo peso bruto es de 36287 kg. El GSRS se basa la temperatura de frenado, tal como se muestra en la ecuación (1):

$$T_f = T_0 + [T_\infty - T_0 + K_2 HP_B] \left[1 - e^{-\frac{K_1 \times L}{v}} \right] \quad (1)$$

Donde:

T_f = temperatura del sistema de frenos en la parte inferior de la pendiente, producto de circular por ella a una velocidad constante (°F),

T_0 = temperatura inicial del freno (150 °F),

T_∞ = temperatura ambiente, cuando no se tiene valores medidos se puede usar 90 °F,

K_1 = constante de calibración por difusividad, calculada con la ecuación (4) (h^{-1})

K_2 = constante de calibración por transferencia de calor, estimada con la ecuación (5) (°F/hp)

HP_B = potencia del sistema de frenos calculada según la

ecuación (6) (hp),

L = longitud de la pendiente (mi), y

V = velocidad máxima de descenso seguro (mi/h).

El modelo GSRS fue modificado para asegurar que quedara suficiente capacidad de frenado para permitir una parada de emergencia al final de la pendiente sin exceder una temperatura máxima de 500 °F. La máxima temperatura permitida se obtiene con la ecuación (2).

$$T_{\text{lím}} = T_f + T_E \quad (2)$$

Donde

$T_{\text{lím}}$ = máxima temperatura del sistema de frenos, la cual no debe exceder de 500 °F (°F),

T_f = aumento de temperatura debido al descenso de la pendiente (°F), y

T_E = aumento de temperatura debido a una parada de emergencia, la cual se calcula con la ecuación (3) (° F).

$$T_E = 3,11 \times 10^{-7} \times W \times V^2 \quad (3)$$

Donde

W = peso bruto del vehículo (lb), y

V = velocidad máxima de descenso seguro (mi/h).

La difusividad (K_1) y el parámetro de transferencia de calor (K_2) se calcula mediante la ecuación (4) y (5) respectivamente, cuyas variables ya fueron definidas previamente.

$$K_1 = 1,5 (1,1852 + 0,0331 V) \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{1}{0,1602 + 0,0078 V} \quad (5)$$

La potencia del sistema de frenos (HP_B) se calcula con la ecuación (6). Dentro de esta ecuación se necesita la fuerza de arrastre que se calcula con la ecuación (7).

$$HP_B = \left(W \theta - F_{\text{drag}} \right) \frac{V}{375} - HP_{\text{eng}} \quad (6)$$

$$F_{\text{drag}} = 459,35 + 0,132 V^2 \quad (7)$$

Donde

W = peso bruto del vehículo (lb),

θ = inclinación de la pendiente (decimal),

F_{drag} = fuerza de arrastre (lb),

V = velocidad máxima de descenso seguro (mi/h), y

HP_{eng} = potencia de frenado del motor igual a 63,3 hp.

El modelo de la ecuación (1) permite encontrar la velocidad máxima segura para descender una pendiente cuidando de que el $T_{\text{lím}}$ no exceda de los 500 °F. Para ello, se puede despejar esa ecuación o se puede resolver por tanteos.

En lo que se refiere a la potencia de frenado del motor HP_{eng} , la condición base es que no tiene retardadores, si el retardador del camión está a la mitad, entonces $HP_{\text{eng}} = 238$ hp, mientras que, si la aplicación es completa, entonces, $HP_{\text{eng}} = 502$ hp. Los retardadores son frenos auxiliares que ayudan a que los frenos de servicio absorban los hp de frenado requeridos.

Existe un aumento considerable de camiones que lo poseen debido a la seguridad que proveen y el ahorro en los costos de uso y mantenimiento del sistema de frenos. Sin embargo, la condición base es que el vehículo pesado no tenga retardadores, y es el caso más desfavorable y adecuado para el parque automotor de la mayoría de países de Latinoamérica.

3. PROCEDIMIENTO PROPUESTO

El GSRS al ser un modelo que incluye principalmente la velocidad y la temperatura del sistema de frenos, éste se puede utilizar como medio para estimar la necesidad y ubicación de las rampas de escape. Es así, que en 6 pasos se podría calcular la necesidad, ubicación de la rampa y en el último paso determinar longitud del lecho de frenado. A pesar de que se explique el último paso, no se entrará en mayores detalles, dado que es algo común y aceptado con la comunidad científica.

3.1 Paso 1: analizar la necesidad de la rampa de escape

En primer lugar, se calcula la velocidad máxima para un descenso seguro utilizando el procedimiento descrito en el GSRS. Se realizan tanteos, imponiéndose velocidades, hasta que se acerque a la temperatura límite de 500 °F. En ningún caso, se puede exceder esa temperatura, ya que, si sucede eso, significa una alta probabilidad de sobrecalentamiento y su consecuente pérdida de control.

Una vez que se haya determinado esa velocidad de descenso seguro, se debe medir (en carreteras construidas) o estimar (en proyectos) la velocidad de operación. Para el segundo caso, cada país o región tiene sus modelos desarrollados, por ejemplo, para Ecuador, se pueden utilizar las ecuaciones de predicción en carreteras de dos carriles (García-Ramírez & Alverca, 2019), tal como se muestra en la Tabla 1.

Aunque, las ecuaciones de la Tabla 1 fueron desarrollados para entretangencias horizontales, se las puede adoptar debido a que los tramos en el GSRS son entretangencias verticales, y por lo tanto son similares desde el punto de vista geométrico. Ante esta analogía, el valor de L , en las ecuaciones de la Tabla 1, será la longitud del tramo en análisis. Así mismo, los valores obtenidos son aplicables para vehículos livianos, por lo que se los puede transformar utilizando el procedimiento descrito en el MUTCD (FHWA, 2009) para determinar la velocidad recomendada en curvas. Para ello, la velocidad de operación de vehículos livianos se debe multiplicar por 0,97 y sumarle 1 mi/h.

Tabla 1. Ecuaciones calibradas de predicción de la velocidad de operación en entre-tangencias horizontales

G (%)	Ecuación de predicción	R ²	Rango de L (m)
6 a 10 %	$V_{t_{85}} = 69,69$	*	22 - 260
4 a 5,99%	$V_{t_{85}} = 0,03L + 69,52$	0,29	22 - 392
0 a 3,99%	$V_{t_{85}} = 0,04L + 73,69$	0,37	22 - 435
-3,99 a 0%	$V_{t_{85}} = 0,05L + 73,65$	0,50	22 - 435
-5,99 a -4%	$V_{t_{85}} = 0,04L + 72,68$	0,47	22 - 392
-10 a -6%	$V_{t_{85}} = 0,07L + 66,09$	0,41	22 - 433

$V_{t_{85}}$ = velocidad de operación en la entre-tangencia horizontal en km/h, G = pendiente longitudinal de la carretera, L = longitud de la entre-tangencia horizontal, * = no es posible de calcular dado que es una ecuación constante, R² = coeficiente de determinación, N° = número de ecuación.

Ahora bien, para determinar si se necesita o no de una rampa de escape, se compara las velocidades obtenidas. Si la velocidad de operación es mayor a la velocidad máxima para un descenso seguro, entonces, se requiere la construcción de una rampa de escape. En pendientes compuestas (2 o más pendientes) es necesario analizar esta diferencia en cada tramo.

3.2 Paso 2: estimar el punto en donde el sistema de frenos alcanza los 500 °F

Una vez que se haya determinado que se necesita la rampa de escape, entonces, se debe estimar el punto en donde el sistema de frenos alcanza los 500 °F. Para ello, se utiliza el mismo modelo GSRS, sin embargo, se ingresa con una velocidad conocida, que corresponde a la velocidad de operación. En primer lugar, se detecta el tramo en donde, con la velocidad de operación, el sistema de frenos excede de la temperatura de 500 °F (tramo i). En ese tramo, se procede a calcular la distancia a la que se alcanza esa temperatura. Utilizando el modelo GSRS y con retro-cálculo se obtiene esa distancia, de la siguiente manera:

En la ecuación (2), utilizando una temperatura al final de ese tramo igual a 500 °F, se puede reescribir como:

$$T_{f,ti} = 500 - T_{E,ti} \quad (8)$$

Donde

$T_{f,ti}$ = aumento de temperatura debido al descenso de la pendiente en el tramo i (°F), y

$T_{E,ti}$ = aumento de temperatura debido a una parada de emergencia en el tramo i (°F).

Por otra parte, la ecuación (1) se puede escribir como:

$$T_{f,ti} = T_{0,ti-1} + [T_{\infty} - T_{0,ti-1} + K_{2,ti} HP_{B,ti}] \left[1 - e^{-\frac{K_{1,ti} \times L_{500,ti}}{V_{85,ti}}} \right] \quad (9)$$

Donde

$T_{0,ti-1}$ = temperatura inicial del freno en el tramo i-1. Si existe un solo tramo en la pendiente o en el primer tramo se excede de los 500 °F utilizar $T_{0,ti-1} = T_0$ (°F),

T_{∞} = temperatura ambiente (90 °F),

$K_{1,ti}$ = constante de calibración por difusividad en el tramo i (h⁻¹),

$K_{2,ti}$ = constante de calibración por transferencia de calor en el tramo i (°F/hp),

$HP_{B,ti}$ = potencia del sistema de frenos calculada en el tramo i (hp),

$L_{500,ti}$ = longitud del tramo i en donde se alcanza la temperatura de 500° F (mi), y

$V_{85,ti}$ = velocidad de operación en el tramo i (mi/h).

La ecuación (9) se puede escribir de la siguiente forma:

$$\frac{T_{f,ti} - T_{0,ti-1}}{T_{\infty} - T_{0,ti-1} + K_{2,ti} HP_{B,ti}} - 1 = -e^{-\frac{K_{1,ti} \times L_{500,ti}}{V_{85,ti}}}$$

Que es lo mismo que:

$$e^{-\frac{K_{1,ti} \times L_{500,ti}}{V_{85,ti}}} = 1 - \frac{T_{f,ti} - T_{0,ti-1}}{T_{\infty} - T_{0,ti-1} + K_{2,ti} HP_{B,ti}}$$

Aplicando el logaritmo natural se tiene:

$$-\frac{K_{1,ti} \times L_{500,ti}}{V_{85,ti}} = \ln \left(1 - \frac{T_{f,ti} - T_{0,ti-1}}{T_{\infty} - T_{0,ti-1} + K_{2,ti} HP_{B,ti}} \right)$$

Despejando $L_{500,ti}$ quedaría la ecuación (10), cuyas variables fueron previamente definidas.

$$L_{500,ti} = -\frac{V_{85,ti}}{K_{1,ti}} \ln \left(1 - \frac{T_{f,ti} - T_{0,ti-1}}{T_{\infty} - T_{0,ti-1} + K_{2,ti} HP_{B,ti}} \right) \quad (10)$$

Por seguridad, la $L_{500,ti}$ se puede redondear hacia abajo. Esta longitud sería el valor teórico en donde se sobrecalientan el sistema de frenos. Esta distancia se puede referenciar desde el inicio de la pendiente de descenso en el caso de que se exceda de la temperatura límite sea excedida a partir del segundo tramo.

3.3 Paso 3: estimar el punto en donde el conductor es consciente de la situación y está en capacidad de decidir el uso la rampa

En el paso anterior, se estimó la longitud en donde el conductor podría perder el control del vehículo a causa del sobrecalentamiento de los frenos. En ese instante, no necesita inmediatamente la rampa, dado que el conductor necesita tiempo para entender la situación y tiempo para decidirse a utilizar la rampa. Durante ese tiempo, el camión sin control se desplazará una cierta distancia a lo largo de la carretera hasta tomar la decisión de ingresar a la rampa. Por lo tanto, el objetivo de este paso es determinar esa longitud. Esta distancia se puede obtener mediante el tiempo de percepción y reacción más la distancia de decisión. El tiempo de percepción y reacción, acorde a la AASHTO (2011), es de 2,5 s y que abarca a la mayoría de conductores. Entonces, esta distancia se obtiene con la velocidad de operación del tramo y ese tiempo (ver ecuación 11), en donde los 3600 permite transformar los segundos a horas:

$$d_{pr} = \left(\frac{2,5}{3600} \right) V_{85,ti} \quad (11)$$

Donde:

dpr = distancia en donde el conductor es consciente de que el camión ha perdido la capacidad de frenado (mi), y,
 $V_{85,ti}$ = velocidad de operación del tramo i.

Por otro lado, la distancia de visibilidad de decisión es aquella distancia para seleccionar una velocidad y una trayectoria adecuadas e iniciar y maniobras complejas, tal como, utilizar la rampa de escape, dado que pueden involucrar daños materiales y una mayor exposición del conductor a lesiones. Acorde a la AASHTO (2011), se puede asumir que esta maniobra corresponde a una maniobra tipo C, D o E. La maniobra de evasión C corresponde al cambio de velocidad trayectoria/dirección en carretera rural (t varía entre 10,2 y 11,2 s). La maniobra de evasión D incluye el cambio de velocidad trayectoria/dirección en carretera suburbana (t varía entre 12,1 y 12,9 s) y la maniobra de evasión E corresponde al cambio de velocidad trayectoria/dirección en carretera urbana (t varía entre 14,0 y 14,5 s). La distancia de visibilidad de decisión se calcula con la ecuación (12).

$$DSD = \left(\frac{1,47}{5280} \right) (V_{85,ti})(t) \quad (12)$$

Donde:

DSD = distancia de visibilidad de decisión en la cual, el conductor toma la decisión de utilizar la rampa de escape (mi),

$V_{85,ti}$ = velocidad de operación del tramo i, y,

t = tiempo total para realizar la maniobra hasta ingresar a la rampa de escape (s), el cual depende de la maniobra.

Por lo tanto, la distancia de decisión para el uso de la rampa de escape (DD_{re}) es la suma de las dos distancias anteriores, tal como se muestra en la ecuación (13), cuyas variables ya fueron definidas previamente.

$$DD_{re} = \left(\frac{2,5}{3600} \right) V_{85,ti} + \left(\frac{1,47}{5280} \right) (V_{85,ti})(t) \quad (13)$$

3.4 Paso 4: estimar el punto en donde se alcanza la velocidad de operación de 80 mi/h

Para ello, se puede utilizar la velocidad de ingreso de la rampa como velocidad de referencia para calcular esa longitud. Esa velocidad es igual a 80 mi/h (≈ 130 km/h). Con este supuesto, se presentan dos casos:

Caso 1: la longitud del tramo en donde se excede los 500 °F es suficientemente larga para alcanzar la velocidad de 80 mi/h. En este escenario, se requiere calcular el desnivel para alcanzar esa velocidad, para ello se puede utilizar la ecuación (14) despejada de los principios de la cinemática:

$$h_{ti} = \frac{V_{80}^2 - V_{0,ti}^2}{2g} \quad (14)$$

Donde

h_{ti} = desnivel para alcanzar la velocidad de 80 mi/h en el tramo i (mi),

V_{80} = velocidad final del tramo i igual a 80 mi/h - (mi/h),

$V_{0,ti}$ = velocidad de operación inicial del tramo i (mi/h),

g = aceleración de la gravedad igual a 78919,11 (mi/h²).

Entonces, la longitud en donde se alcanza la velocidad de 80 mi/h se calcula de con la ecuación (15):

$$L_{80,ti} = (L_{ti} - L_{500,ti}) \left(\frac{h_{ti}}{i_{ti}} \right) \quad (15)$$

Donde

$L_{80,ti}$ = longitud para alcanzar la velocidad de 80 mi/h (mi),

L_{ti} = longitud total del tramo i (mi),

$L_{500,ti}$ = longitud del tramo i en donde se alcanza la temperatura de 500° F (mi),

h_{ti} = desnivel para alcanzar la velocidad de 80 mi/h (mi), y,

i_{ti} = pendiente del tramo i (decimal).

Caso 2: la longitud del tramo en donde se excede los 500 °F no es suficientemente larga para alcanzar la velocidad de 80 mi/h. En esta situación, la longitud, restante del tramo, no es suficiente para alcanzar la velocidad de 80 mi/h, por lo que se alcanzará en el siguiente o siguientes tramos. Entonces, lo primero que hay que determinar es la velocidad que el camión alcanzará al final de tramo, para ello se utiliza la misma ecuación (14) en donde se despeja la velocidad final, tal como se ve en la ecuación (16).

$$V_{f,ti} = \sqrt{V_{0,ti}^2 + 2gh_{ti}} \quad (16)$$

Donde

$V_{f,ti}$ = velocidad al final del tramo i (mi/h),

$V_{0,ti}$ = velocidad de operación inicial del tramo i (mi/h),

g = aceleración de la gravedad igual a 78919,11 (mi/h²), y,

h_{ti} = desnivel en el tramo i (mi), que se calcula mediante la ecuación (17).

$$h_{ti} = i_{ti} (L_{ti}) \quad (17)$$

Donde

i_{ti} = pendiente del tramo i (decimal), y

L_{ti} = longitud total del tramo i (mi).

Si en el próximo tramo aún no es posible de alcanzar la velocidad de 80 mi/h, entonces se debe repetir el cálculo con la ecuación (16) hasta encontrar un tramo en donde se alcance esa velocidad. Cuando suceda esto, en ese tramo, se debe seguir el procedimiento descrito en el caso 1.

3.5 Paso 5: determinar la localización de la rampa de escape

En los dos pasos anteriores, se estimaron los puntos de la pendiente en descenso en donde el sistema de frenos alcanza los 500 °F y el punto en donde el vehículo sin control alcanza la velocidad de 80 mi/h. La rampa de escape para camiones se deberá colocar entre esos dos puntos. La ubicación exacta dependerá de si existen algunas curvas complicadas de maniobrar, alguna población cercana o la topografía permite colocar la rampa, tal como se menciona en las recomendaciones de la AASHTO (2011).

3.6 Paso 6: estimar las dimensiones del lecho de frenado

Para la estimación de las dimensiones de la rampa de escape (AASHTO, 2011), se utiliza una velocidad de ingreso a la rampa de 80 mi/h (preferentemente 90 mi/h). También se toma en cuenta, el material que se va a colocar en la rampa, lo cual determina la resistencia al rodamiento (R). Hay que también considerar si el lecho de frenado tiene una sola pendiente o es compuesta, lo cual afecta a la dimensión del lecho.

4. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Analizar la necesidad y ubicación de una rampa de escape en una carretera rural si la pendiente en descenso está compuesta por tres tramos: 9,5 % (1,05-mi), 5,5 % (2,34-mi) y 3,0 % (7,75-mi). Considerar un camión de 45 toneladas de peso bruto, como vehículo de diseño.

4.1 Paso 1: analizar la necesidad de la rampa de escape

Para valorar la necesidad de la rampa de escape, se necesita comparar la velocidad máxima de descenso seguro con la velocidad de operación del camión de diseño. Antes de la estimación de la velocidad máxima para un descenso seguro se deben obtener algunos resultados previos. La difusividad (K_1) y el parámetro de transferencia de calor (K_2) se calcula mediante las ecuaciones (4) y (5), respectivamente. Dada la complejidad de la ecuación principal del GSRs, el cálculo de la velocidad máxima se puede realizar mediante tanteos. El primer cálculo se realizará con una velocidad de 20 mi/h.

$$K_1 = 1,5 (1,1852 + 0,0331 V)$$

$$K_1 = 1,5 (1,1852 + 0,0331 \times 20) = 2,771 \text{ h}^{-1}$$

$$K_2 = \frac{1}{0,1602 + 0,0078 V}$$

$$K_2 = \frac{1}{0,1602 + 0,0078 \times 20} = 3,163 \text{ °F/hp}$$

También se debe calcular las fuerzas de arrastre con la ecuación (7):

$$F_{\text{drag}} = 459,35 + 0,132 V^2$$

$$F_{\text{drag}} = 459,35 + 0,132 (20)^2 = 512,150 \text{ lb}$$

Con este resultado y la ecuación (6) se calcula la potencia del sistema de frenos para cada pendiente:

$$HP_{B,t1} = (W\theta_{t1} - F_{\text{drag}}) \frac{V}{375} - HP_{\text{eng}}$$

$$HP_{B,t1} = (99208 (0,095) - 512,150) \frac{20}{375} - 63,33$$

$$HP_{B,t1} = 412,039 \text{ hp}$$

$$HP_{B,t2} = (W\theta_{t2} - F_{\text{drag}}) \frac{V}{375} - HP_{\text{eng}}$$

$$HP_{B,t2} = (99208 (0,055) - 512,150) \frac{20}{375} - 63,33$$

$$HP_{B,t2} = 200,395 \text{ hp}$$

$$HP_{B,t3} = (W\theta_{t3} - F_{\text{drag}}) \frac{V}{375} - HP_{\text{eng}}$$

$$HP_{B,t3} = (99208 (0,030) - 512,150) \frac{20}{375} - 63,33$$

$$HP_{B,t3} = 68,118 \text{ hp}$$

Entonces, la temperatura de frenado en cada pendiente se obtiene con la ecuación (1). Para la primera pendiente, se ingresa con una temperatura inicial de 150 ° F, luego, la temperatura límite de esa pendiente (ecuación 2) sería la temperatura inicial de la siguiente pendiente, y así sucesivamente. Para el cálculo de la $T_{\text{lím}}$, se debe calcular aumento de temperatura debido a una parada de emergencia (TE) utilizando la ecuación (3):

$$T_E = 3,11 \times 10^{-7} \times W \times V^2$$

$$T_E = 3,11 \times 10^{-7} \times 99208 \times (20)^2 = 12,341 \text{ °F}$$

Entonces, la temperatura límite del sistema de frenos al final del tramo 1 es:

$$T_{f,t1} = T_{0,t1} + [T_{\infty} - T_{0,t1} + K_2 HP_{B,t1}] \left[1 - e^{-\frac{K_1 \times L_{t1}}{V}} \right]$$

$$T_{f,t1} = 150 + [90 - 150 + 3,163 (412,039)] \left[1 - e^{-\frac{2,771 \times 1,05}{20}} \right]$$

$$T_{f,t1} = 318,292 \text{ °F}$$

$$T_{\text{lím},t1} = T_{f,t1} + T_E = 318,292 + 12,341 = 330,634 \text{ °F}$$

$$T_{\text{lím},t1} = T_{0,t2}$$

Para el tramo 2 se tiene:

$$T_{f,t2} = T_{0,t2} + [T_{\infty} - T_{0,t2} + K_2 HP_{B,t2}] \left[1 - e^{-\frac{K_1 \times L_{t2}}{V}} \right]$$

$$T_{f,t2} = 330,634 + [90 - 330,634 + 3,163 (200,395)] \left[1 - e^{-\frac{2,771 \times 2,34}{20}} \right] = 439,484 \text{ °F}$$

$$T_{\text{lím},t2} = T_{f,t2} + T_E = 439,484 + 12,341 = 451,826 \text{ °F}$$

$$T_{\text{lím},t2} = T_{0,t3}$$

Y para el tramo 3:

$$T_{f,t3} = T_{0,t3} + [T_{\infty} - T_{0,t3} + K_2 HP_{B,t3}] \left[1 - e^{-\frac{K_1 \times L_{t3}}{V}} \right]$$

$$T_{f,t3} = 451,826 + [90 - 451,826 + 3,163 (68,118)] \left[1 - e^{-\frac{2,771 \times 7,75}{20}} \right] = 355,459 \text{ °F}$$

$$T_{\text{lím},t3} = T_{f,t3} + T_E = 355,459 + 12,341 = 367,800 \text{ °F}$$

El valor de $T_{\text{lím},t3}$ sería la temperatura final al terminar de descender por la pendiente con una velocidad constante de 20 mi/h. Este valor es menor que los 500 °F que se tiene como límite. Entonces, se debe realizar nuevos tanteos con velocidades más altas. En la Tabla 2, se muestran los cálculos con 25 mi/h y 30 mi/h siguiendo el procedimiento anterior. Para estos tanteos, el peso bruto del vehículo, la temperatura inicial de la primera pendiente, las pendientes y sus longitudes tienen el mismo valor que en el tanteo inicial.

Tabla 2. Resultados de los tanteos para estimar la velocidad máxima de descenso segura

N°	V (mi/h)	T ₀ (°F)	HP _B (hp)	T _f (°F)	T _{lim} (°F)
1	25	150,000	528,894	320,180	339,464
2	25	339,464	264,339	461,251	480,534
3	25	480,534	98,993	412,562	431,846
1	30	150,000	644,429	320,169	347,937
2	30	347,937	326,963	476,505	504,274
3	30	504,274	128,547	454,009	481,778

Los valores que cambian son: con una velocidad de 25 mi/h, el $K_1 = 3,019 \text{ h}^{-1}$, $K_2 = 2,815 \text{ °F/hp}$, $F_{\text{drag}} = 541,850 \text{ lb}$ y $T_E = 19,284 \text{ °F}$, mientras que, con una velocidad de 30 mi/h, se tiene un $K_1 = 3,267 \text{ h}^{-1}$, $K_2 = 2,537 \text{ °F/hp}$, $F_{\text{drag}} = 578,150 \text{ lb}$ y $T_E = 27,768 \text{ °F}$.

En la Tabla 2 se puede ver, que para 25 mi/h la temperatura del sistema de frenos al final de las tres pendientes es de 431,846 °F, mientras que para 30 mi/h la temperatura es de 481,778 °F. A pesar, de que ambos tanteos no exceden con la temperatura límite al final de la pendiente en descenso, uno de los tramos intermedios con la velocidad de 30 mi/h si lo hace. En este caso, y por seguridad, la velocidad máxima para un descenso seguro será de 25 mi/h, dado que, si se elige 30 mi/h, se corre el riesgo de pérdida de control en el segundo tramo. El tiempo que el vehículo se demorará en llegar al final de la pendiente con una velocidad constante de 25 mi/h, será de 26,74 min que se obtiene de la ecuación de la cinemática: $(1,05 + 2,34 + 7,75) \times 60/25$. Cabe mencionar que si el conductor de este vehículo circula a una velocidad no mayor de 25 mi/h $\approx 40 \text{ km/h}$, no tendrá sobrecalentamiento de los frenos y evitará la pérdida del control del vehículo.

En este paso, también es necesario determinar la velocidad de operación. Para ello se debe calcular las mismas usando las ecuaciones de la Tabla 1. Al ser una pendiente en descenso, las ecuaciones que se van a utilizar son aquellas que tienen pendientes negativas. Entonces, para el primer tramo, que tiene una pendiente del 9,5%, se tiene:

$$V_{85,t1} = 0,07L + 66,09 = \left[\frac{0,07 (1,05/1,609) + 66,09}{1,609} \right] = 41 \text{ mi/h}$$

El valor de 1,609 permite transformar las unidades del SI al sistema inglés. Ahora este valor se multiplica por 0,97 y se le suma 1 mi/h:

$$V_{85,t1} = 41 \times 0,97 + 1 = 40,77 \approx 41 \text{ mi/h}$$

Para el tramo 2 (5,5%):

$$V_{85,t2} = 0,04L + 72,68 = \left[\frac{0,04 (2,34/1,609) + 72,68}{1,609} \right] = 45 \text{ mi/h}$$

$$V_{85,t2} = 45 \times 0,97 + 1 = 44,65 \approx 45 \text{ mi/h}$$

Para el tramo 3 (3%):

$$V_{85,t3} = 0,05L + 73,65 = \left[\frac{0,05 (7,75/1,609) + 73,65}{1,609} \right] = 46 \text{ mi/h}$$

$$V_{85,t3} = 46 \times 0,97 + 1 = 45,62 \approx 46 \text{ mi/h}$$

Dado que la velocidad de operación de los tres tramos es mayor a la velocidad máxima segura de 25 mi/h, entonces, es necesaria la construcción de una rampa de escape para camiones, ante la alta posibilidad de sobrecalentamiento de los frenos de los camiones.

4.2 Paso 2: estimar el punto en donde el sistema de frenos alcanza los 500 °F

Una vez que se ha justificado la construcción de la rampa, ahora es necesario determinar su ubicación. Para ello, lo primero que se requiere es estimar el punto en donde el sistema de frenos alcanza los 500 °F. Entonces, se calculan las temperaturas finales en cada tramo de la pendiente en descenso usando las velocidades de operación calculadas, tal como se muestra en la Tabla 3.

En la Tabla 3, se puede ver que en el segundo tramo se excede de los 500 °F. En ese segmento (tramo i), se procede calcular la distancia hasta donde se alcance esos 500 °F. Entonces, se realiza el retro-cálculo con las mismas ecuaciones del modelo GSRS. Lo primero que se debe hacer, es estimar la temperatura límite de ese tramo se calcula con la ecuación (8):

$$T_{f,t2} = 500 - T_E = 500 - 62,479 = 437,521 \text{ °F}$$

Luego, se utiliza la ecuación (10) para encontrar el valor de la longitud en donde se alcanza los 500 °F:

$$L_{500,t2} = -\frac{V_{85,t2}}{K_{1,t2}} \ln \left(1 - \frac{T_{f,t2} - T_{0,t1}}{T_{\infty} - T_{0,t1} + K_{2,t2} \text{HP}_{B,t2}} \right)$$

$$L_{500,t2} = -\frac{45}{4,012} \ln \left(1 - \frac{437,521 - 369,317}{90 - 369,317 + 1,956 (504,275)} \right)$$

$$L_{500,t2} = 1,1376 \text{ mi}$$

Por seguridad, esa longitud se puede redondear hacia abajo y quedaría 1,13-mi. Con esa longitud, la temperatura alcanzada será de 499,566 °F. Desde el inicio de la pendiente, la longitud hasta el punto en donde se alcanza los $\sim 500 \text{ °F}$ sería 2,18-mi.

4.3 Paso 3: estimar el punto en donde el conductor es consciente de la situación y está en capacidad de decidir el uso la rampa

Para calcular este punto es necesario utilizar la ecuación (13). Para ello, dado que se trata de una carretera rural (maniobra C), el tiempo de decisión puede tomarse como 11,2 s (máximo valor en ese rango). Entonces la distancia de decisión para el uso de la rampa de escape (DD_{re}) es:

$$DD_{re} = \left(\frac{2,5}{3600} \right) V_{85,t2} + \left(\frac{1,47}{5280} \right) (V_{85,t2})(t)$$

$$DD_{re} = \left(\frac{2,5}{3600} \right) 45 + \left(\frac{1,47}{5280} \right) (45)(11,2) = 0,17\text{-mi}$$

Esta distancia, a partir del segundo tramo es 1,30-mi (1,13+0,17) y con referencia el inicio de la pendiente sería 2,35-mi.

Tabla 3. Resultados de las temperaturas del sistema de frenos calculada con la velocidad de operación calculadas

N°	V ₈₅ (mi/h)	T ₀ (°F)	HP _B (hp)	T _r (°F)	T _{lim} (°F)
1	41	150,000	892,658	317,452	369,317
2	45	369,317	504,275	502,472	564,951
3	46	564,951	211,176	531,223	596,509

4.4 Paso 4: estimar el punto en donde se alcanza la velocidad de operación de 80 mi/h

Lo siguiente es estimar el punto en donde se alcanza la velocidad de operación de 80 mi/h. Para ello, se tiene dos casos. Dado que no es posible conocer a qué caso pertenece la situación del tramo *i*, se debe calcular ambos casos. En el primer caso, se calcula el desnivel para alcanzar la velocidad de 80 mi/h utilizando la ecuación (14).

$$h_{12} = \frac{V_{80}^2 - V_{0.12}^2}{2g} = \frac{80^2 - 45^2}{2(78919,11)} = 0,028 \text{ mi}$$

Ahora bien, la longitud en donde se alcanza esa velocidad se estima con la ecuación (15):

$$L_{80.12} = (L_{12} - L_{500.12}) \left(\frac{h_{12}}{i_{12}} \right) = (2,34 - 1,30) \left(\frac{0,028}{0,055} \right) = 0,53\text{-mi}$$

Entonces, la distancia desde el tramo 2 sería: 1,83-mi, que es el resultado de la suma de 1,30 + 0,53. Este valor no excede de la longitud total del segundo tramo, entonces, no es necesario calcular el caso 2. Por lo tanto, el punto en donde se alcanza la velocidad de operación de 80 mi/h es el tramo 2 a 1,83-mi desde su inicio. La ubicación de ese punto desde el inicio de la pendiente es: 2,88-mi que se obtiene sumando 1,05 + 1,13 + 0,17 + 0,53.

4.5 Paso 5: determinar la localización de la rampa de escape

Con los resultados de los pasos 3 y 4, se procede a determinar la localización de la rampa de escape. Entonces, ésta se debe colocar entre 2,35 hasta 2,88-mi desde el inicio de la pendiente en descenso. En ese segmento, se debe analizar la localización exacta en base a la topografía de la zona, el diseño geométrico, cercanía de poblaciones, etc. No se debe colocar la rampa antes de los 2,35-mi o después de los 2,88-mi. No se debe considerar a 2,88-mi como el sitio exacto de colocación de la rampa, dado que la AASHTO menciona que los 80-90 mi/h sólo se usan para calcular la longitud de lecho de frenado. Además, hay que considerar que maniobrar un camión cargado a velocidades cercanas a 80 o 90 mi/h es complicado de dirigir.

4.6 Paso 6: Estimar las dimensiones del lecho de frenado

No se calcula este paso, dado que no es objeto de estudio.

5. DISCUSIÓN

Este estudio muestra un procedimiento para realizar los cálculos analíticos para justificar la necesidad de la rampa de escape para camiones, así como determinar su ubicación. A pesar de mostrar el procedimiento con un ejemplo representativo, hay que considerar ciertos aspectos. En primer lugar, el método GSRS fue diseñado para determinar la velocidad máxima segura en las pendientes en descenso, por lo que es coherente que se utilice una velocidad constante a lo largo de todos los tramos en la pendiente. En la práctica, es muy difícil que el conductor mantenga una velocidad constante, considerando el diseño geométrico (planimetría y perfil) que puede existir en esos tramos. Por ello, es que se utiliza la velocidad de operación, como un valor más representativo. No obstante, esta velocidad debe ser obtenida para las condiciones locales (calibración de ecuaciones) o en recolección de datos de campo.

Por otro lado, se asume que la velocidad de 80 mi/h, es la velocidad en donde se considera el punto máximo para colocar la rampa. Este valor es bastante alto cuando se trata de dirigir un camión cargado con pérdida del sistema de frenos. Sin embargo, ante la falta de otro elemento de referencia, se puede usar este valor. Así mismo, para el cálculo de la velocidad de operación al final en cada tramo, cuando ya no se controla el vehículo, se supone una tasa de aceleración constante, lo cual también puede diferir de la realidad. La fricción, la geometría, entre otros elementos pueden afectar esa tasa de aceleración. La tasa de aceleración debería ir en aumento debido a que se trata de una pendiente en descenso, lo cual podría estudiarse a profundidad en investigaciones futuras.

Otro elemento a considerar es que si el camión utilizado en la actualización del GSRS se ajusta al parque de camiones que se dispone en un país o región. Por ejemplo, en Ecuador, en base a las dimensiones y los pesos máximos del país (*Acuerdo Ministerial N° 018*, 2016) el vehículo Kenworth T680 Series (2016) es similar al camión 3S2 cuyo peso máximo es de 47 ton (47000 kg). En ese acuerdo, también se observa que el peso máximo de todos los vehículos es de 48 ton (48000 kg). El camión Kenworth T680 tiene un peso de 36287 kg. Aparentemente, para valores superiores al del camión del estudio no sería aplicable este procedimiento o habría que utilizarlo con cautela. Sin embargo, cabe mencionar que es muy peligroso y/o costoso realizar investigaciones con vehículos tan pesados, es más, parte del estudio de actualización del GSRS se realizó con un programa computacional (Mechanical Simulation Corp., 2018), que permitió complementar los datos de campo. Hasta que no exista más estudios con vehículos de mayor peso, se debiera utilizar este procedimiento. También, hay que considerar, que el acuerdo en mención, incluye los pesos máximos legales, y no necesariamente serán los que circulen por la futura vía o los que actualmente lo estén haciendo por una vía existente en particular, lo cual se determinará en base al estudio del tránsito correspondiente.

6. CONCLUSIONES

Este estudio tuvo por objetivo presentar un nuevo procedimiento para justificar la necesidad de las rampas de escape para camiones en carreteras y determinar su ubicación. A continuación, se presentan las siguientes conclusiones:

El procedimiento descrito permite mejorar los cálculos analíticos para justificar la necesidad y estimar la localización de la rampa. Corrige y completa lo que hasta el momento se ha desarrollado. Además, los detalles de los cálculos permitirán que los ingenieros en libre ejercicio o en las entidades de gobierno, docentes y estudiantes, tengan una mejor comprensión sobre el tema. Su uso puede aportar a la disminución de siniestros viales fatales o a la reducción de daños materiales, lo cual está alineado con los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas y de los objetivos y metas de los países interesados en mejorar la calidad de vida de su población.

El GSRS debe ser explorado y adoptado por países en donde existe topografía montañosa y/o escarpada, como en los Andes, ya que existe una mayor probabilidad de que el diseño incluya pendientes largas en descenso. Además, de servir a los diseñadores, el GSRS también sirve para los conductores cuando en la señalización vertical se sugiere una velocidad máxima de descenso, por lo tanto, una adecuada capacitación para ellos permitirá una reducción en la siniestralidad asociada con el sobrecalentamiento del sistema de frenos.

La principal limitación de este estudio es que se basa en resultados de investigaciones previas que poseen sus propias limitaciones. Sin embargo, a pesar de esto, el estudio permite extender el conocimiento sobre el procedimiento analítico sobre la necesidad y ubicación de las rampas de escape, completando las normas vigentes o ampliando sus rangos de aplicación. Es aplicable para diversos pesos de vehículos, para pendientes compuestas e incluye el reciente ajuste del GSRS debido a la modernización de los camiones actuales.

REFERENCIAS

- AASHTO. (2011). *A policy on geometric design of highways and streets*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Bowman, B. L., & Coleman, J. A. (1990). Grade Severity Rating System. *ITE Journal (Institute of Transportation Engineers)*, 60(7), 19–24.
- Echaveguren, T., & Vargas, S. (2013). Evaluación de la necesidad de lechos de frenado en pendientes descendentes usando principios de confiabilidad. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(3), 221–235. https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v28n3/en_art01.pdf
- Echaveguren, T., Vargas, S., & Nancuffil, J. (2007). Metodología de análisis y diseño de lechos de frenado. *Revista Ingeniería de Construcción*, 22(3), 175–184. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732007000300004>
- Espinoza, M., Altamira, A., & Marcet, J. (2016). Estudio de ubicación y necesidad de nuevos lechos de frenado en caminos de la provincia de San Juan. *XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*, 1–25.

- FHWA. (1989). *Grade Severity Rating System Users Manual*. FHWA-IP-88-015.
- FHWA. (2009). *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways (MUTCD)*. Federal Highway Administration.
- García-Ramírez, Y. D., & Alverca, F. (2019). Calibración de Ecuaciones de Velocidades de Operación en Carreteras Rurales Montañas de Dos Carriles: Caso de Estudio Ecuatoriano. *Revista Politécnica*, 43(2), 37–44. <https://doi.org/10.33333/rp.vol43n2.1012>
- Mechanical Simulation Corp. (2018). *TruckSim Mechanical Simulation*.
- Moomen, M., & Ksaibati, K. (2020). Updating the Grade Severity Rating System (GSRS) for Wyoming Mountain Passes: A Description of Tests and Results. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 13(1), 75–81. <https://doi.org/10.4271/02-13-01-0005>
- MOP. (2019). *Manual de Carreteras*. Ministerio de Obras Públicas Chile.
- Moreira, C. (2011). *O modelo qrsp para a quantificação do risco na saída de veículos da pista em rodovias (Doctoral dissertation)*. Universidades de São Paulo.
- Acuerdo Ministerial N° 018, 18 (2016) (testimony of MTOP). https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/08/STT_C_AM_MT_OP_018_2016_Pesos-y-Dimensiones.pdf
- Ruhl, R. L., Inendino, L. V., Southcombe, E. J., Ruhl, R. A., & Fittanto, D. A. (2006). Usable models for free and forced cooling of commercial vehicle drum brakes. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2006-01-3557>
- Valdes, R., Strong, K., & Shuler, S. (2018). *Emergency escape ramps (EER) improvements. Report CDOT-2018-20*.
- Witheyford, D. K. (1992). *National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 178: Truck Escape Ramps*.
- Zanoli, P. R. (2003). *Área de escape para caminhões desgovernados (Master dissertation)*. Universidad de São Paulo.

BIOGRAFÍA



Yasmany García-Ramírez es Ingeniero Civil en la Universidad Técnica Particular de Loja - UTPL (Ecuador) en el 2006. Especialista en Ingeniería de Caminos de Montaña en la Universidad Nacional de San Juan - UNSJ (Argentina) en el 2009. Doctor en Ingeniería Civil en la UNSJ (Argentina) en el 2014. Es docente asociado de la UTPL (Ecuador) en materias de diseño de carreteras en grado y posgrado. Actualmente es director de maestría en Ingeniería Civil con mención en carreteras de montaña de la misma universidad. Posee alrededor de 40 publicaciones entre libros, revistas y conferencias relacionadas con las carreteras y educación en ingeniería civil.

El Análisis Probabilístico de Seguridad como Método para Evaluar el Diseño de Sistemas Instrumentados de Seguridad de un Irradiador de Cobalto- 60 (Categoría IV)

Montaluisa, Diego¹  ; Villacis, William² 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Quito - Ecuador

²Departamento de Ciencias Nucleares, Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador

Resumen: El Departamento de Ciencias Nucleares de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador cuenta en sus instalaciones con un Irradiador de Cobalto-60. Este irradiador de categoría IV se instaló en el año 1975 y desde su inicio esta instalación cuenta con rigurosos protocolos de operación, seguridad radiológica y mantenimiento. Debido a los antiguos sistemas de control, el personal del departamento ha desarrollado nuevos diseños para los sistemas de instrumentos de seguridad. La evaluación del diseño de estos se realizó con la metodología de análisis probabilístico de seguridad. Esta evaluación incluyó algunos sistemas instrumentados de seguridad para determinar si los diseños desarrollados cumplen con los requisitos de seguridad radiológica establecidos por organismos internacionales como el Organismo Internacional de Energía Atómica y el Consejo Internacional de Protección Radiológica. El presente estudio ha considerado el proyecto de recarga del irradiador Cobalt-60 hasta una actividad de 50 000 Ci. Adicionalmente, en este estudio se ha priorizado los sistemas instrumentados de seguridad relacionados con el evento inicial la pérdida de blindaje húmedo (pérdida de agua en la piscina), que puede derivar en una sobreexposición del POE. Además, para la evaluación del punto de exposición, se ha optado por uno cercano al blindaje húmedo con un escenario hipotético de que ocurrió una pérdida total de agua; esta situación podría suceder durante un terremoto moderado. Al considerar el evento mencionado, se ha evaluado esta condición por medio de la metodología APS y se logró obtener como resultado que la probabilidad de ocurrencia anual para una sobreexposición superior a 2000 mSv para el POE es de $9,91E-8$, este resultado se encuentra por debajo del límite establecido por la Comisión Internacional de Protección Radiológica para estos eventos.

Palabras clave: Sistemas Instrumentados de Seguridad, Análisis Probabilístico de Seguridad, Irradiador de Cobalto-60.

Probabilistic Safety Analysis as Method for Design Assessment of Safety Instrumented Systems of a Cobalt-60 Irradiator (Category IV)

Abstract: The Department of Nuclear Sciences of Escuela Politécnica Nacional of Ecuador has in its facilities a Cobalt-60 Irradiator. This category IV irradiator has been installed in 1975 and since its beginning, this facility has worked with rigorous protocols of operation, radiologic safety and maintenance. Due to old control systems, the department staff has developed new designs for safety instrumented systems. The design assessment of this one was carried out with the probabilistic safety analysis methodology. The assessment included some safety instrumented systems for determining if the designs developed comply the requirements of radiological safety set by international organizations as the International Energy Atomic Agency and the International Council Radiological Protection. The present study has considered the recharge project of Cobalt-60 irradiator until an activity of 50 000 Ci. Additionally, this study has prioritized the safety instrumented systems related to initial event: the loss wet shielding (water loss in the pool), that can derive in an overexposure of the POE. Further, for the evaluation of the exposition point, one close to the wet shield has been chosen with a hypothetical scenario that a total loss of water occurred, this situation could happen during a moderate earthquake. Considering the mentioned event, this situation has been assessed by the PSA methodology and obtaining as a result that the annual occurrence probability of an overexposure higher to 2 000 mSv for the POE is $9,91E-8$, this result is under the limit established by the International Council Radiological Protection for these events.

Keyword: Safety Instrumented Systems, Probabilistic Safety Analysis, Cobalt-60 Irradiator.

1. INTRODUCCIÓN

El irradiador de Co-60 que posee la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador es una instalación de irradiación

categoría IV, lo que quiere decir que es un irradiador panorámico con almacenamiento húmedo para fuentes selladas (IAEA, 2010), esta categorización se basa en el diseño de la facilidad, accesibilidad y blindaje de la fuente radiactiva.

*diego.montaluisa@epn.edu.ec
Recibido: 31/03/2021
Aceptado: 22/02/2022
Publicado en línea: 23/03/2022
10.33333/rp.vol49n2.03
CC 4.0

El irradiador de Co-60 es una instalación con acceso controlado para el público en el cual, la fuente radiactiva es almacenada y completamente blindada por una piscina de agua (blindaje húmedo) cuando la fuente no está en uso. Este irradiador posee dos tipos de blindajes: el blindaje seco (búnker), compuesto por un cuarto con paredes de hormigón reforzado de 1,5m de espesor y un blindaje húmedo, compuesto por una piscina de agua de 4,5 m de profundidad (Villacis, 2019).

Para garantizar la seguridad del personal, la instalación del irradiador de Co-60 trabaja con estrictos protocolos con relación a la protección radiológica, estos se basan en los tres principios que son: distancia, tiempo de exposición y blindaje. Todos estos procedimientos se encuentran dentro de su sistema integrado de gestión del Centro de Irradiación (CIR) y a cargo del personal de la instalación. Además, el irradiador posee varios sistemas de seguridad que intervienen en el control de los posibles eventos iniciantes para minimizar los efectos producidos por una sobreexposición potencial que puedan recibir el Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) o público en general debido a la probabilidad de ocurrencia de incidentes y accidentes que se pueda presentar en la instalación.

En este estudio, se dará prioridad al análisis de los sistemas que intervienen con un escenario específico relacionado a la pérdida del blindaje húmedo y los sistemas instrumentados de seguridad (SIS) que intervienen en el control de ese evento para evitar una posible sobreexposición del POE. Para esto, se realizará una evaluación de los SIS diseñados por medio de la metodología del análisis probabilístico de seguridad (APS) recomendada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés) para instalaciones nucleares sin reactor. La metodología APS cuantitativa requiere de otras metodologías adicionales como son el análisis de árbol de fallo (FTA), análisis de árbol de evento (ETA), análisis de confiabilidad y una metodología para la estimación de dosis efectiva. Cabe recalcar que, en este estudio, se concentra el análisis en los SIS sin considerar todos los protocolos y procedimientos de protección radiológica que son parte del sistema integrado de gestión del CIR, con el objetivo de determinar si los diseños de los SIS se encuentran dentro de los objetivos de seguridad propuestos por organismos internacionales como son la IAEA y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés).

2. MARCO TEÓRICO/METODOLOGÍA

2.1 Sistemas instrumentados de seguridad

Los SIS son aquellos que tienen una función de seguridad activa. El irradiador de Co-60 tiene varios SIS diseñados para evitar y controlar eventos no deseados durante los procesos de irradiación. Estos sistemas fueron diseñados de forma centralizada y son administrados por un controlador lógico programable con nivel integrado de seguridad 1 (PLC – SIL 1 por sus siglas en inglés), según las especificaciones del fabricante de Siemens, este PLC de seguridad cumple con la normativa IEC61508 y la tasa de falla por hora definida por esta normativa para la categoría SIL 1 es de $1,00E-5$. El suministro de energía de todo el irradiador es respaldado por

una unidad ininterrumpida de poder (UPS) con una tasa de falla por hora de $4,10E-7$, lo que permite que el componente general de la fuente de alimentación de 110/220 (SG2) tenga una probabilidad de falla (PF) considerablemente bajo. Con estos antecedentes, se realiza una revisión rápida de los SIS diseñados para minimizar las consecuencias del evento no deseado de sobreexposición relacionados con la disminución del nivel del blindaje húmedo, estos SIS son los siguientes (Montaluisa, 2021):

- Sistema de detección de radiación exterior (SS4)
- Sistema de control de nivel de blindaje húmedo (SS5)
- Sistema de alarmas interiores (SS8)

2.1.1 Sistema de detección de radiación exterior-SS4

La función de este sistema es detectar niveles de radiación sobre los niveles permitidos en el área restringida (sobre la piscina). La Figura 1 ilustra el diagrama funcional del sistema de detección de radiación exterior diseñado.

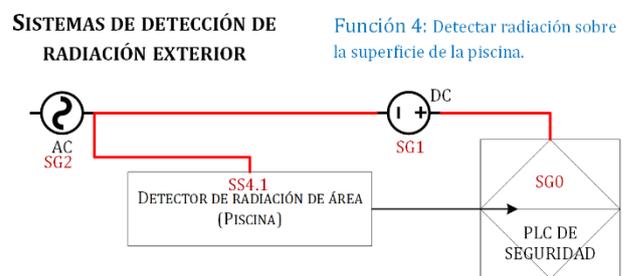


Figura 1. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema de detección de radiación exterior

El diseño propuesto está conformado por un elemento principal que es el detector de radiación de área, este componente tiene una interfaz de comunicación digital hacia el PLC de seguridad y por medio de un cable industrial con conectores DB9, envía permanentemente la medición de la radiación detectada en el búnker.

A continuación, se enlistan los componentes básicos que se consideraron para el análisis del sistema SS4 por medio de la metodología FTA (el resultado de este análisis se muestra más adelante).

- **SS4.1a:** Detector de radiación de área.
- **SS4.1b:** Cable de comunicación (conector rack panel DB9).
- **SG0:** Controlador Lógico Programable (PLC) de seguridad.
- **SG1:** Fuente de alimentación de 24Vdc
- **SG2:** Fuente de alimentación de 110/220Vac con UPS regulado.

Se debe considerar que los componentes SG2, SG1 y SG0 son generales para todos los otros sistemas.

2.1.2 Sistema de control del nivel de blindaje húmedo – SS5

La función de este sistema es la de mantener el nivel del blindaje húmedo lo suficientemente alto para contener los niveles de radiación debajo de los límites permitidos, la Figura

2 ilustra en forma de bloques el funcionamiento del sistema de control de nivel de blindaje húmedo diseñado.

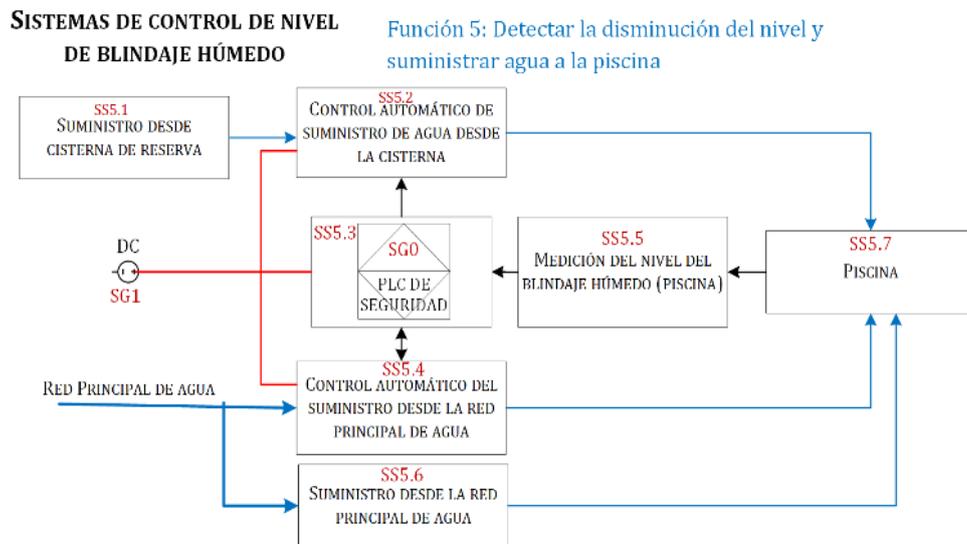


Figura 2. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema de control de blindaje húmedo

Este SIS está conformado por tres suministros de agua hacia el reservorio del blindaje húmedo (piscina). El primer suministro es el proporcionado por una cisterna de reserva y que por medio de un control automático restablece el nivel de agua evaporada en la piscina. El segundo suministro proviene de la red principal de agua, al igual que el anterior, este tiene un sistema de control automático que restablece el nivel de agua. Si este ha disminuido anormalmente o si el nivel ha disminuido en 30 cm desde la superficie de la piscina, para tener más control, este sistema tiene un censo de flujo que permite determinar si existe algún problema con el suministro desde la red principal de agua para enviar alguna alerta al sistema. El tercer modo de suministro es netamente mecánico y es por medio de una válvula de boya que se abre cuando el nivel de la piscina ha descendido más de 50 cm, esta válvula envía una señal de activación al PLC de seguridad para que este gestione las alarmas correspondientes. Adicionalmente, este sistema cuenta con un sensor de nivel continuo con un transmisor de corriente que permite detectar permanentemente el nivel de agua en la piscina y la activación de la válvula de boya trabaja como otro sensor de nivel discreto que trabajaría en forma paralela al sensor continuo para casos excepcionales.

A continuación, se enlistan los componentes básicos que se consideraron en el análisis del sistema SS5 con la metodología FTA (el resultado de este análisis se muestra más adelante):

- **SS5.1a:** Cisterna de reserva
- **SS5.2a:** Tuberías menor a 1"
- **SS5.2b:** Electroválvula 1"
- **SS5.2c:** Solenoide electroválvula
- **SS5.2d:** Cableado de control Bornera (4 conexiones-crimp termination)
- **SS5.4a:** Tuberías menores a 3"
- **SS5.4b:** Válvula principal de paso - Válvula manual
- **SS5.4c:** Electroválvula 2"
- **SS5.4d:** Sensor de flujo
- **SS5.4e:** Transmisor de flujo

- **SS5.4f:** Cableado de control Bornera (4 conexiones-crimp termination)
- **SS5.4g:** Solenoide electroválvula
- **SS5.4h:** Cableado de control Bornera (4 conexiones-crimp termination)
- **SS5.5a:** Sensor de nivel
- **SS5.5b:** Transmisor de nivel
- **SS5.5c:** Cableado de control Bornera (4 conexiones-crimp termination)
- **SS5.5d:** Relé general
- **SS5.5e:** Cableado de control Bornera (4 conexiones-crimp termination)
- **SS5.6a:** Válvula de bola (boya) 2"
- **SS5.6b:** Tuberías menores a 3"
- **SS5.6c:** Válvula principal de paso - Válvula manual
- **SG0:** Controlador Lógico Programable (PLC) de seguridad
- **SG1:** Fuente de alimentación de 24Vdc

2.1.3 Sistema de alarmas interiores – SS8

La función de este sistema es la de advertir al personal POE y público en general de niveles anormales de radiación en el área restringida del irradiador de Co-60, la Figura 3 ilustra en forma de bloques, el funcionamiento del sistema de alarmas interiores diseñado.

Este sistema está conformado por tres componentes que permiten advertir al personal POE de la ocurrencia de algún evento no deseado. Las balizas ubicadas en las paredes del búnker, permiten tener una alerta visual y audible para el personal presente en las instalaciones del irradiador. El módulo GSM y el Módulo de servidor web están dentro del PLC de seguridad y tienen la misión de enviar una alerta al demás personal relevante que no se encuentre en la instalación del irradiador.

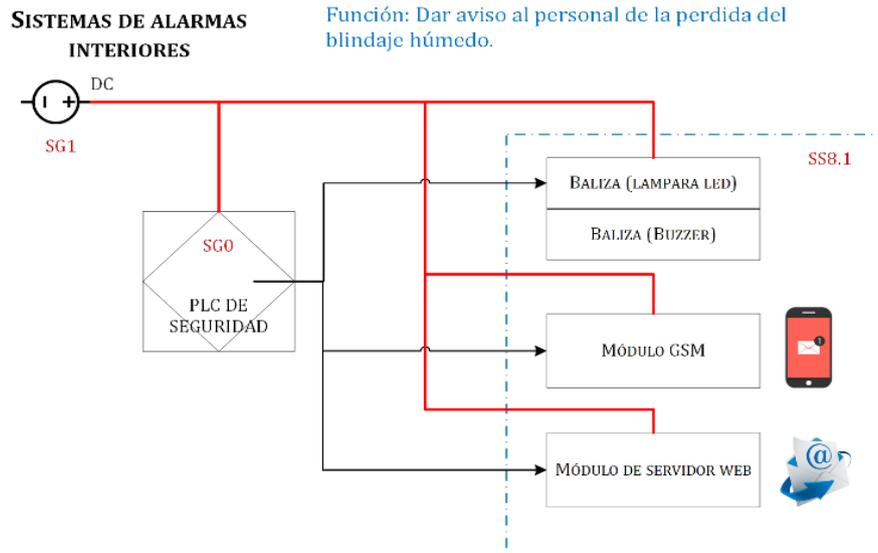


Figura 3. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema de alarmas interiores

A continuación, se enlistan los componentes básicos considerados en el análisis del sistema SS8 por medio de la metodología FTA (el resultado de este análisis se muestra más adelante):

- **SS8.1a:** Lámpara LED
- **SS8.1b:** Buzzer (anunciador)
- **SS8.1c:** Cable de comunicación (circular 6 pines)
- **SS8.1d:** Módulo GSM
- **SS8.1e:** Relé general
- **SG0:** Controlador Lógico Programable (PLC) de seguridad
- **SG1:** Fuente de alimentación de 24Vdc
- **SG1.a:** Rectificador estático

2.2. Determinación de confiabilidad de componentes básicos

La confiabilidad de los componentes básicos permite realizar una evaluación cuantitativa de lo SIS, la probabilidad de fallo se puede obtener a partir de la teoría de la confiabilidad de componentes, por medio de las siguientes ecuaciones:

$$R(t) = e^{-\mu t} \quad (1)$$

Donde:

- R: Confiabilidad de un sistema/componente/equipo
 μ : Tasa de fallo del sistema/componente/equipo
 t: Tiempo o periodo de evaluación de la confiabilidad

$$P(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (2)$$

Donde:

- P: Probabilidad de falla de un sistema/ componente /equipos
 R: Confiabilidad de un sistema/componente/equipo
 μ : Tasa de fallo del sistema/componente/equipo
 t: Tiempo o periodo de evaluación de la confiabilidad

Entonces, para determinar la probabilidad de fallo de los componentes se requiere como información previa la tasa de fallo y el periodo de tiempo de evaluación de la confiabilidad.

La tasa de fallo se puede obtener a partir de: parámetros evaluados durante los procesos de mantenimiento, datos del fabricante o a partir de bibliografía especializada, por ejemplo:

- IAEA – TECDOC 930: Generic component reliability data for research reactor PSA, International Agency Energy Atomic.
- Military Handbook: Reliability prediction of electronic equipment, Department of Defense of UU.SS.

El periodo de evaluación utilizado para determinar la probabilidad de fallo se basa en las horas laborables del personal de la instalación del irradiador, ya que, una de las políticas de la instalación es la operación supervisada del mismo, por tal motivo, se considera las horas laborales del POE al año que son 2 000 h.

2.3 Metodología de evaluación de los SIS

Para la evaluación de los sistemas instrumentados de seguridad diseñados para el irradiador de Co-60 se utilizó la metodología APS facilitado por el IAEA en el documento técnico IAEA – TECDOC – 1267. Además, se consideró un estudio previo en el que se realiza un APS cualitativo del Irradiador de Co-60 (Villacís, 2019), como punto de partida para realizar el presente estudio.

Una dificultad que radica en esta metodología es la de obtener datos reales de la confiabilidad de los componentes y sistemas relacionados con la seguridad radiológica. Sin embargo, una gran ventaja de esta metodología es el alto grado de conocimiento que se adquiere de la instalación estudiada (Alderete & Elechosa, 2006).

Para el desarrollo de esta metodología, se requirió la intervención de funcionarios del irradiador de Co-60, entre estos estuvieron: el Coordinador del CIR, el Oficial de Seguridad Radiológica (OSR), el Operador del irradiador de Co-60 y demás personas involucradas en los procesos relacionados como son: dosimetría, mantenimiento y servicios generales. Además, se recurrió a la investigación bibliográfica con relación a la práctica de irradiación industrial.

Para el desarrollo adecuado del APS, es necesario caracterizar o especificar ciertas condiciones de la instalación como son:

- Fuentes exposición de radiación
- Eventos no deseados
- Eventos iniciantes
- Definición del escenario de evaluación

Fuente de exposición de radiación: Para el presente estudio, se considera como la fuente de exposición de radiación a los lápices de Co-60 que tienen una actividad nominal estimada en su conjunto de 50 000 Ci. Se considera este valor en función de la información recopilada referente al proyecto de repotenciación del irradiador de Co-60.

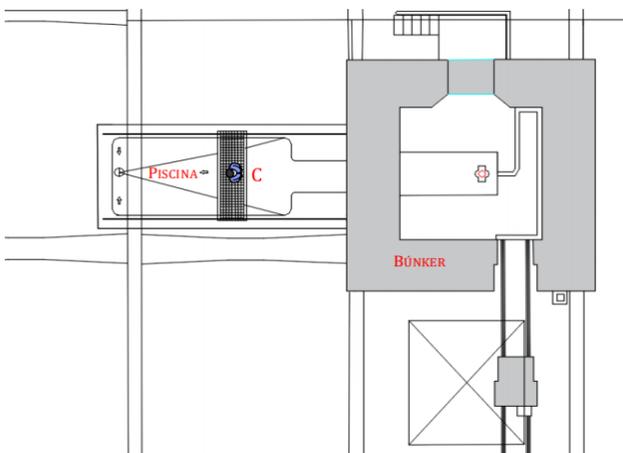
Eventos no deseados: El evento no deseado considerado en este estudio es el referente a la sobreexposición del personal POE, debido a que este es uno de los eventos más relevante en cuanto a gravedad, que podría ocurrir en un irradiador con fuentes selladas.

Eventos iniciantes: Los eventos iniciantes que se considera en este estudio están definidos en un estudio preliminar (Villacis, 2019) y se realizaron ciertas precisiones para poder realizar un análisis más específico. La descripción del evento iniciante es el siguiente:

Evento iniciante (EVI6): *Disminución del nivel del blindaje húmedo donde reposa la fuente de Co-60 debido a una falla de la integridad de la piscina:* Durante un evento natural (terremoto de magnitud entre 7 y 7,9 M_L) la estructura de la piscina colapsa, por lo que, el nivel del blindaje húmedo baja rápidamente, esto sucede cuando no hay personal en el área del irradiador de Co-60 (Montaluisa, 2021).

Definición del escenario de evaluación

Se considera el siguiente escenario, para determinar la dosis efectiva recibida. El operador se acerca a la piscina y tarda aproximadamente 1 minuto en darse cuenta del nivel bajo de la piscina. Por lo que se considera como el peor de los casos que la persona se encuentra sobre la piscina (punto C) a una distancia de 4,5 metros de la fuente de cobalto 60.



Distancia Punto C: 4,5 metros

Figura 4. Escenario del punto de evaluación para la estimación de dosis (punto C a 4,5 m de distancia de la fuente de cobalto 60)

2.3.1 Modelamiento del escenario

Para realizar el modelamiento del escenario dentro del APS se requieren otras metodologías adicionales como son:

- Análisis de árbol de fallo
- Análisis de árbol de evento

Análisis de árbol de fallo

Esta es una técnica para identificar y analizar factores que pueden contribuir a un evento especificado no deseado (denominado el evento superior o principal). Los efectos causales se identifican deductivamente, se organizan de una manera lógica y se representan gráficamente mediante un diagrama de árbol que describe los factores causales y sus relaciones lógicas con respecto al evento superior (Figura 5).

El análisis FTA que se utilizó en este estudio es cuantitativo y para el desarrollo del mismo, se empleó la teoría de confiabilidad explicado en el punto 2.2 para determinar las probabilidades de fallas anuales de los componentes básicos de los sistemas. De esta manera, se puede determinar la PF anual de cada uno de los SIS que intervienen en el control del evento iniciantes EVI6. Adicional a esta teoría, los operadores básicos más utilizados de la metodología FTA son: OR y AND y se definen de la siguiente forma (Crowl & Louvar, 2011):

OR:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (3)$$

Donde:
P: Probabilidad de falla

AND:

$$P = \prod_{i=1}^n (P_i) \quad (4)$$

Donde:
P: Probabilidad de falla

Análisis de árbol de evento

Esta es una técnica gráfica para la representación de secuencias mutuamente exclusivas de eventos que siguen a un evento iniciador de acuerdo con el funcionamiento/no funcionamiento de los diversos sistemas diseñados para mitigar sus consecuencias. Este análisis se puede aplicar cualitativa y cuantitativamente. Para determinar cuantitativamente la frecuencia de ocurrencia de un evento no deseado por medio de la metodología ETA, es necesario el resultado de PF obtenido de los diagramas FTA y a través de un operador AND se evalúa el diagrama ETA desarrollado, para esto se utilizó la Ecuación (4) definida anteriormente.

2.3.2 Evaluación de datos.

En este paso del APS, se realiza la evaluación de las consecuencias de los estados finales no deseados, todos los pasos anteriores a este podrían generar modelos que pueden ser evaluados y analizados de forma cualitativa y cuantitativamente. En este estudio, se realizó un análisis profundo sobre las consecuencias que puede sufrir el personal que labora en las facilidades y las personas que se encuentran alrededor en caso de sobreexposición de radiación, esto se

logra por medio de la estimación de dosis que puede recibir el POE en el interior de la facilidad.

Estimación de dosis efectiva

Para la estimación de dosis efectiva recibida por el POE se trabaja con el procedimiento E1 del documento técnico IAEA-TECDOC-1162 y se considera el tiempo de exposición de 1 minuto a una distancia de 4,5 m. La ecuación utilizada es la siguiente (IAEA, 2000):

$$E_{ext} = \frac{A \times CF_6 \times T_e \times (0,5)^{\frac{d}{d_{1/2}}}}{X^2} \quad (5)$$

Donde:

E_{ext} : Dosis efectiva desde una fuente puntual [mSv]

A: Actividad de la fuente = **50 000 Ci**

- En [kBq] si se utiliza el factor CF_6 en [mSv/h]/[kBq]
- **En [Ci] si se utiliza el factor CF_6 en [mSv/h]/[Ci]**

T_e : Duración de la exposición [h] = **0,016 h**

CF_6 : Factor de conversión para el Co-60

- 2,5E-07 [mSv/h]/[kBq]
- **9,5E+00 [mSv/h]/[Ci]**

X: Distancia desde la fuente puntual [m] = **4,5 m**

$d_{1/2}$: Valor medio de la capa para el Co-60 [cm]

- Agua: 10,99
- Concreto: 5,2
- **Aire: 9,42E+3**

d: Espesor del blindaje [cm]

Nota: Si se desea realizar el cálculo sin blindaje, se debe establecer el espesor del blindaje $d = 0$

Además, para realizar un análisis cuantitativo se requiere establecer los límites de las probabilidades de ocurrencia al año de eventos no deseados y la dosis efectiva recibida por el POE en el punto de evaluación, para esto, se referenció el presente estudio con los límites máximos establecidos por organismos internacionales como con el ICRP y el IAEA.

Tabla 1. Rango de Probabilidades de ocurrencias de eventos en un año y límites de dosis efectiva máxima

Categorización de eventos	Probabilidad de ocurrencia del evento en el año	Dosis efectiva máxima (mSv)
Secuencia de eventos que conducen a dosis tratadas como parte de la exposición normal	10^{-1} a 10^{-2}	< 50
Secuencia de eventos que conducen a efectos estocásticos solamente, pero sobre los límites de dosis	10^{-2} a 10^{-5}	1 - 500
Secuencia de eventos que conducen a dosis donde algunos efectos de la radiación son determinísticos	10^{-5} a 10^{-6}	200 - 5000
Secuencia de eventos que conducen a dosis donde la muerte es el resultado más probable.	$< 10^{-6}$	> 2 000

(ICRP, 1993), (IAEA, 2002)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se discutirán los resultados parciales y finales obtenidos durante el desarrollo del presente estudio.

Los resultados de la PF anual de los SIS que intervienen en el control del evento iniciante EVI6 se los obtuvo con la metodología FTA y con la teoría de confiabilidad de componentes. En la Figura 5, se ilustra a modo de ejemplo, el desarrollo de la metodología FTA del sistema de control de nivel de blindaje húmedo - SS5. La aplicación de la metodología FTA también se realizó a los SIS SS4 y SS8, el detalle de este estudio se encuentra en la referencia Montaluisa (2021).

Además, el uso de la metodología FTA cuantitativa permite identificar los componentes críticos de cada uno de los SIS por medio de una un análisis de Pareto, como se ilustra en la Figura 6.

A partir del análisis de Pareto del sistema de control de nivel de blindaje húmedo - SS5 se puede inferir que los componentes básicos que más influyen en la falla del SS5 son el sensor de flujo (SS5.4d) y el transmisor de flujo (SS5.4e).

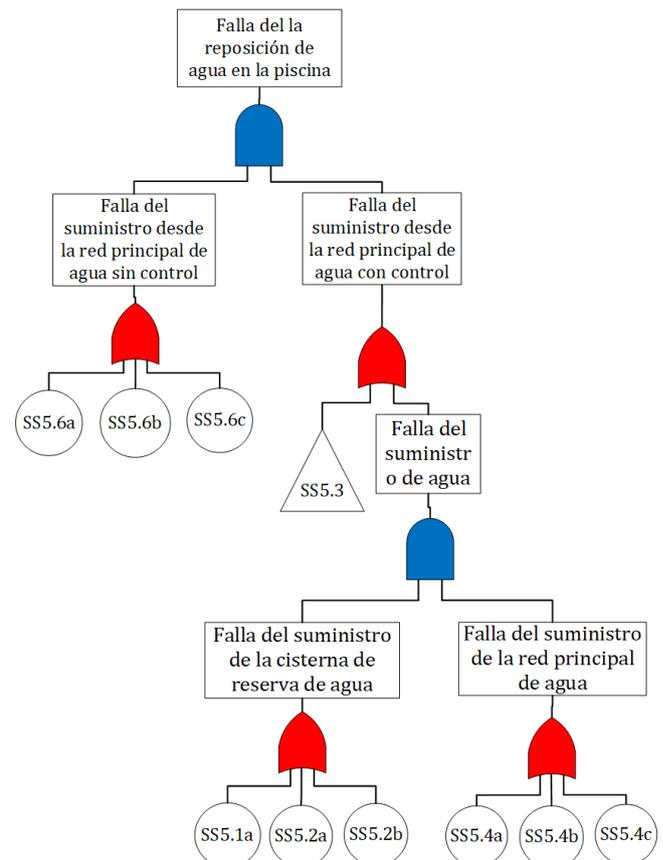


Figura 5. Diagrama FTA del sistema de control de nivel de agua del blindaje húmedo

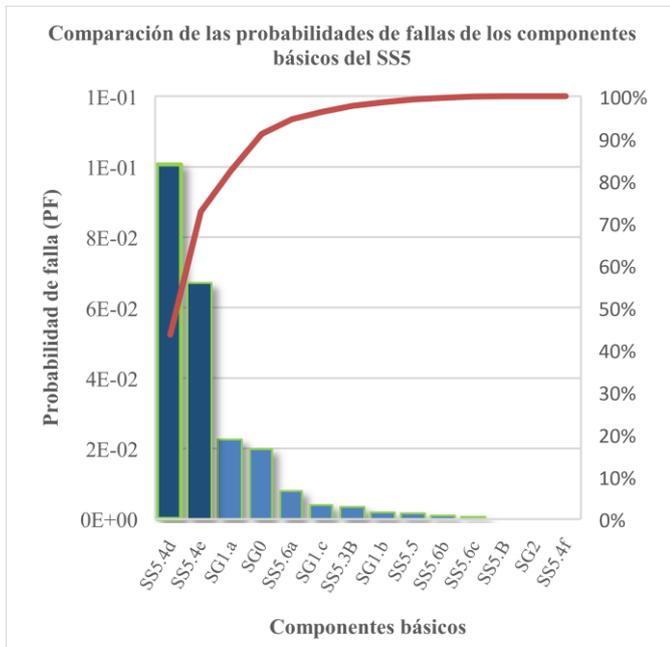


Figura 6. Análisis de Pareto de las probabilidades de falla de los componentes básicos del SS5

El análisis de Pareto se aplicó a los demás resultados obtenidos por la metodología FTA para los SIS SS4 y SS8 respectivamente y se logró determinar los componentes básicos que más influyen en todos los SIS que intervienen con el EVI6. A continuación, se resumen los componentes más influyentes de los SIS respectivamente (Montaluisa, 2021):

- Sistema de detección de radiación exterior (SS4).
 - SG4.1a: Detector de radiación de área
- Sistema de control de nivel de blindaje húmedo (SS5).
 - SS5.4d: Sensor de flujo

- SS5.4e: Transmisor de flujo
- Sistema de alarmas interiores (SS8).
 - SG1.a: Rectificador estático
 - SG0: Controlador Lógico Programable (PLC) de seguridad

Al desarrollar la metodología FTA indicada en el punto 2.3.1 a los SIS SS4, SS5 y SS8, se obtuvieron los siguientes resultados de PF (Montaluisa, 2021):

- PF anual del SS4: 1,07E-1
- PF anual del SS5: 1,95E-3
- PF anual del SS8: 4,75E-2

A partir de estos resultados de PF de los SIS, se aplica la metodología ETA para determinar la probabilidad anual de la ocurrencia del evento no deseado (sobreexposición del POE). Para determinar este parámetro, es necesario establecer los factores que intervienen y la probabilidad de ocurrencia que provocarían el evento iniciante, para esto se consideró referencias bibliográficas que permitan determinar la probabilidad de ocurrencia de un terremoto y de una de falla estructural de la piscina, estos dos factores son los que aportan a la ocurrencia del evento iniciante. Para el primer factor, la probabilidad de ocurrencia en el mundo de un sismo de gran magnitud 7,0 a 7,9 M_L es de 10 al año (Mannan, 2005). En cuanto al segundo factor se consideró la tasa de fallo (colapso) de una estructura de ingeniería en 1,00E-3 (Melchers & Beck, 2018).

En la Figura 7, se ilustra el diagrama ETA con todos los resultados obtenidos por la metodología FTA y el resultado final de la probabilidad anual de ocurrencia de una sobreexposición del POE derivada del evento iniciante EVI6, la cual es de 9,91E-8.

SIS que intervienen para evitar el evento iniciante			
	SS5	SS4	SS8
EVENTO INICIANTE DISMINUCIÓN DEL NIVEL DE AGUA EN LA PISCINA	CONTROL DE NIVEL DE BLINDAJE HÚMEDO Éxito: Controlar el nivel del blindaje húmedo (no baje más de 50 cm)	SISTEMA DE DETECCIÓN DE RADIACIÓN EXTERIOR Éxito: Detectar radiación sobre la superficie de la piscina.	SISTEMA DE ALARMAS INTERIORES Éxito: Dar aviso al personal del CIR de la pérdida de blindaje húmedo

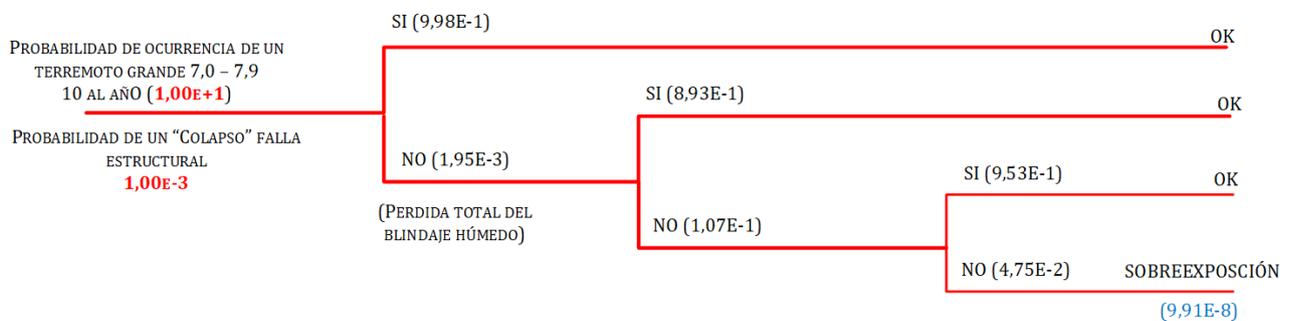


Figura 7. Diagrama ETA del evento iniciante EVI6

Para el cálculo de la estimación de la dosis recibida en el punto C (a 4,5 m de distancia de la fuente de Co-60), se aplica la Ecuación 5. Además, para este cálculo se consideró el escenario planteado en la Figura 4, con una fuente de Co-60 de actividad nominal de 50 000 Ci y un tiempo máximo de exposición del POE de 1 minuto.

Tabla 2. Estimación de dosis efectiva y probabilidad anual en el punto de evaluación C para 50 000 Ci con los diseños desarrollados

	Probabilidad Anual	Dosis efectiva (mSv)
Punto C'' (50 000 Ci)	9,91E-08	381,66

Nota:(tiempo de exposición para la dosis efectiva: 1 minuto)
(distancia a la fuente de Co-60: 4,5 m)

Con los resultados de la probabilidad de ocurrencia anual del evento no deseado y con la dosis efectiva estimada, se puede

determinar si los diseños de los SIS desarrollados cumplen con los objetivos de seguridad requeridos por las normativas internacionales indicadas en la Tabla 1.

En la Figura 8, se puede observar que el punto de evaluación se encuentra dentro de los límites de seguridad radiológica. Esto quiere decir que, con los SIS diseñados, existe una probabilidad anual de $9,91E-08$ de que ocurra una sobreexposición del POE a una dosis efectiva estimada de 381,66 mSv si el POE se expondría 1 minuto al escenario planteado en el presente estudio. Esta probabilidad está muy por debajo del límite requerido lo que garantizaría la operación de la instalación con lo que respecta a este evento iniciante. Además, es necesario considerar que existen protocolos y procedimientos entorno a la protección radiológica que disminuirían esta probabilidad de ocurrencia.

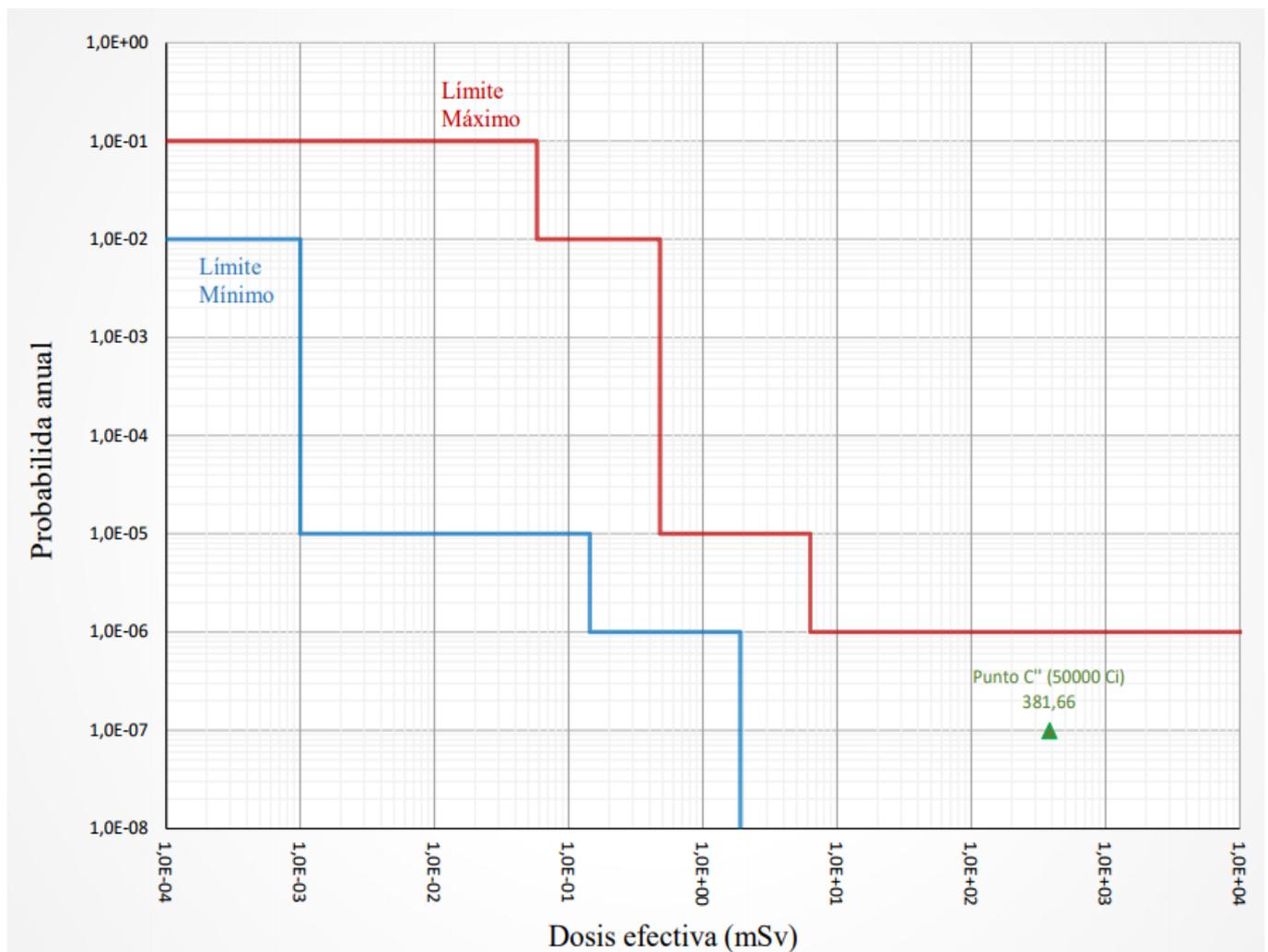


Figura 8. Ilustración del cumplimiento del escenario planteado dentro de los objetivos de seguridad de la evaluación realizada

4. CONCLUSIONES

El uso de la herramienta metodológica APS, permitió comprobar que los diseños de los sistemas instrumentados de seguridad desarrollados para el irradiador de Co-60 con

relación al evento iniciante de la pérdida total del blindaje húmedo cumplen con los límites de seguridad radiológica (para exposiciones mayores a 2 000 mSv, la probabilidad de ocurrencia anual debe ser menor al $1,00E-6$) establecidos por el Consejo Internacional de Protección Radiológica, ya que la

probabilidad de ocurrencia anual estimada para este evento fue de $9,91E-8$, muy por debajo del límite establecido.

La metodología FTA cuantitativa en combinación con la teoría de confiabilidad de componentes y por medio de un análisis de Pareto se logró establecer los componentes críticos dentro de los SIS, lo que permitió determinar que más del 50% de la probabilidad de las fallas reside en 1 o dos componentes básicos de cada sistema y de esta manera, poner un énfasis importante durante la selección e implementación de estos componentes.

La metodología APS es una herramienta que permite que el personal del Irradiador de Co-60 involucrado en el estudio, obtuviera un mayor conocimiento acerca de sus sistemas de seguridad tanto preventivos como de control, lo que mejoró el nivel de conciencia de los requerimientos de seguridad de las instalaciones y su intervención en el desarrollo de estos.

El resultado de toda esta evaluación fue basado exclusivamente en los sistemas instrumentados de seguridad del irradiador, por lo que, si consideramos que el CIR posee protocolos y procedimientos especiales en casos de emergencia, la probabilidad de ocurrencia anual de este evento disminuiría aún más, sin embargo, el hecho de que el SIS ya garantice una probabilidad por debajo del límite da una seguridad a la operación del irradiador de Co-60 y su futura repotenciación con 50 000 Ci.

REFERENCIAS

- Alderete, F., & Elechosa, C. (2006). Análisis Probabilístico de seguridad en Plantas Industriales de Irradiación. *Primer Congreso Americano del IRPA 2006* (pág. 9). México: Autoridad Regulatoria Nuclear - Argentina.
- Department of Defense. (1991). *MIL-HDBK-217F: Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment*. Washington DC.: Department of Defense United States of America.
- Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2011). *Chemical Process Safety, Fundamentals with applications* (Third ed.). Boston: Prentice Hall.
- Gruhn, P., & Cheddie, H. (2006). *Safety Instrumented System: Design, Analysis and Justification* (Segunda ed.). North Carolina, United States of America: ISA - the Instrumentation, System and Automation Society.
- IAEA. (2000). *IAEA - TECDOC - 1162 Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2002). *IAEA-TECDOC-1267 Procedures for conducting probabilistic safety assessment for non-reactor nuclear facilities*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2010). *Specific Safety Guide No. SSG-8: Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities*. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA).
- ICRP. (1993). *Protection from Potential Exposure: A conceptual framework - ICRP Publication 64*. Tarrytown: International Commission on Radiological Protection (ICRP).
- Mannan, S. (2005). *Lee's Loss Prevention in the Process Industries* (Third ed., Vol. 1). Burlington: Elsevier Butterworth Heinemann.

Melchers, R. E., & Beck, A. T. (2018). *Structural reliability Analysis and Prediction*. Hoboken: Wiley & Sons Ltd.

Montaluisa, D. F. (2021). Propuesta de mejoramiento del sistema de seguridad del irradiador de cobalto 60 del Centro de Irradiación de la EPN con enfoque en seguridad funcional (IEC61508). [Tesis Maestría]. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Villacis, W. (2019). Análisis Probabilístico de seguridad en una planta semi-industrial de irradiación que tiene una fuente de Co60 de 50000 Ci. UBA-FIUBA/ARN.

BIOGRAFÍAS



Diego Fernando Montaluisa Ipiales, nació en Quito el 11 de marzo de 1984. Ingeniero en Electrónica y Control por la Escuela Politécnica Nacional en el 2012, Master en Seguridad Industrial Mención en Prevención de Riesgos Laborales por la Escuela Politécnica Nacional en el 2021, labora como Especialista en el

Departamento de Ciencias Nucleares de la Escuela Politécnica Nacional desde el 2014 con las funciones principales de operación y mantenimiento del Acelerador de Electrones y el irradiador de Co-60 que son instalaciones propias del Departamento de Ciencias Nucleares.



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

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

Caracterización y Patología de los Muros de Tierra de las Construcciones Andinas Ecuatorianas

Lara, M. Lenin^{1,2,*} ; Bustamante, Rosa² 

¹Universidad Internacional del Ecuador, Facultad para la ciudad, paisaje y arquitectura, Quito, Ecuador

²Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Madrid, España

Resumen: A partir del análisis tipológico de las construcciones de adobe, tapial y bahareque de 50 inmuebles situados en las provincias de Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo y Bolívar, se han analizado las lesiones físicas, mecánicas, químico-biológicas y antrópicas producidas por los agentes atmosféricos y por el suelo, que afectan a las edificaciones en tierra cruda del área andina ecuatoriana y posteriormente las características físicas, resistencia mecánica y composición químico-mineralógica. Los resultados determinan que el agua afecta principalmente al 40% de los inmuebles por defectos constructivos, como la falta de sobrecimientos que facilitan las humedades en las partes bajas o de aleros pequeños que no protegen del agua de lluvia deteriorando los recubrimientos de barro, sobre todo de los bahareques y que se acentúa por el emplazamiento aislado de las edificaciones. Además, la dosificación empírica de la tierra utilizada con tamaño máximo de grava de 15-18mm más arenas está en la proporción de menos de 30% y poco más de 70% de arcillas y limos en las muestras de adobe y tapial; proporciones que varían en el bahareque con casi 55% de gravas -arenas y 45% de finos; con resistencias a compresión menores a 3MPa. Se han recogido las especies madereras, cañas y fibras utilizadas en la confección de las armaduras de cubiertas, entramados y mampuestos. La antigüedad de las edificaciones rurales sobrepasa los 50 años y el 82% de las estudiadas se encuentran en estado de abandono.

Palabras clave: construcción en tierra, patología constructiva, arquitectura andina ecuatoriana, patrimonio rural, Ecuador.

Characterization and Pathology of Earthen Building Walls in the Ecuadorian Andean Area

Abstract: From the typological analysis of adobe, rammed earth, and bahareque constructions of 50 properties located in the provinces of Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo, and Bolívar, the physical, mechanical, chemical-biological, and anthropic damages produced by atmospheric agents and by the soil have been analyzed, which affect raw earth buildings in the Ecuadorian Andean area and subsequently the physical characteristics, mechanical resistance, and chemical mineralogical composition. The results determined that water mainly affects 40% of the buildings due to construction defects, such as the lack of footings over foundations that facilitate dampness in the lower parts or small eaves that do not protect from rainwater, deteriorating the mud coatings, especially of the bahareque and that is accentuated by the isolated location of the buildings. In addition, the empirical earth mixture used with a maximum gravel size of 15-18mm plus sands is in the proportion of less than 30% and a little more than 70% of clays and silts in the adobe and rammed earth samples; proportions that vary in the bahareque, with almost 55% of gravel-sand and 45% of fines; with compressive strengths less than 3MPa. The wood species, reeds, and fibers used in the manufacture of roof trusses, frameworks, and masonry have been collected. The age of the rural buildings exceeds 50 years and 82% of those studied are in a state of abandonment.

Keywords: earth construction, constructive pathology, Ecuadorian Andean architecture, rural heritage, Ecuador.

1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador, muchas de las construcciones en tierra son patrimonio tangible de la arquitectura vernácula que se extiende por toda el área andina. La zona de estudio abarca la sierra central del país, construcciones rurales y periurbanas situadas entre los 2.950 m.s.n.m. hasta 6.310 m.s.n.m., en

donde predomina el clima mesotérmico seco con una temperatura promedio de 13°C en las provincias de Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo y Bolívar (Figura 1). En estas últimas seis décadas prima la construcción del bloque prensado de hormigón en el 43% de las viviendas; las técnicas de tierra como el adobe, adobones, tapial y bahareques constituyen el 7,76% de las construcciones rurales de un total

*leninlara@hotmail.com

Recibido: 25/05/2021

Aceptado: 22/02/2022

Publicado en línea: 23/03/2022

10.33333/rp.vol49n2.04

CC 4.0

de 1'130.319 de edificaciones registradas en el Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEC, 2010).

Se ha desplazado bruscamente esa transferencia recíproca del conocimiento ancestral de las construcciones de adobe, tapial, bahareque y *pared de mano* (muro monolítico de tierra con gran cantidad de paja aplicada en estado plástico similar al *cob*), o con caña y guadúa (*Guadua angustifolia*), pasando a denominarse materiales alternativos (Ceballos, 1992). En diciembre de 2007, se emite el Decreto de Emergencia del Patrimonio Cultural del Ecuador con el fin de rescatar y salvaguardar la identidad cultural, que genera un informe para proteger a las construcciones primitivas. Las provincias que son parte de este estudio poseen 4.855 edificaciones de los 14.597 bienes catalogados, concentrando el 30,8% de los inmuebles registrados (MCP, 2009; Cortés et al., 2019).

El área se caracteriza por la proximidad de varios pisos climáticos y ecosistemas, piedemontes, páramos andinos y glaciares, en donde se implantan las áreas rurales excepto en los páramos situados a 4.000 m.s.n.m. que representan el límite para las actividades humanas y que se utilizan para pastizales de los animales o recogida de leña (Yépez, 2020: 43-49). Además, el área se caracteriza por la presencia de volcanes, algunos en estado activo como el Cotopaxi (Martel et al., 2018:74-76). Hay que considerar que las amenazas en esta zona proceden del contexto volcánico, por fallas interplaca tipo *thrust*, fallas intraplaca de profundidad intermedia, y fallas superficiales, entre otras. En resumen, un modelo de convergencia oblicua según los investigadores y documentos sísmicos; los mismos que aumentan la vulnerabilidad y amenazas del riesgo.

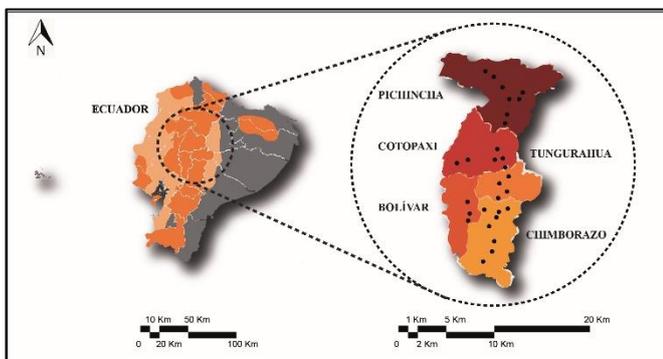


Figura 1. Ubicación de los inmuebles y lugar de toma de muestras

Fuente: Elaboración propia de autores / 2021

La arquitectura es el producto de una sociedad que ha idealizado una solución sencilla a un problema básico funcional y concreto que es habitar, que aprovecha las ventajas y recursos propios del lugar y genera una “*construcción simple, clara y fácil de entender*” (Rapoport, 1969). Esta nos ofrece un abanico abundante de soluciones constructivas de acuerdo con el clima, suelo y adaptación a los recursos, que han sido ampliamente difundidos con recomendaciones para mantener la construcción en tierra (PNUD, 1987a; 1987b; Guillaud et al., 1995).

A nivel de habitabilidad, el dinamismo de la construcción en tierra cruda se manifiesta en el confort térmico en climas cálidos, así como en un buen aislamiento al ruido aéreo, asociados a la masa, inercia térmica y regulación higrométrica

natural (Faria, 2007). La conductividad térmica es baja si se compara con otros materiales de construcción, 0,371 W/mK en adobes sin fibras que se reduce a 0,349 W/mK en adobes con fibras (Piñas et tal., 2020). Sin embargo, los muros sin aislamiento térmico en climas fríos son similares a los de ladrillo, por lo que es inminente aumentar el espesor del muro o bien incorporar un aislamiento térmico para que sean confortables. Pues la temperatura de las casas de tierra apisonada sin aislamiento desciende alrededor de 5° respecto a las que lo tienen (Soebarto, 2009). En la Tabla 1 se indica la temperatura promedio de las ciudades representativas del estudio y los tipos predominantes.

Tabla 1. Caracterizaciones de la tipología edificatoria basada en la condición climática y el promedio de precipitaciones de los años 2017 – 2019 (Climate, 2018)

LOCALIZACIÓN	TEMPERATURA °C PRECIPITACIÓN mm	TIPOLOGÍA EN TIERRA
PICHINCHA	12,3°C Σ 2877 mm	Adobe 5 Tapial 4 Bahareque 1
COTOPAXI	8,8 °C Σ 1946 mm	Adobe 4 Tapial 4 Bahareque 4
BOLÍVAR	10,8 °C Σ 4355 mm	Adobe 2 Tapial 2 Bahareque 2
TUNGURAHUA	11,6 °C Σ 1402 mm	Adobe 3 Tapial 2 Bahareque 5
CHIMBORAZO	7,3 °C Σ 1462 mm	Adobe 4 Tapial 5 Bahareque 3

Fuente: Elaboración propia de autores / 2021

La tierra de las construcciones sufre mayor deterioro que otros materiales, porque en el endurecimiento del barro no se produce una nueva cristalización de componentes, como en la cal o el cemento, convirtiéndose el agua en su agente principal de deterioro porque puede reblandecerlo (Monjo, 1998). Posteriormente, la falta de mantenimiento agudiza el deterioro, acotando que el estado de conservación de los edificios de las zonas urbanas es mejor que el de las zonas rurales porque generalmente presentan encalados, revocos de cal, yeso o cemento, los cuales evitan la erosión de los muros de adobe o bahareque de las edificaciones de muchos centros históricos (Lara et al., 2021), o bien se convierten en la *capa de sacrificio* que protege al material de constitución del muro.

El principal objetivo de las normativas e investigaciones para consolidar los muros de tierra es evitar el derrumbe producido por los seísmos, y por consiguiente eliminar situaciones de riesgo. Se pueden citar: las cerchas prefabricadas de acero galvanizado insertadas en las juntas del cerramiento de adobe cada 90cm para conseguir construcciones sismo resistentes, módulo que permite abrir puertas, ventanas y escaleras (Orta et al., 2009); la aplicación de mallas de fibras sintéticas a ambos lados del muro y unidas con cuerdas (Solis et al., 2015); la ayuda de perfiles angulares de PVC en la fijación de una red para mejorar la capacidad de deformación y ductilidad frente a solicitaciones horizontales inducidas por un seísmo (Varum et al., 2011); o bien construcciones híbridas de hormigón y

tapias prefabricados (Zawistowski et al., 2020), aunque la arcilla sufre cambios dimensionales por retracción o dilatación ante variaciones de humedad y temperatura, afectando su adherencia al hormigón (Velarde et al., 2021). En cualquier caso, en áreas rurales, el adobe reforzado con diversas técnicas es una alternativa viable y competitiva por su menor impacto ambiental en lugar de reemplazarlas con mamposterías (Cárdenas et al., 2021).

Los tipos constructivos de tierra analizados son el tapial, adobe, adobones (mayores dimensiones que el adobe) y bahareque (Figura 2). Este último es un entramado de madera cuyo hueco está armado por un entrelazado de elementos verticales u horizontales (cañas), relleno y recubierto con tierra. Incluso se han utilizado en la región del Zulia-Venezuela, conchas de coco (Henneberg de León, 2012), y grauvaca “piedra de ojo” de color gris pardo en el relleno de los bahareques conformados por horcones o pies derechos separados a distancias que oscilan entre 0,65m y 2,40m.

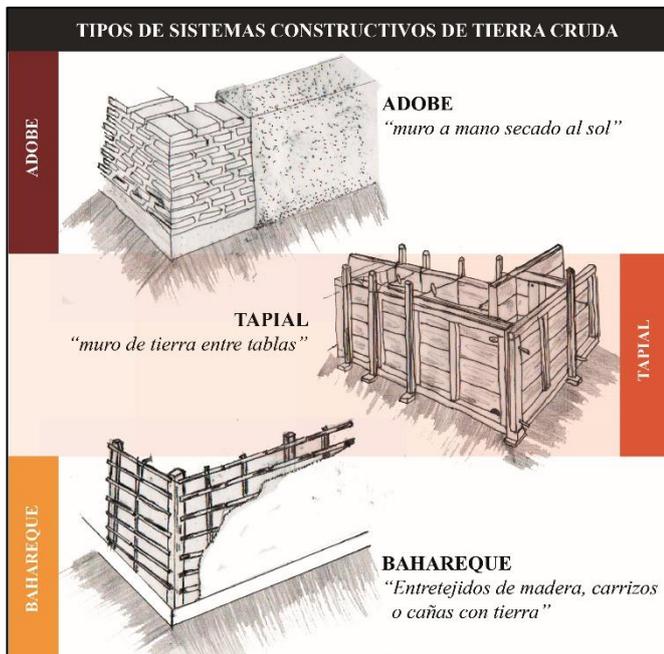


Figura 2. Tipos de sistemas constructivos de tierra cruda (Lara, 2018; 31-41)
Fuente: Elaboración propia de autores / 2021

2. ANÁLISIS, PROCESOS Y METODOLOGÍA

Las construcciones de tapial analizadas son de una planta con muros de sección que varía de 50cm a 70cm x 90cm a 1m de altura del cajón, y altura total del muro entre 2,20m a 2,40m con tejado cerámico a dos aguas. Los adobones son de 60x30x15cm (*largo, ancho, grueso*), y los adobes de 40x20x15cm; muros también de una planta con cubierta a dos aguas, con evidente falta de buen enjarje en las esquinas entre adobes o adobones, o entre las divisiones internas, además de que muchas de las construcciones carecen de un encadenado de coronación del muro (*viga collar*). El zócalo de 15cm de altura, a veces inexistente, no protege a los muros de la entrada de agua. Sin embargo, en el entorno rural se cuenta con bahareques de una y dos plantas, con tejado a dos aguas; entramados variables de aproximadamente 1,5m de ancho por 2,20m a 2,40m de altura con pies derechos y tornapuntas de

eucalipto (*Eucalyptus globulus*); y cañas de carrizo (*Phragmites communis*) colocadas horizontalmente que reciben el recubrimiento de barro.

2.1 Patología de la construcción en tierra

El territorio ecuatoriano es un libro abierto de ejemplos constructivos en tierra cruda, aunque se han analizado las construcciones que por accesibilidad y diálogo con los usuarios facilitaron la inspección *in situ*. De un total de 74 edificaciones que en un principio eran parte del estudio, solo se llegaron a procesar 50 con información óptima: 18 inmuebles de adobe, 17 de tapial y 15 construidas con bahareques.

El material utilizado para la investigación se ha basado en el levantamiento de las características más importantes: tipo, geo-referencia, materiales y procesos patológicos, entre otros, además, de la documentación fotográfica (Figura 3), y mapas explicativos de las lesiones, e histórica en su caso (Levicoy and Lira, 2020). En la ficha de recogida de datos se han clasificado las lesiones que permiten cuantificar los daños y la incidencia en el estado de conservación: físicas, mecánicas, químicas, biológicas y antrópicas.

2.1.1 Lesiones físicas

Las lesiones de tipo físico causadas principalmente por la entrada del agua, son las más frecuentes en el 40% de los inmuebles, que se manifiesta en la desintegración del material de tierra (Lara, 2018; 31-41). En particular, del revoco de estas construcciones rurales llamado vulgarmente “chocoto”, casi inexistente por su composición pues la tierra utilizada en la zona de estudio procede de los sembríos que tienen menor proporción de arcilla. La humedad de capilaridad en el 22% de los inmuebles, se debe a una falta de concepción integral del diseño que no aísla la vivienda de los huertos y sembríos colindantes mediante bordillos, aceras perimetrales, cunetas o drenajes, así como por la ausencia de una cadena inferior de piedra o sobrecimiento para evitar la saturación y ascenso capilar en las partes bajas de los muros. El ascenso capilar produce erosión y desprendimiento del revestimiento de adobes (Figura 3.a) o de bahareques dejando visible las cañas, evidenciando el entramado y deformándolas (Figura 3.b y c).

La humedad de filtración de agua de lluvia en el 18% de los inmuebles se produce principalmente por la ausencia de aleros en los testeros o de escaso vuelo, que expone a los muros directamente a la lluvia y salpicaduras constantes acelerando el proceso de erosión (Figura 3.d y e). Las partes bajas resultan más afectadas por el escurrimiento del agua desde las partes altas, a las que suma el salpique en superficies duras o por estancamiento en las depresiones del suelo (Beckett et al., 2020). Mientras que el 10% restante presenta lesiones combinadas físicas y mecánicas. Por otro lado, el ingreso del agua de lluvia en los tejados originando deformaciones por hinchazón, merma y curvatura, produce el desprendimiento de tejas que se reemplaza con chapa metálica y el recubrimiento de los bahareques (Figura 3.d y e).

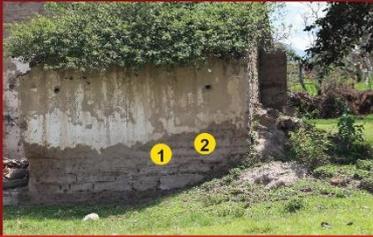
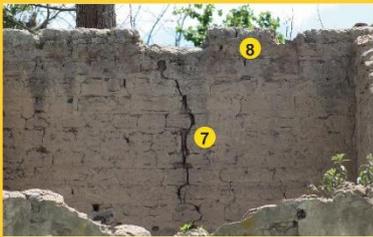
REGISTRO FOTOGRÁFICO	DESCRIPCIÓN DE LESIÓN
	3.a. Humedad por capilaridad que ha producido el desprendimiento del revestimiento del muro de adobe.
	3.b. Humedad por capilaridad y de filtración de bahareque y desprendimiento del recubrimiento.
	3.c. Crecimiento de vegetación en cubierta, desprendimiento del recubrimiento y deformación de las cañas del entramado.
	3.d. Grieta oblicua en la esquina de la construcción con adobones, falta de alero en el testero y desprendimientos en el alero lateral.
	3.e. Crecimiento de vegetación en muro y en las partes bajas que carecen de sobrecimiento y acera perimetral.
	3.f. Grieta atravesando los adobes y las juntas por falta de encadenado o protección en la cabecera.

Figura 3. Lesiones de los tipos constructivos analizados. (1) Humedad capilar, (2) Desprendimientos, (3) Crecimiento vegetal, (4) Deformaciones, (5) Fisura, (6) Sobrecimiento inexistente, (7) Grieta, (8) Falta de encadenado

Fuente: Elaboración propia de autores / 2021

2.1.2 Lesiones mecánicas

El 22% de los inmuebles presenta grietas que atraviesan la sección del muro, de los adobes y las juntas (Figura 3.f); y el 18% corresponde a fisuras que son de menor profundidad o alteran solamente el revestimiento de tierra (Figura 3.b). Las juntas son gruesas y en las construcciones de adobe se recomienda que no sean mayores a 2cm.

La respuesta patológica mecánica se produce por la falta de nivelación y compactación previa del suelo, y como se ha indicado antes, por la ausencia del encadenado de piedra en la base (Figura 4) que produce asentamientos del muro debido a la deformación o hundimiento de la superficie del terreno por efectos de las cargas, que sumados a la erosión de los mampuestos debilita la consolidación de los muros dando como resultado fisuras y grietas que en mayor o menor escala producen desprendimientos y alteran la composición estructural de los mismos.

Se ha demostrado que los muros de tapial de un espesor de más de 60cm han resistido sismos durante siglos y que la altura del muro no debe ser mayor a 8 veces el espesor del muro (Minke, 2005). Pero la ausencia de la viga collar o solera en la parte superior de los muros contribuye a la aparición de grietas e impide el arriostamiento de la cubierta. Además, los muros frente a un terremoto, el valor de aceleración de la parte superior es mucho mayor que el de la parte inferior (Li et al., 2021). En las Figuras 3.d, e y 4, se aprecia que la viga collar no tiene continuidad pues se introduce parcialmente en los testeros. Además, las cubiertas de teja a dos y cuatro aguas son muy pesadas para las estructuras de los bahareques y para las armaduras de los tejados, lo cual produce hundimientos del tejado o el colapso de los muros (Jinwuth et al., 2010). Podrían soportar mejor las cubiertas de paja que presentaban solamente 5 edificaciones “*aquellas del páramo*” de los 50 inmuebles inventariados.

2.1.3 Lesiones químico – biológicas

En las áreas rurales se manifiesta principalmente daños biológicos más que químicos que se presentan en las ciudades. Identificándose en el 10% de los inmuebles inventariados los daños por la vegetación que coloniza los muros (Figura 4) y en menor proporción los microorganismos y xilófagos que atacan a las fibras orgánicas. Las especies madereras más utilizadas en las armaduras de las cubiertas y bahareques son el canelo (*Aniba canelilla*), laurel (*Cordia alliodora*), pino (*Pinus radiata*), pigue (*Piptocomadiscolor*) y eucalipto (*Eucalyptus globulus*); otra especie utilizada es el cadi (*Phytelphas Aequatorialis*) similar al carrizo (*Phragmites communis*). Sin embargo, la radiación ultravioleta también es responsable del deterioro y envejecimiento acelerado de los elementos de madera y su agrietamiento superficial (Henneberg de León, 2012; Shupe, et al., 2008: 4-5).

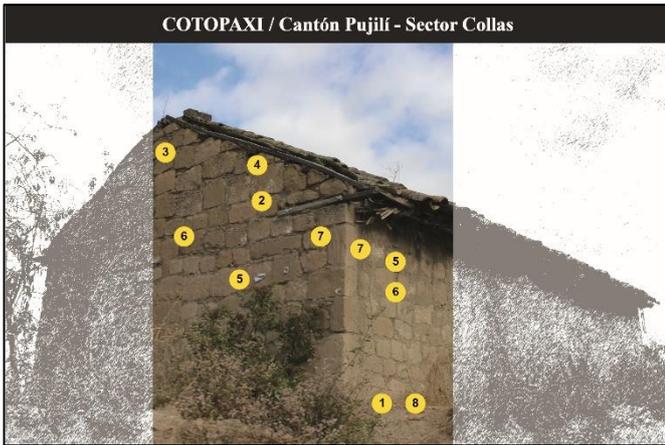


Figura 4. Descripción de lesiones y errores constructivos. (1) Falta de sobrecimiento perimetral, (2) Falta de viga collar perimetral, (3) Falta de alero en los testeros provocando su erosión, (4) Falta de mortero nivelado en la cabecera en los testeros, (5) Juntas gruesas en el aparejo, (6) Falta de revestimiento continuo, (7) Unión inadecuada entre adobes, continuidad de juntas, (8) Falta de vereda o plataforma de la construcción.

Fuente: Elaboración propia de autores / 2021

El estiércol de animales de granja utilizado para mejorar la cohesión, unión y resistencia, en la preparación de la mezcla de tierra, por la plasticidad y fácil accesibilidad de este componente que procede de la transferencia de conocimientos

ancestrales de construcción, altera el endurecimiento de las mezclas durante el secado y aumenta su permeabilidad.

2.1.4 Lesiones antrópicas o intervenciones no programadas

Las lesiones antrópicas más visibles están causadas por las roturas producidas para sostener las instalaciones de electricidad visibles o semi-empotradas, apertura de puertas o ventanas muy cerca de las esquinas, erosiones por falta de protección debido a la baja dureza superficial ante cualquier impacto.

Sin olvidarnos de las vibraciones por tráfico que sufren las construcciones al tener como vía de acceso la carretera principal del país.

Los principales agentes de deterioro: atmosféricos, tectónicos o del suelo (*por constituir una zona muy expuesta a sismos en el corredor volcánico ecuatorial*) y por errores de construcción incluyendo los relacionados con el uso original del inmueble, así como su adaptación a nuevos espacios, se presentan en la Tabla 2. Evidentemente, el listado de las lesiones antrópicas es menor en las áreas rurales que en las urbanas (Watt, 2007).

Tabla 2. Clasificación e identificación de las causas y lesiones más comunes de construcciones rurales de tierra

AGENTES DE DETERIORO	ATMOSFÉRICOS	SUELO	ERRORES DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN/MATERIALES/USO
FÍSICOS	Lluvia, nieve, escarcha, viento, variaciones de temperatura, radiación solar	Finos, granulometría, inundaciones, agua de superficie y del suelo	Altura del sobrecimiento <30cm, falta de revestimiento, inclinación inadecuada del tejado, pendientes forzadas en cubiertas, escaso vuelo del alero, canalones defectuosos, fisuras por dilatación y contracción no reparadas, desfibramiento de elementos y envejecimiento de la madera.
MECÁNICOS	Dilatación térmica, expansión hídrica, acción del viento	Sismos, erupciones volcánicas, hundimientos del suelo	Falta de cimientos, uniones críticas con los muros, falta de trabazón de adobes y adobones, relación inadecuada espesor/altura de muros, ausencia de la viga collar o zunchado de cabeceras de muros, cubiertas mal arriostradas y muy pesadas y/o mal diseñadas, uniones defectuosas de los tímpanos de muros con las cubiertas a dos aguas, espesor de juntas >2cm, situación de vanos cerca de esquinas, cargaderos o dinteles de escaso empotramiento en el muro <50cm, falta de contrafuertes en tramos largos y remates o reforzamiento en las esquinas o encuentros, erosiones por rozamiento de jambas o en las partes bajas del muro, falta de refuerzos de muros o zunchados una vez producido un seísmo.
QUÍMICOS	Oxígeno, ácidos, excrementos, nieblas salinas, humos industriales	Sustancias ácidas y básicas, ácido carbónico, ácido húmico, suelo volcánico	Mezclas defectuosas por el % de arena, finos y adiciones según la práctica constructiva, en la confección de piezas y mortero de juntas y revestimientos
BIOLÓGICOS	Bacterias, semillas; insectos xilófagos, aves	Bacterias, mohos, hongos, líquenes, raíces; roedores, termitas, gusanos	Falta de zócalos, aceras perimetrales, aleros y barreras adecuadas para evitar el crecimiento vegetal por la humedad e ingreso de insectos y animales pequeños.
ANTRÓPICOS	Exposición a contaminantes	Vibraciones por tráfico o máquinas	Roturas del muro por el paso de instalaciones, cuelgue de elementos, impactos, apertura de vanos nuevos a menos de 1m de las esquinas, rejuntados o revocos con cemento; hollín, manchas.

Fuente: Elaboración propia de autores / 2021

3. SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE RESULTADOS DE LABORATORIO

Se realizó una toma de muestras de núcleos de los tipos constructivos, tapial, adobe y bahareque, evitando cualquier daño al inmueble. Se sometieron a pruebas de laboratorio para caracterizar tanto su composición mineralógica como su resistencia mecánica (Figura 5). Se puede apreciar la radiación térmica procedente del material que mide la termografía infrarroja.

El análisis del suelo y por consiguiente del material con el que se prepararon las muestras se presentan en la Tabla 3. Presentaban un bajo contenido de humedad, 3,30%, y un rango de acidez equivalente a pH 5,5. Se observa que el contenido de materia orgánica es aproximadamente 5%, aunque se recomienda que sea menor a 2%. Su presencia retarda el proceso de endurecimiento, pero también este porcentaje de material orgánico incorpora las fibras que contenían las mezclas analizadas, paja de trigo, cebada o cadi. Al respecto, para evitar las fisuras por retracción de secado de la arcilla de

los bahareques, se recomienda añadir paja triturada. Igualmente, en la fabricación de los adobes en la proporción en volumen 5:1:1 (*tierra/arena/paja*).

La obtención de los límites de consistencia de Atterberg, líquido, plástico e índice de plasticidad (IP), caracteriza el comportamiento de los suelos finos arcillosos (tamaño de grano <0,002mm), limosos (0,002 a 0,05mm) y de los materiales granulares como las arenas (2,0 a 0,05mm), y que corresponde al geo material presente en el área andina alimentado por la diversidad de pisos climáticos.

El IP ≈19% es similar para las tres mezclas, clasificándose el material en el sistema unificado de suelos SUCS como CL: arcillas orgánicas y arcillas limosas de baja plasticidad en tapiales y adobes y CL: arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media y arcillas limosas y arcillas magras en los bahareques. Mientras que en el sistema americano AASHTO, la clasificación es A-6 suelo arcilloso, A-5 suelo limoso y A-2-7 arenas limo arcillosas, en las muestras de adobes, tapiales y bahareques respectivamente.

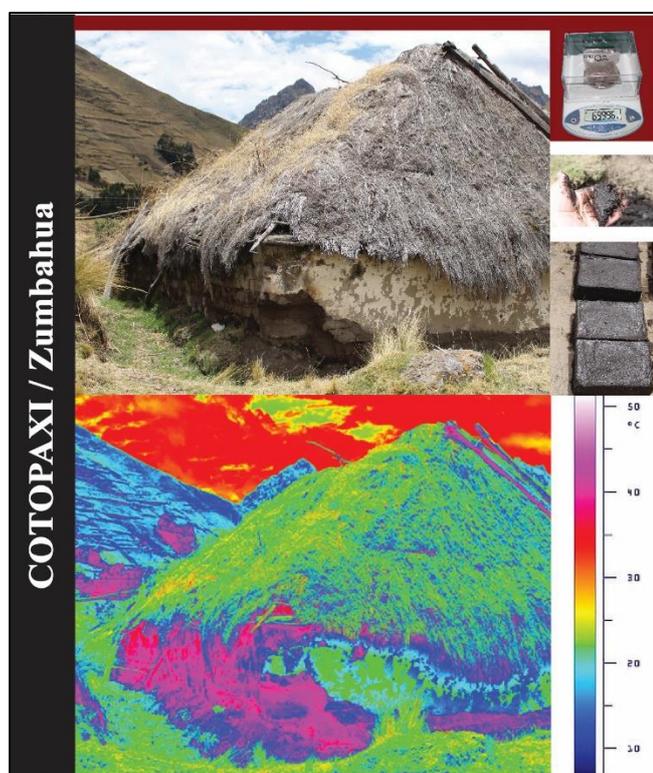


Figura 5. Análisis de muestras de edificación
Fuente: Elaboración propia de autores / 2021

El análisis granulométrico determina en primer lugar la presencia de gravas (*tamaño máximo 15-18mm*) en la composición de las mezclas, aproximadamente 11% en tapiales, adobes; y el 7% en bahareques, que se debe a que la masa contiene granos más finos para compactarla mejor en el espesor de 12cm de los entramados y tejido de cañas. En cualquier caso, la presencia de gravas incide en una mayor densidad y dureza del material terroso.

La diferencia fundamental radica en el contenido de arenas, 17% en tapiales y adobes y casi 50% en bahareques. La suma de gravas y arenas no cumple los porcentajes recomendados de material granular según el sistema constructivo, es decir, 40-60% para el adobe, 60-75% para el tapial y 40-60% para el bahareque (Ceballos, 1992). Según los resultados, los finos superan estos límites en los tres tipos constructivos.

Por otro lado, en la cordillera ecuatoriana, con alto contenido de toba volcánica, el material fino endurecido denominado *cangahua* representa el 15% del área cultivada y el suelo resultante contiene la fragmentación de estas cenizas, generalmente por el uso de maquinaria pesada, pero de aparente estructura milimétrica estable (Jiménez et al., 2018: 38-50). Aunque es altamente susceptible a la desintegración por las condiciones atmosféricas de grandes lluvias en la cordillera central volcánica, al carecer de materia orgánica y poca arcilla, la *cangahua* constituye un árido de las mezclas inevitablemente (Podwojewski y Germain, 2005: 35-51).

Tabla 3. Caracterización del suelo

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	RESULTADOS PONDERADOS DE LAS MUESTRAS			
	ADOBE	TAPIAL	BAHAREQUE	
Contenido de humedad	3,35%	3,35%	3,25%	
Contenido de material orgánico	4,75%	4,69%	5,51%	
pH	5.5	5.6	5,5	
Límite de consistencia	LL (<i>Límite líquido</i>)	45,51%	41,98%	34,18%
	LP (<i>Límite plástico</i>)	26,26%	25,33%	18,51%
	IP (<i>Índice plástico</i>)	18,95%	19,26%	18,26%
Composición granulométrica	Gravas	11,15%	10,89%	7,03%
	Arenas	15,72%	17,05%	47,51%
	Limos y arcillas	73,12%	72,05%	45,45%
Composición del suelo	SUCS (<i>Unificado de Clasificación de Suelos</i>)	CL - Arcillas Orgánicas y Arcillas Limosas de baja plasticidad	CL - Arcillas Orgánicas y Arcillas Limosas de baja plasticidad	CL - Arcillas Inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas limosas y arcillas magras
	AASHTO (<i>Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes</i>)	A-6 Suelo arcilloso	A-5 Suelo limoso	A-2-7 Arena limoarcillosa

Fuente: Elaboración propia de autores / 2021

En la construcción tradicional de mampuestos de tierra y piedra, se utilizaron morteros de recubrimiento de barro (Boada-Castro et al., 1993:83), y posteriormente se fueron incorporando, producto del mestizaje y aplicaciones derivadas de ejemplos monumentales, morteros bastardos y a base de arena e hidrato de cal, para mejorar la cara superficial de la mampostería (Lara et al., 2020).

El análisis químico de la composición de las mezclas mediante espectrofotometría por absorción atómica (AAS), que se aprecia en la Tabla 4, no demostró diferencias sustanciales en los tres tipos constructivos, todos componentes de los silicatos aluminicos hidratados y óxidos de Ca, Na, K, Mg y Fe que componen los finos; este último confiere a la masa el color rojo o amarillo, propios de la naturaleza geológica de la zona.

Tabla 4. Caracterización química de las muestras

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	RESULTADOS PONDERADOS DE LAS MUESTRAS		
	ADOBE	TAPIAL	BAHAREQUE
Al - Aluminio	15,88%	13,56%	17,52%
Ca - Calcio	2,55%	3,03%	4,26%
Fe - Hierro	4,75%	5,12%	3,95%
K - Potasio	2,83%	6,84%	4,12%
Mg - Magnesio	2,10%	3,66%	2,89%
Na - Sodio	0,57%	0,84%	1,02%
Si - Silicio	65,90%	63,15%	74,01%

Fuente: Elaboración propia de autores / 2021

En cuanto a la baja resistencia mecánica se conoce que no incide en la durabilidad de las construcciones en tierra, aunque se ha recomendado en los ensayos determinar diferentes relaciones mínimas entre la resistencia en húmedo y la resistencia en seco para que un material se considere suficientemente duradero (Beckett et al., 2020), lo cual no es posible medir en muestras de tierra no estabilizadas con cal o de suelo-cemento.

En la Tabla 5, se aprecia que la resistencia mecánica es menor en el bahareque 2,08 MPa respecto al tapial 2,27 MPa y el adobe 3,04 MPa; y 0,41 MPa de resistencia a flexión del adobe, adoptando el módulo de elasticidad de la tierra de 200MPa (MVCS, 2017), que inclusive puede ser menor a 50MPa (Li et al., 2021). De lo cual se desprende que la fabricación del adobe o adobones en moldes facilita la compactación de la mezcla y por consiguiente tienen menor porosidad y mayor resistencia mecánica.

Tabla 5. Caracterización mecánica de las muestras analizadas

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	RESULTADOS PONDERADOS DE LAS MUESTRAS		
	ADOBE	TAPIAL	BAHAREQUE
Resistencia a compresión simple	3,04 MPa	2,27 MPa	2,08 MPa
Resistencia a flexión	0,41 MPa	Fragmento	Fragmento

Fuente: Elaboración propia de autores / 2021

Desde el punto de vista de la granulometría, se ha observado que la resistencia mecánica es superior en las muestras que presentan mayores fracciones de áridos de menores dimensiones y menor resistencia en los de naturaleza arenosa, entre 0,53 MPa y 1,72 MPa (Varum et al., 2011).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se ha determinado que de los 50 inmuebles catalogados el 82% presenta un proceso patológico degenerativo, por alguna o varias lesiones, que, sumadas a la falta de uso, la pérdida del bien inmueble puede ser irreversible. En la Tabla 2, se recogen las causas del deterioro de las edificaciones de tierra, tanto atmosféricas, tectónicas y sobre todo los defectos constructivos, que afectan más a las construcciones rurales debido al emplazamiento aislado que expone todos los muros a las agresiones ambientales. Por lo que mitigar o evitar la acción de estos agentes de deterioro es uno de los objetivos para conservarlo; y al carecer de sobrecimientos, los zócalos cerámicos y el drenaje de agua son una alternativa en su intervención.

Según los resultados de la caracterización de las muestras, se aprecia la utilización de materiales pedológicos provenientes del entorno inmediato, por lo que las variaciones de las dosificaciones estarían condicionadas por los recursos disponibles (*presencia de gravas*) y por el sistema constructivo, como el bahareque con menos gravas y más arcilla en la composición del barro. Actualmente en tapiales prefabricados se usa la dosificación en volumen, 2,5 de grava, 2 de arena gruesa y 2,5 de arcilla, más 10-15% de agua de amasado y la adición de cemento no debe sobrepasar el 5% para mejorar la resistencia y durabilidad (Dabaieh, 2014).

Las muestras estudiadas provienen de sitios geográficamente diferentes, con temporalidades de uso distinto, conocimientos constructivos empíricos, que muestran propiedades similares en adobes y tapiales. Así mismo, se han utilizado varias especies madereras, cañas y fibras en la confección de los entramados y armaduras de cubiertas.

Constructivamente, se establece que los bloques de adobe se coloquen en los muros en la misma dirección x, y, z, en la que se fabricaron y compactaron, para evitar una reducción de las resistencias mecánicas (Heathcore et al., 1992). Por lo que los adobones colocados verticalmente en las esquinas (Figuras 3.d y 3.e) trasgreden esta condición. También la relación altura-espesor más pequeña muestra mejor resistencia a sismos que aquellos con una relación altura-espesor más grande (Jinwuth et al., 2010). Habría que añadir que la fabricación de adobones implica la construcción de 8 a 10 hiladas por muro y por consiguiente menos juntas.

Evitar la degradación de la construcción en tierra dependerá de la eficiencia constructiva para luchar contra la humedad: "*Buenas botas, buen impermeable y un buen paraguas*" (Faria, 1999). Mediante la construcción de plataforma, cimientado, sobre cimientado o zócalos de piedra para evitar la ascensión capilar del agua; buena cohesión y resistencia de los muros de tierra (*aglutinante, fibras*), un buen revestimiento y/o pinturas en base a cal, genera barreras para que el agua no enfrente directamente las superficies (*aleros, salientes, porches, etc.*).

Respecto a la sostenibilidad de estas construcciones, que se podría aplicar en elementos a intervenir o reconstruir, se investiga el uso de residuos en la fabricación de adobes y tapiales, según el contexto geográfico, como fibra de coco, escorias de alto horno, ceniza de cáscara de arroz, polvo de ladrillo, desperdicios de madera aserrada, fibras de maíz, té o de palmeras datileras (Salih et al., 2020). Sobre todo, para reciclar los residuos que proceden de plásticos, puesto que apenas el 2% es reprocesado y el resto termina en vertederos (Biswas y Zhang, 2021).

En cuanto a la normativa aplicable, el código ecuatoriano de la construcción no incluye normativas para estructuras de adobe y menos sobre evaluación y reforzamiento (Chacón, 2021). A diferencia de la norma chilena que insta criterios que mantienen y aumentan la capacidad estructural con el único objetivo de resistir las fuerzas de diseño estático y sísmico de estas estructuras (INN NCh 3332, 2013). Por su parte, la norma peruana E:080 Diseño y construcción con tierra reforzada (MVSC, 2017), incluye consideraciones en las intervenciones

en obras patrimoniales, así como las obras de tierra reforzada de tapial y adobe con geomalla y especificaciones de buenas prácticas. Para ello, el espesor mínimo de los muros debe ser 0.40 m y deben contar con arriostres horizontales (*entrepisos y techos*) así como arriostres verticales (*contrafuerte o muros transversales*).

El sistema constructivo en tierra posee un “*ciclo de vida cerrado*” pues genera ahorro de residuos y reutilización del material de manera óptima, permitiendo así la reducción de la huella de carbono. Ante esto, vemos que la industrialización va a originar cambios en el uso de la tierra, como el reemplazo de los adobes hechos en el sitio por los BTC, superadobes en sacos biodegradables, la fabricación digital y las innovaciones en la prefabricación de tapias y su puesta en obra, como las tongadas de colores diferentes, aislamiento térmico en el núcleo de los muros, aplicación de consolidantes, etc. (Casares, 2017), que se pueden incorporar en la reconstrucción y rehabilitación de inmuebles.

Podemos afirmar que una buena intervención comienza cuando se reúnen todos los argumentos técnicos y constructivos, desde la ubicación hasta las particularidades históricas constructivas propias de la edificación, y estableciendo un programa de mantenimiento periódico, tanto interior como en la cubierta y cerramientos (Barsallo, 2020; Lara y Galarza, 2020). Fomentar también “*campañas de mantenimiento del patrimonio rural edificado*” (Tenze et al., 2020) con el apoyo de la comunidad y sensibilizar a los futuros profesionales sobre el uso de las técnicas tradicionales (Aponte et al., 2020).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a aquellos colegas que han compartido generosamente sus conocimientos sobre procesos de construcción ancestrales en tierra cruda, así como investigadores de otras disciplinas y a la Universidad Internacional del Ecuador, DGIP y a la Facultad de Ciudad, Paisaje y Arquitectura por el apoyo a la investigación.

REFERENCIAS

- Aponte, G., Peñalosa, E., Ospina-Tascón, J.J., Velandia, C. (2020) Technique as function of memory: heritage values and revaluation of habitat and the landscape in Ambalema, Colombia, *Vitruvio International journal of Architecture Technology and Sustainability* Volume 5 Issue 1, <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2020.13714>
- Barsallo, G., & Achig, M. C. (2020). Preventive conservation plan for the chapel of Susudel, Ecuador. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 54(M-1), 811–816. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-811-2020>
- Beckett, C. T. S., Jaquin, P. A., & Morel, J.-C. (2020). Weathering the storm: A framework to assess the resistance of earthen structures to water damage. *Construction and Building Materials*, 242, 118098. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118098>
- Biswas, W. K., & Zhang, X. (2021). Techno-Assessment of the Use of Recycled Plastic Waste in RE. *Sustainability*, 13(16). <https://doi.org/10.3390/su13168678>
- Boada-Castro, R., & others. (1993). *Quito: una visión histórica de su arquitectura* (FONSAL - Fondo de Salvamento de Quito (ed.); TRAMA). Consejería de Obras Públicas y Transportes.
- Cárdenas-Gómez, J. C., Gonzales, M. B., & Damiani Lazo, C. A. (2021). Evaluation of reinforced adobe techniques for sustainable reconstruction in andean seismic zones. *Sustainability (Switzerland)*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13094955>
- Casares Ruiz, G. (2017). *Arquitectura de Tierra en el s.XXI*. E.T.S. Arquitectura (UPM).
- Ceballos, P. (1992). Las construcciones en tierra en Ecuador: innovaciones tecnológicas. *Revista INVI*, 7(16), 18–25. <https://doi.org/10.4067/invi.v7i16.156>
- Chacón Sánchez, J. P., Suquillo Ronquillo, B. J., Sosa Caiza, D. A., & Celi Sánchez, C. A. (2021). Evaluación y Reforzamiento de una Estructura Patrimonial de Adobe con Irregularidad en Planta. *Revista Politécnica*, 47(1). <https://doi.org/10.33333/rp.vol47n1.05>
- Climate. (2018). *Clima: Ecuador* (p. <https://es.climate-data.org/americadel-sur/ecuador>). 2021-05-01. <https://es.climate-data.org/americadel-sur/ecuador-63/>
- Cortés Aguirre, A., Aguirre Ullauri, M. del C., & Contreras-Escandón, C. (2019). Impacto del Decreto de Emergencia del Patrimonio Cultural del Ecuador: análisis costo-beneficio. *Revista de Urbanismo*, 41. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2019.52492>
- Dabaieh, M. (2014). Building with rammed earth. A practical experience with Martin Rauch. In *A practical experience with Martin Rauch: Vol. July*.
- Faria, P. (1999). Problemática dos revestimentos de paredes em construções de terra crua. Jornada Sobre Construções Com Terra Aditivada. A Terra Como Material de Construção de Edifícios. Lisboa, IST, FunDEC, Março 1999. <http://hdl.handle.net/10362/11474>
- Faria, P. (2007). Construções em terra crua. Tecnologias, potencialidades e patologias. *Revista Musa*, 149–155.
- Guillaud, H., Joffroy, T., & Odul, P. (1995). *Compressed earth blocks: Manual of design and construction* (Vol. 2). Vieweg. https://archive.org/details/CEB_manual_design_construction/mode/2up
- Heathcote, K. A., & Jankulovski, E. (1992). Aspect Ratio Correction Factors for Soilcrete Blocks. *Transactions-Institution of Engineers Australia Civil Engineering CE*, 34(4), 309. <https://www.tib.eu/de/suchen/id/BLSE%3AEN002940140>
- Henneberg de León, A. (2012). Aproximación a un estudio sobre las lesiones del bahareque en el estado Zulia, Venezuela. Algunas recomendaciones para su intervención. *Informes de La Construcción*, 64(525). <https://doi.org/10.3989/ic.08.049>
- INEC, I. N. D. E. E. Y. C. (2010). *Censo de población y vivienda* (Vol. 2020, Issue 04-25). <http://redatam.inec.gob.ec/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPV2010&MAIN=WebServerMain.inl>

- INN NCh 3332. (2013). *Estructuras–Intervención de construcciones patrimoniales de tierra cruda–Requisitos del Proyecto Estructural*. <http://www.ingenieros.cl/wp-content/uploads/2014/05/Presentacion-presidente-Comision-de-Construccion-Patrimonial-Sergio-Contreras.pdf>
- Jiménez, W., Loayza, V., & Metzler, E. (2018). Mapeo de cangahuas mediante teledetección en el Ecuador. *Siembra*, 5(1), 38–50. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1426>
- Jinwuth, W., Samali, B., Heathcote, K., & Wang, C. (2010). *A Study into the Earthquake Resistance of Circular Adobe Buildings using Static Tilt Tests*.
- Lara, M. L. (2018). Patología de la construcción en tierra cruda en el área andina ecuatoriana. *AUC Revista de Arquitectura - Universidad Católica Santiago de Guayaquil*, 38, 31–41. <http://editorial.ucsg.edu.ec/ojs-auc/index.php/auc-ucsg/article/view/69>
- Lara, M.L.; Galarza-Gallardo, G. (2020) Pathology in crude earth, research on constructions in the Ecuadorian andean area. In *Proceedings of the Rehabend*; pp. 736–743.
- Lara, M. L., Sanz-Arauz, D., López-Andrés, S., & Pino, I. del. (2021). Characterization and Analysis of the Mortars in the Church of the Company of Jesus—Quito (Ecuador). *Minerals*, 11(7), 781. <https://doi.org/10.3390/min11070781>
- Lara, M. L., Sanz, D., & Del Pino, I. (2020). Morteros históricos en las construcciones de Quito de los siglos XVI, XVII y XVIII. *Ge-Conservacion*, 17, 71–81. <https://doi.org/https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.687>
- Levicoy, C. C., & Lira, C. P. (2020). Arquitectura en adobe y quincha: construcción de una identidad en torno a los recursos naturales de la ribera del Lago General Carrera en la región de Aysén, Chile. *Ge-Conservacion*, 18, 56–68. <https://doi.org/10.37558/gec.v18i1.769>
- Li, Z., Noori, M., & Altabey, W. A. (2021). Experimental and numerical assessment on seismic performance of Earth adobe walls. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 15(2). <https://doi.org/10.32604/sdhm.2021.011193>
- Martel, C., Andújar, J., Mothes, P., Scaillet, B., Pichavant, M., & Molina, I. (2018). Storage conditions of the mafic and silicic magmas at Cotopaxi, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 354, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.02.006>
- MCP, M. C. de P. (2009). *Decreto de Emergencia del Patrimonio Cultural 2008-2009* (O. Woolfson Touma (ed.); Primera Ed). Sobocgrafic. <https://site.inpc.gob.ec/pdfs/Publicaciones/decretodemergencia.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y saneamiento (2017), NORMA E.080 Diseño y Construcción con Tierra Reforzada, Perú. https://procurement-notices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=109376
- Minke, G. (2005). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. Forschungslabor für Experimentelles Bauen Universidad de Kassel. https://itacenet.org/esp/construccion/Construccion_tierra.pdf
- Monjo, J. (1998). Las construcciones de tierra: evolución, tipología y técnicas de Intervención. *Tratado de Rehabilitación*, 87–112.
- Orta, B., Adell, M., Bustamante, R., García, A., & Vega, S. (2009). Ensayo en Lima (Perú) de edificio de adobe sismorresistente construido con el sistema de albañilería integral. *Informes de La Construcción*, 61(515), 59–65. <https://doi.org/10.3989/ic.09.006>
- Pinas, J. M., Lira, L., Horn, M., Solis, J. L., & Gómez, M. M. (2020). Influence of Stipa ichu on the thermal and mechanical properties of adobe as a biocomposite material. *Journal of Physics: Conference Series*, 1433(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1433/1/012003>
- PNUD, P. de las N. U. para el D. de las N. U. P. los A. H. – C.-H. (1987a). *Cómo hacer nuestra casa en adobe* (p. 41). Printer Graphic. Serie Proyecto ECU-87-004 Emergencia Sismos marzo 1987.
- PNUD, P. de las N. U. para el D. de las N. U. P. los A. H. – C.-H. (1987b). *Cómo hacer nuestra casa en tapial* (p. 38). Printer Graphic. Serie Proyecto ECU-87-004 Emergencia Sismos marzo 1987.
- Podwojewski, P., & Germain, N. (2005). Short-term effects of management on the soil structure in a deep tilled hardened volcanic-ash soil (cangahua) in Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 56(1), 39–52. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00638.x>
- Rapoport, A. (1969). House form and Cultua. *London-University College: New Delhi: Prentice-Hall of India Private Ltd*, 73.
- Salih, M. M., Osofero, A. I., & Imbabi, M. S. (2020). Critical review of recent development in fiber reinforced adobe bricks for sustainable construction. In *Frontiers of Structural and Civil Engineering* (Vol. 14, Issue 4, pp. 839–854). <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0630-7>
- Shupe, T., Lebow, S., & Ring, D. (2008). Causes and control of wood decay, degradation and stain (Pub. 2703). *Baton Rouge, LA: Louisiana Cooperative Extension Service*.
- Soebarto, V. (2009). Analysis of indoor performance of houses using rammed earth walls. *Eleventh International IBPSA Conference*, 27–30.
- Solis, M., Torrealva, D., Santillán, P., & Montoya, G. (2015). Bending behavior analysis of geogrid reinforced adobe walls. *Informes de La Construcción*, 67(539). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.141>
- Tenze, A., Cardoso, F., & Achig, M. C. (2020). Experiences of social participation in the recovery of vernacular heritage in southern Ecuador. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 54(M–1). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-603-2020>
- Velarde Gil, J., Sánchez M.T., Roux, R., Espuna, J.A. (2021) Experimental Study of Adobe Masonry and its Adherence with Reinforced Concrete Confinement Elements, *Civil Engineering and Architecture* 9(2): 404-409, 2021 <http://www.hrpub.org>, DOI: 10.13189/cea.2021.090213
- Varum, H., Figueiredo, A., Silveira, D., Martins, T., & Costa, A. (2011). Outputs from the research developed at the University of Aveiro regarding the mechanical

characterization of existing adobe constructions in Portugal and proposals for rehabilitation and strengthening. *Informes De La Construccion*, 63(523), 127–142. <https://doi.org/10.3989/ic.10.016>

Watt, D. S. (2009). *Building pathology: Principles and practice*. John Wiley & Sons.

Yépez Noboa, A. M. (2020). Empty spaces that are full of cultural history: an innovative proposal for the management of a protected area of Chimborazo volcano (Ecuador). *Journal on Protected Mountain Areas Research and Management*, 12, 43–49. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1553/eco.mont-12-1s43>

Zawistowski, K., Zawistowski, M., & Joffroy, T. (2020). Evolving Vernacular: Reinventing Rammed Earth in the Context of Twenty-First Century Seismic Regulation. *Technology Architecture and Design*, 4(2). <https://doi.org/10.1080/24751448.2020.1804758>

BIOGRAFÍAS



M. Lenin Lara C. es actualmente docente investigador de la Facultad para la Ciudad el Paisaje y la Arquitectura de la Universidad Internacional del Ecuador. Es doctorando del DCTA Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas por la Universidad Politécnica de Madrid. Posee un Máster en Restauración Arquitectónica

(2002) y un Máster en Administración y Dirección de Proyectos Inmobiliarios (2004). Además, de formación sobre gerencia, gestión y difusión del patrimonio arquitectónico. Su experiencia en investigación comprende la patología, el control de calidad y caracterización del proceso constructivo, así como los materiales de construcción. Todo esto se complementa con el ejercicio profesional en sus 20 años de experiencia en diseño, planificación, fiscalización y construcción de proyectos. Destaca la participación en proyectos I+D+i y ponencias nacionales e internacionales de las investigaciones desarrolladas.



Rosa Bustamante Montoro, Dr. Arquitecto por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Máster en Restauración Arquitectónica por la UPM, Arquitecto por la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú. Arquitecto conservador de monumentos históricos en el Ministerio de Cultura, Región Arequipa, 1987-1992. Profesora de la Universidad Católica

Santa María de Arequipa 1985-1990. Profesora Titular del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la UPM. Responsable del Laboratorio de Materiales Luis de Villanueva 2015-2020. Directora del Máster en Patología y Rehabilitación de la Edificación desde 2018. Miembro del grupo de investigación Análisis e Intervención en el Patrimonio Arquitectónico (AIPA). Secretaria del CTN 41/SC 8 “Conservación, Restauración y Rehabilitación de Edificios” de UNE, desde 2001. Miembro del WG1 Terminología del Comité Europeo de Normalización 346 Conservation of Cultural Heritage, 2004-2016. Directora de la revista electrónica de la red ReCoPaR, desde 2006. Miembro de la Asociación de Mujeres Investigadoras y Tecnólogas de España, desde 2004.

Análisis de un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de una Industria de Embutidos

Cabrera, Marcelo¹ ; Montenegro, Lucía² ; Jiménez Andrea² 

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

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

Resumen: Con esta investigación, se pretende desarrollar un proceso de tratamiento de aguas residuales de una industria de embutidos, el cual se basa en un interceptor de grasas y aceites, un sistema de flotación por aire y un biofiltro o lombrifiltro, a fin de que estas descargas cumplan con la normativa para descargas líquidas al alcantarillado de la ciudad de Quito, la Resolución N002-SA-2014. En la caracterización de las aguas residuales crudas de la industria de embutidos se identificó que se incumplen los límites de DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, aceites y grasas, con valores de 2314 mg/L; 3046 mg/L; 3131 mg/L y 2159 mg/L, respectivamente. Para el diseño del sistema de tratamiento se tomaron en cuenta las mejores condiciones operativas que son: un tiempo de residencia de 5,2 min en la trampa de grasas, para una eficiencia de remoción del 97 %, 14 horas de retención en el lombrifiltro para una eficiencia del 87 % y 20 minutos en el sistema de flotación por aireación con un porcentaje de eficiencia del 89 %. Las dimensiones de la trampa de grasa fueron 0,3 metros de longitud y 1,4 metros de altura con una bomba rotodinámica de 0,06 kW de potencia; 2,7 metros de altura total entre los tres lombrifiltros; un lecho de 1,5 metros de alto; 5,5 metros de ancho y 6,5 metros de longitud; un tanque de almacenamiento de 2,1 metros de altura y 2,1 metros de radio circular con una bomba de 0,18 kW. Se contempla también una celda de forma cuadrada para el sistema de flotación por aire, con medidas de 0,7 metros de largo; 1,4 metros de alto y un agitador mecánico de cuchillas inclinadas con una potencia de 0,19 kW.

Palabras clave: Lombrifiltro, DBO₅, DQO, aceites y grasas, sólidos suspendidos.

Analysis of a Wastewater Treatment System from a Sausage Factory

Abstract: This research aims to develop a wastewater treatment process for a sausage industry, which is based on a grease and oil interceptor, an air flotation system and a biofilter or worm filter, so that these discharges comply with the regulations for liquid discharges to the sewage system of the city of Quito, Resolution N002-SA-2014. In the characterization of raw wastewater from the sausage industry, it was identified that the limits for BOD₅, COD, suspended solids, oils, and fats are not met, with values of 2314 mg/L; 3046 mg/L; 3131 mg/L and 2159 mg/L, respectively. For the design of the treatment system, the best operating conditions were considered, which are: a residence time of 5,2 min in the grease trap, for a removal efficiency of 97 %, 14 hours of retention in the worm filter for an efficiency of 86 % and 20 minutes in the aeration flotation system with an efficiency of 89 %. The dimensions of the grease trap were 0,3 meters long and 1.4 meters high with a 0.06 kW centrifugal pump; 2,7 meters of total height among the three worm filters; a bed 1,5 meters high; 5,5 meters wide and 6,5 meters long; a storage tank 2,1 meters high and 2,1 meters circular radius with a 0.18 kW pump. There is also a square-shaped cell for the air flotation system, measuring 0,7 meters long; 1,4 meters high and a mechanical agitator with inclined blades with a power of 0,19 kW.

Key words: Worm filter, BOD₅, COD, oils and fats, suspended solids

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación actual por temas ambientales como una problemática de carácter global, incluye una serie de acciones en función de la minimización de generación de residuos, su reutilización o aprovechamiento y la protección del medio

ambiente (González, 2018, p.1). El impacto ambiental más importante de las industrias cárnicas es la descarga de efluentes, pues este vertido contiene una alta concentración de sólidos, mezcla de sangre y grasas que lo convierten en un contaminante peligroso. Los parámetros que se emplean para caracterizar los efluentes son: la demanda biológica y química

*marcelo.cabrera@epn.edu.ec

Recibido: 02/07/2021

Aceptado: 22/02/2022

Publicado en línea: 23/03/2022

10.33333/rp.vol49n2.05

CC 4.0

de oxígeno o DBO₅ y DQO, aceites, grasas y sólidos suspendidos. El valor de estas variables indicará la necesidad de tratamiento o la factibilidad de disposición directa en el alcantarillado (Kusanovic, 2009, p. 1; Ramos, 2018, p.3).

En el Distrito Metropolitano de Quito, todos los vertidos líquidos procedentes de industrias, comercios o servicios que son descargados en el alcantarillado público, deben cumplir con la Resolución N002-SA-2014.

Al evaluar los parámetros de calidad de los efluentes resultantes de la elaboración de embutidos, se determina que contienen en promedio una concentración de 2159 mg/L de aceites y grasas; 3055 mg/L de DQO; 2314,2 mg/L de DBO₅ y, 3130,5 mg/L de sólidos suspendidos. Estos valores sobrepasan lo establecido en la Resolución N002-SA-2014. La alta concentración de DBO₅ indica la necesidad de un tratamiento biológico, dado que la materia biológica se descompone a mayor velocidad cuando la relación entre DBO₅ y DQO es igual o mayor a 0,5 (Fresenius et al., 2013, p. 126).

El lombrifiltro es un sistema de tratamiento biológico y dinámico que contiene un filtro aeróbico que emplea a la especie *Eisenia foetida* (lombriz roja), para consumir la materia orgánica (MO) presente en los efluentes y transformarla en humus. El empleo de esta metodología no genera riesgos residuales significativos, pues no genera olores ni lodos, y puede alcanzar una eficiencia del 95 % de remoción de DBO₅. Este sistema es una alternativa financieramente económica y de bajo impacto ambiental, en comparación con otras metodologías como lagunas de estabilización o lodos activos (Hernández, 2005, p. 45; Cano y Palacios, 2013, p. 21).

Para mejorar el rendimiento del lombrifiltro, es menester remover la materia grasa del efluente, pues los lípidos dificultan la propagación del oxígeno en el agua o la degradación del material orgánico, minimizando su efectividad. Consecuentemente, posterior a este sistema biológico, es necesario disponer de un sistema de flotación por aireación que remueva los sólidos procedentes de la acción del sistema biológico (Romero, 2001, p. 426).

El análisis de esta planta de tratamiento permitirá mejorar la calidad del efluente, para que cumpla con la normativa ecuatoriana aplicable, minimizar el impacto ambiental y evitar pérdidas económicas por sanciones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

La descarga líquida contaminada proviene de una industria de embutidos localizada en la parroquia de Carcelén, Quito-Ecuador.

Para realizar los ensayos de sedimentación a nivel de laboratorio, se emplearon embudos de separación de un volumen de 1000 mL y, un cronómetro para cuantificar el tiempo de separación entre el agua residual y los lípidos.

En la Figura 1, se muestra el lombrifiltro empleado para el desarrollo de la planta de tratamiento de aguas residuales. Su estructura está compuesta por un recipiente de plástico, que cuenta con una capa de piedras de diámetros entre 2,5 y 10 centímetros, una capa de grava, una de aserrín y viruta, y finalmente una capa de lombrices rojas, adquiridas en Lombriart.



Figura 1. Prototipo de lombrifiltro

A través de una celda de flotación estilo Denver, facilitada por el DEMEX (Departamento de Metalurgia Extractiva), se adecuó un sistema de flotación por aireación.

2.2 Métodos

Los ensayos experimentales se ejecutaron por triplicado y el análisis de datos se realizó estadísticamente.

2.2.1 Caracterización de los efluentes de una industria de embutidos

La caracterización del agua residual se realizó en base a la metodología estandarizada para el análisis de agua y de aguas residuales para DQO, DBO₅, sólidos suspendidos, aceites y grasas. Los análisis de DBO₅ y DQO se realizaron en un laboratorio calificado, mientras que el análisis de los otros parámetros se realizó en un laboratorio de la academia.

2.2.2 Determinación de la efectividad de la trampa de grasa a nivel de laboratorio

a. Separación por gravedad

Las muestras tomadas del agua residual se colocaron en embudos de separación y se aforaron hasta los 1000 mL. Se tomó el tiempo de separación de las grasas y aceites de la fase acuosa.

b. Determinación de grasas y aceites

Los efluentes muestreados de la industria en mención se colocaron en un balde de 8 litros de capacidad con una bomba acoplada electro sumergible con una manguera para el traslado del agua entre el balde y la trampa de grasa. Tras accionar el sistema y considerando el área superficial y el tiempo de separación, se muestreó el agua residual para un caudal de 14,8 mL/s. El análisis de grasas y aceites se realizó a través del procedimiento APHA 5520 B (APHA, 2012).

2.2.3 Valoración de un lombrifiltro a escala de laboratorio

a. Estimación del área específica de aserrín

Se muestrearon caudales aleatorios de 1000, 710 y 1000 mL/d con alturas de 8 cm, 5 cm y 4 cm respectivamente, considerando exista una adecuada distribución del agua. Bajo observación, se estableció el tiempo de filtrado de cada prueba. Con estos parámetros se determinó el área específica de aserrín (Metcalf y Eddy, 2003).

b. Cuantificación de la eficiencia del lombrifiltro

El porcentaje de eficiencia del lombrifiltro fue determinado con la media del DBO₅ resultante de la caracterización del agua residual libre de materia grasa (Metcalf y Eddy, 2003).

Se efectuaron 3 ensayos con los caudales de 3,5 L/d y 1,5 L/d; los cuales se determinaron en base a las cargas hidráulicas 44,7 m/d y 19,2 m/d, respectivamente, a distintos tiempos de retención: 24, 21, 17, 14, 8 y 4 horas, siendo el primer valor, el tiempo máximo de degradación de materia orgánica presente en los efluentes (Metcalf y Eddy, 2003). Posterior a cada tiempo de retención, se efectuaron pruebas de sólidos suspendidos, DQO y DBO₅.

La eficiencia del lombrifiltro fue determinada una vez alcanzada una concentración de DBO₅ igual al límite permitido en la Resolución N°2-SA-2014 de la Secretaría del Ambiente.

2.2.4 Valoración del sistema de flotación por aireación

La evaluación del sistema se realizó a través de una celda Denver. Para el análisis se utilizó el agua residual del lombrifiltro, considerando la presencia de partículas de aserrín.

Se realizaron 3 pruebas por cada velocidad: 1400 rpm y 1200 rpm, en un tiempo de flotación de 20 minutos. Cada 5 minutos se muestreó y analizaron los parámetros de DQO, DBO₅ y sólidos suspendidos (Metcalf y Eddy, 2003, p. 130).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Descripción del agua residual de la industria de embutidos

Se determinó un valor de $2159 \pm 242,8$ mg/L para el parámetro de grasas y aceites. El valor resultante en esta investigación supera en un 2984,3 %, al límite permitido en la Resolución N°2-SA-2014 cuyo valor es 70,0 mg/L.

Para los indicadores de demanda biológica y química de oxígeno (DBO₅ y DQO), se obtuvieron una cantidad de $2314,2 \pm 122,7$ mg/L y $3054,5 \pm 161,9$ mg/L, respectivamente. Los valores obtenidos sobrepasan los límites determinados en la normativa nacional, que establecen 170,0 mg/L para DBO₅ y 350,0 mg/L DQO. Los elevados valores de estos parámetros se atribuyen al uso de carne en el proceso de fabricación de

embutidos, la cual es rica en materia orgánica (Behling et al., 2008).

Finalmente, tras el análisis del parámetro de sólidos suspendidos se obtuvo una media de $3130,5 \pm 14,5$ mg/L, excediendo en un 3030,5 % el valor establecido en la Resolución N°2-SA-2014 cuyo límite es equivalente a 100 mg/L.

3.2 Análisis del uso de la trampa de grasa

3.2.1 Cuantificación del tiempo de segregación de grasas y aceites del agua residual

Se realizaron 3 ensayos para evaluar el tiempo de separación gravitacional, obteniéndose los siguientes resultados: 5,4 min; 5,2 min; 5 min. El tiempo medio de separación de las grasas y aceites es de $5,2 \pm 0,2$ min, es decir, el rango de separación es de 5 a 5,4 minutos. Este valor concuerda con lo señalado en la Norma CPE INEN 5, en la cual se menciona que un rango adecuado de separación entre las fases toma entre 3 y 5 minutos. La velocidad de separación se atribuye a la existencia de grasas con una gravedad específica menor, que les permite ascender a la superficie del agua de manera más rápida que aquellas que no (Mendoza et al., 2004, p.68).

3.2.2 Valoración de los aceites y grasas en la trampa de grasa

Se realizaron tres ensayos con el fin de cuantificar las grasas y aceites a un tiempo de separación gravitatoria igual a 5,2 minutos. La concentración de grasas y aceites en el efluente fue inicialmente de 2159 mg/L. Tras la primera prueba se redujo a 65 mg/L, lo cual corresponde a un porcentaje de remoción del 97 %. En la segunda y tercera prueba se alcanzaron valores de 60 y 59 mg/L de contenido de grasas y aceites, equivalentes al 97 % y 97 % de remoción.

La desviación estándar de los datos presentados es igual a 3,2, un valor que indica una baja dispersión con respecto a la media, por lo cual se puede considerar confiable el valor obtenido. El valor promedio obtenido de 61,3 mg/L cumple con lo estipulado en la normativa aplicable.

3.2.3 Diseño de la trampa de grasa

El diseño y escalado de la trampa de grasa contempló la metodología de diseño descrita por Calderón (2014) y los lineamientos establecidos en la Norma CPE INEN 5 (Calderón, 2014, p.31; INEN, 2014, p.229).

Las dimensiones establecidas para el diseño de la trampa de grasa fueron: 1,4 m (alto); 0,30 m (largo) y 0,30 m (ancho).

3.3 Análisis del biofiltro

3.3.1 Determinación de la superficie de aserrín

La determinación del área de aserrín, tomó en cuenta parámetros como el caudal, la altura y el tiempo de retención. El detalle de los resultados se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Área específica del aserrín

Altura (cm)	Caudal (L/día)	Tiempo de retención (h)	Área específica de aserrín (m ² /g)
4	1	4	3,4
5	0,71	6	3,7
8	1	8	3,6
Media			3,56 ± 0,15

Utilizando el valor medio obtenido del área superficial del aserrín, 3,56 m²/g, se determinó el tiempo de permanencia en el cual la concentración de DBO₅ alcanza lo establecido en la Resolución N°2-SA-2014.

El resultado obtenido permite establecer que el polvo tratado tiene las siguientes características: estructura fina, irregular, resistente al flujo y tendencia a la acumulación del contaminante en la superficie por su porosidad, un aspecto favorable para facilitar la alimentación de las lombrices rojas con la materia orgánica que se retiene (Portero, 2014, pp. 39-40).

3.3.2 Evaluación de la eficiencia del lombrifiltro

En la Figura 2, se presenta el esquema con las medias de DBO₅ obtenidas de cada muestra tomada de los ensayos de caudal vs tiempo de retención. Se puede observar cómo la tendencia tiende a la baja conforme incrementa el tiempo de retención.

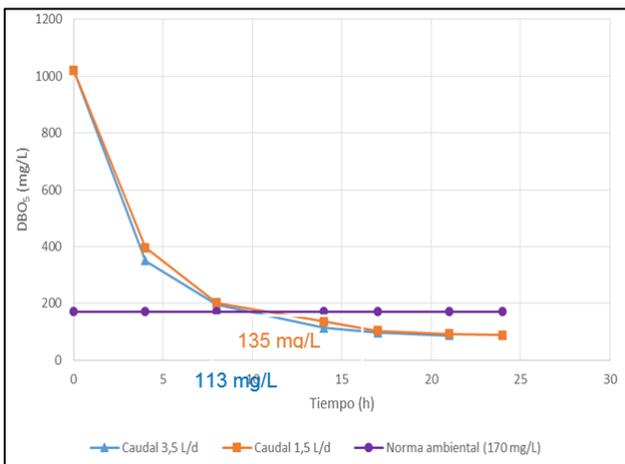


Figura 2. Resultados de DBO₅ de las muestras de caudales de 3,5 y 1,5 L/día

De lo observado, se puede definir que el estudio del tratamiento previo al diseño y desarrollo del lombrifiltro, permitió determinar el tiempo óptimo de retención en el cual la especie *Eisenia foetida* remueve una mayor proporción de materia orgánica. El tiempo determinado de retención es 14 horas. Bajo estas condiciones, los valores de los parámetros de calidad del agua cumplen los requisitos establecidos en la Resolución N°2-SA-2014 del Municipio de Quito. Así mismo, se evaluó la eficiencia de remoción de MO para los caudales de 1,5 L/día y 3,5 L/día, cuyos porcentajes son igual a 89 % y 87 % respectivamente.

3.3.3 Diseño del lombrifiltro

Considerando un caudal de 25 m³/día, se vio imposibilitada la edificación de la planta de tratamiento en el espacio dispuesto por la fábrica de embutidos, por lo cual se dispuso a dividir el

caudal en tres unidades (8,3 m³/día), de modo que se tengan 3 lombrifiltros de menores dimensiones y acoplados de forma paralela.

Las dimensiones del lombrifiltro fueron: 272 cm de altura total, 150 cm de altura del lecho, 50 cm de profundidad y 550 cm de ancho.

3.4 Dimensionamiento del tanque de almacenamiento

Las dimensiones del tanque consideraron parámetros como el volumen ocupado por el agua residual procedente de los biofiltros, y la necesidad de evacuar el agua al sistema de flotación por aireación.

El tanque fue diseñado en acero inoxidable AISI 304, con una base circular, capacidad de almacenamiento igual a 25 m³, diámetro de 2,1 m y una altura de 1,0 m, bajo una presión de 0,71 atm, y una temperatura de 20°C (temperatura media de la ciudad de Quito) (Megyesy, 2001, p.182).

3.5 Valoración del sistema de flotación por aireación

3.5.1 Flotación por aireación a distintas velocidades de agitación

La Tabla 2 contiene la información de la variación de la concentración, expresado en g/L, de los sólidos suspendidos a diferentes tiempos de flotación y una velocidad de agitación de 1400 revoluciones por minuto.

Tabla 2. Cuantificación de los sólidos suspendidos de aguas residuales a 1400 rpm

Tiempo de flotación (min)	Concentración de sólidos suspendidos (g/L)			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Media
0	0,852	0,852	0,852	0,852
5	0,677	0,664	0,684	0,675 ± 0,010
10	0,333	0,318	0,313	0,321 ± 0,010
15	0,160	0,155	0,133	0,149 ± 0,014
20	0,092	0,095	0,090	0,092 ± 0,003

Como se puede evidenciar, a un tiempo de flotación de 20 minutos y un velocidad de 1400 revoluciones por minuto (rpm), la cuantificación de sólidos suspendidos disminuye a un valor de 92 ± 3 g/L (89,2% de remoción), un valor que se encuentra dentro de los límites permitidos por la Resolución N°2-SA-2014.

Los resultados del análisis de sólidos suspendidos a 1200 revoluciones por minuto, se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Cuantificación de los sólidos suspendidos de aguas residuales a una velocidad de agitación de 1200 rpm

Tiempo de flotación (min)	Sólidos suspendidos (g/L)			
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Media
0	0,852	0,852	0,852	0,852
5	0,701	0,689	0,698	0,696 ± 0,006
10	0,413	0,407	0,383	0,401 ± 0,016
15	0,137	0,177	0,153	0,156 ± 0,019
20	0,098	0,096	0,091	0,095 ± 0,004

Se puede observar que así mismo, bajo una velocidad de 1200 rpm del agitador, a los 20 minutos de permanencia los sólidos

suspendidos alcanzan valores de $0,095 \pm 0,004$ g/L (88,8% remoción), valor acorde a la norma asociada.

De los resultados se concluye, que el sistema de flotación por aireación en una celda Denver, reduce la cantidad de sólidos suspendidos en el efluente cuando el tiempo de estancia es igual a 20 minutos.

3.5.2 Diseño de la celda de flotación

Los resultados de la determinación de las dimensiones de la celda de flotación a escala industrial se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Dimensiones de la celda de flotación a escala industrial

Parámetro	Valor	Unidad
Volumen	0,7	m ³
Alto	140	Cm
Longitud	70	Cm
Ancho	70	Cm
Tiempo de flotación	40	Min
Potencia del agitador	0,19	kW

Considerando la existencia de sólidos suspendidos en el efluente, se seleccionó una turbina abierta axial de seis cuchillas (Ludwig, 2001, p. 290).

3.6 Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales

3.6.1 Diagramas del proceso para el diseño de la planta

Los diagramas en el diseño de planta permiten visualizar o determinar información importante de los procesos químicos. El esquema del funcionamiento interno del sistema se presenta en la Figura 3 a través del diagrama de bloques (BFD).

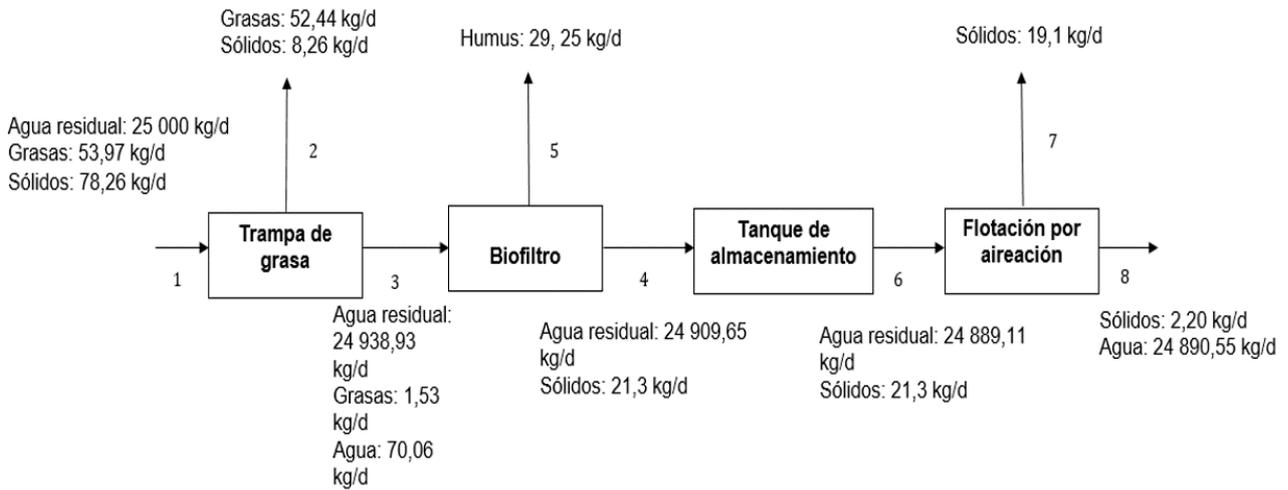


Figura 3. Diagrama de bloques (BFD) de la planta de tratamiento

Las operaciones unitarias del diagrama de flujo del proceso (PFD) se connotan con números y letras para su identificación. El diagrama indica secuencialmente las actividades realizadas y los procesos involucrados en el sistema de tratamiento de

aguas residuales. Los procesos en el diagrama de flujo del proceso se nombran en función de la nomenclatura de los equipos, tal como se presenta en la Figura 4.

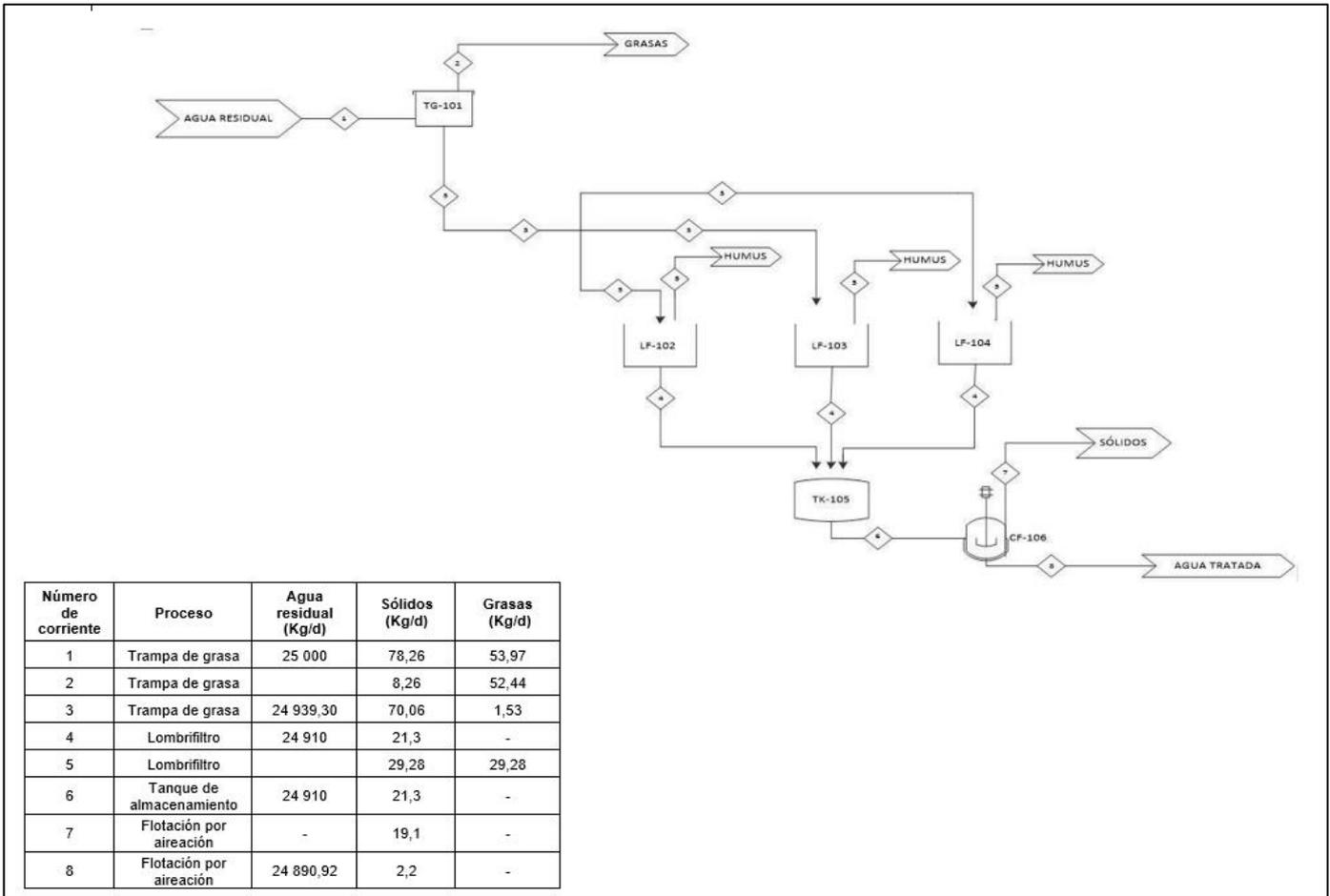


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso (PFD) del sistema de tratamiento (Jiménez, 2016)

En la Figura 5 se presenta el diagrama de tuberías e instrumentación (PID) de la planta de tratamiento de aguas residuales de la industria de embutidos. En el diseño se

implementó un control automático con el fin de controlar el comportamiento y mejorar el desempeño del sistema.

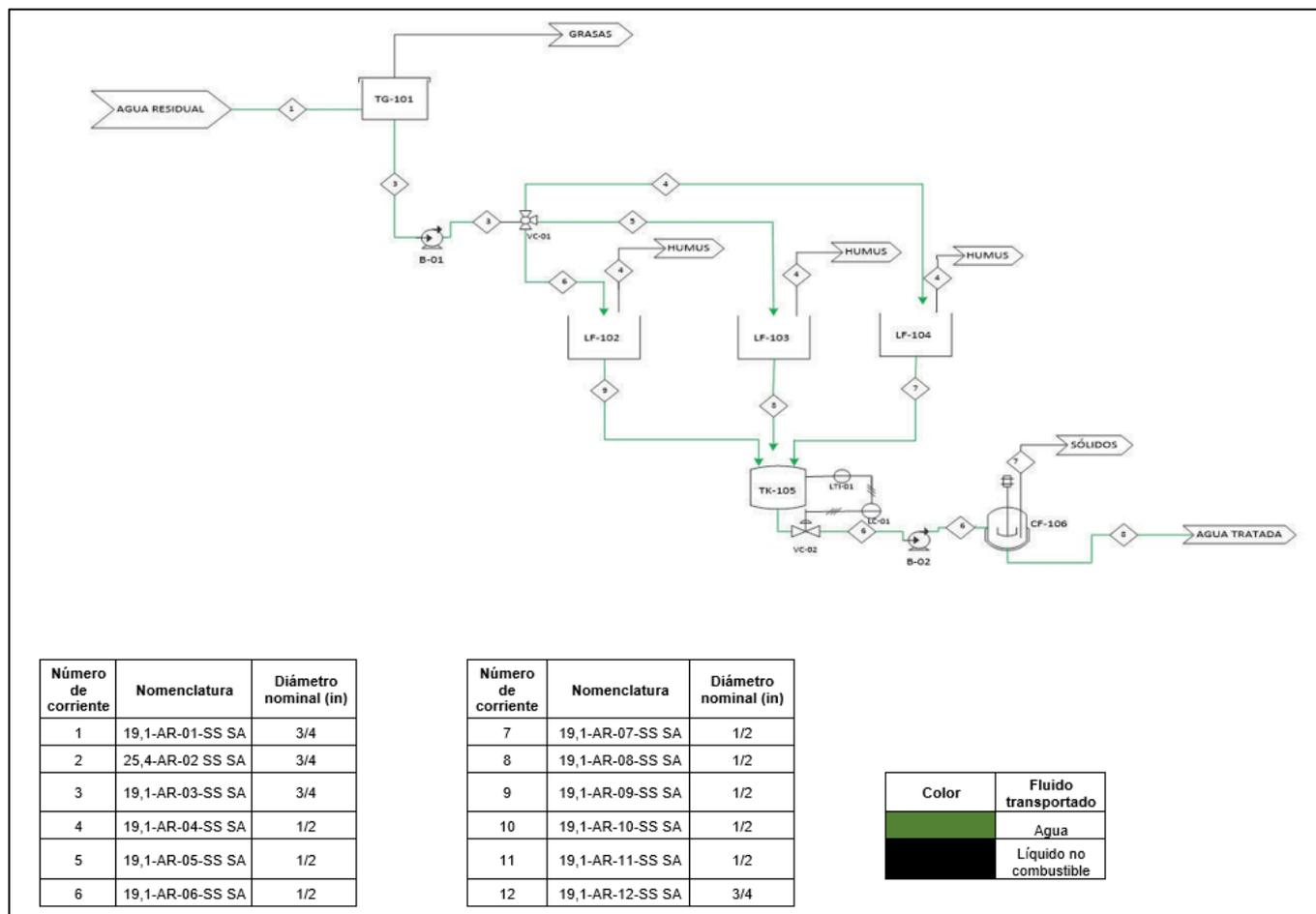


Figura 5. Diagrama de tubería e instrumentación (PID) del sistema de tratamiento de aguas residuales (Jiménez, 2016)

4. CONCLUSIONES

El agua residual procedente de las operaciones de la industria de embutidos presenta: 2159 mg/L de grasas y aceites, 2314 mg/L de DBO₅, 3056 mg/L de DQO y 3136 mg/L de sólidos suspendidos, sobrepasando lo estipulado en la ley en un 2984,3 %; 1261,3 %; 772,7 %; y 3030,5 %, respectivamente. Estos valores, exceden los límites establecidos en la Resolución N°2-SA-2014 de la ciudad de Quito.

A través de la separación por gravedad se determinó que el tiempo que tarda en separarse el agua residual de las grasas y aceites es de 5,2 min. En ese lapso, se eliminó el 97,3 % de las grasas y aceites presentes, logrando alcanzar los valores legales permitidos y aplicables para este parámetro. Las dimensiones de la trampa de grasa industrial son: 0,3 metros de ancho; 0,3 metros de largo y 1.4 de altura.

Utilizando como base los parámetros de diseño de laboratorio, se construyeron 3 lombrifiltros de 6,5 metros de longitud, 5,5 metros de ancho, 1,5 metros de altura sustrato-soporte y una altura total de 2,7 metros cada uno, con un 86,9 % de eficiencia de remoción de DBO₅.

Para alcanzar los límites máximos permitidos por la Resolución N°2-SA-2014 en cuanto al parámetro de sólidos

suspendidos, resulta efectiva la aplicación del sistema de flotación por aireación en la celda Denver que permite una remoción del 89,2 % de sólidos suspendidos y un tiempo de flotación de 20 minutos. A nivel industrial, las dimensiones de las celdas de flotación son: 0,7 metros de largo, 1,4 metros de altura, y 0,7 metros de ancho, con un tiempo de flotación de 40 minutos. El agitador más apropiado para este sistema es uno con una turbina de seis cuchillas curvadas y una potencia de 0,19 kW.

REFERENCIAS

American Public Health Association (APHA). (2012). *Standard Methods for the Examination of Water*. (20va. ed.). New York, EE UU: Centennial Edition

Behling, E., Colina, G., Díaz, A., Marín, J., Rincón, N., y Fernández, N. (2008). Tratamiento Biológico de Aguas Residuales Industriales: Efluente Camaronero en Reactores RBC. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 42(2), 243-255

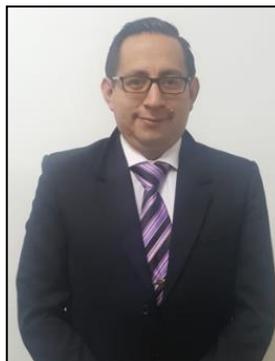
Calderón Y. (2014). Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para la Parroquia Dayuma del Cantón Francisco de Orellana. (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniería en Biotecnología Ambiental). Escuela Superior de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Cano, L., y Palacios, R. (2013). Desarrollo de biofiltro con soporte de plástico para el tratamiento de aguas residuales domésticas de la ESPAMMFL. (Proyecto de titulación previo a la obtención del

título de Ingeniero Ambiental). Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Calceta, Ecuador

- Fresenius, W., Schneider, W., Böhnke, B., y Pöppinghaus, K. (2013). *Waste water technology: origin, collection, treatment and analysis of waste water*. Nueva York, EEUU: Springer-Verlag.
- Hernández, Y. (2005). Anteproyecto de construcción para aplicación de lombricultura al tratamiento de planta Llau-Llao de Salmonera Invertec S.A. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Construcción). Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2014). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:98. Agua, Calidad del agua. Muestreo. Manejo y Conservación de Muestras. Recuperado de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2169.pdf> (agosto, 2019).
- Jiménez, A. (2016). Estudio de un sistema de tratamiento de aguas residuales de una fábrica de embutidos (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química). EPN. Quito, Ecuador
- Kusanovic, M. (2009). Planta de tratamiento de Riles. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero de Ejecución Agropecuaria). Universidad de Magallanes. Punta Arenas, Chile.
- Ludwig E. (2001) *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants: Emphasizes how to apply techniques or process design and interpret results into mechanical equipment details*. (4ta.ed.). United States of America: Butterworth-Heinemann
- Megyesy, E. (2001). *Manual de recipientes a presión*. (7ma.ed.). Guanajuato, México: LIMUSA.
- Mendoza, E., Pacheco, O., y Quiroz, M. (2004). *Tecnología de productos cárnicos*. (2da. ed.). Distrito Federal, México: LIMUSA.
- Metcalf, L., y Eddy, H. (2003). *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*. (4ta ed.). New York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito MDMQ. (2014). Normas Técnicas para el control de descargas líquidas. Resolución N°2-SA-2014. Recuperado de: http://www.quitoambiente.gob.ec/images/M_images/documentos/resol_002_2014.PDF (abril, 2019).
- Portero, A. (2014). Análisis Térmico del proceso de peletizado del aserrín de madera de Eucalipto. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de ingeniero mecánico). Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.
- Ramos, A. (2018). Origen y composición de las aguas residuales en mataderos. Recuperado de: <http://aguasindustriales.es/origen-y-composicion-de-las-aguas-residuales-en-mataderos/> (julio, 2019).
- Romero, J. (2001). *Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño*. (1era. Ed). Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Zamora, M. (2011). Caracterización de los parámetros de calidad del agua desalojada por la empresa de productos lácteos Marco's con el fin de disminuir su contaminación en el Cantón Píllaro, Provincia de Tungurahua. (Proyecto de titulación previo a la obtención del Grado Académico de Magister en Producción más limpia). Universidad Técnica de Ambato, Tungurahua, Ecuador

BIOGRAFÍAS



Marcelo F. Cabrera J., Nacido el 05 de marzo de 1986 en Quito-Ecuador, estudios completos de pregrado en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero Químico Aprobado Cum Laude. Título de posgrado en la Universidad Internacional SEK como Magíster en Gestión Ambiental. Ha trabajado en Incinerox, Chemeng, Unidad Educativa Jean Jacques Rousseau, Escuela Politécnica Nacional y Universidad Internacional del Ecuador donde hasta la actualidad labora como docente en la Escuela de Gestión Ambiental en la UIDE y Coordinador del Laboratorio de Análisis Instrumental de la EPN. Ha realizado varias publicaciones en revistas LatinIndex y realizado varias conferencias sobre contaminación ambiental y cursos de perfeccionamiento docente.



Lucía Margarita Montenegro Aguas, Ingeniera Química, Magister en Ingeniería Ambiental ha sido docente por 24 años en la EPN de las cátedras de Transferencia de Calor, Control de la Contaminación del Aire, entre otras. Es miembro de Green Woman Internacional y cuenta con la Certificación de Evaluador de la Norma ISO 17025 para laboratorios. En referencia a las publicaciones las ha realizado en la "Revista Politécnica" y en la "1st International Conference on Water and Sustainability" con temas relacionados al Tratamiento de aguas y Remediación de Suelos. Ha dictado más de 20 seminarios y conferencias de Monitoreo Ambiental; y dirigido más de 40 proyectos de titulación en temas de Transferencia de Calor, Refinación del Petróleo y Contaminación Ambiental.



Andrea Jiménez, profesional en Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional con una Maestría en Administración de Empresa con Mención en Gerencia de la Calidad y Productividad de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, básicamente mi desarrollo profesional lo he desarrollado en el área de control de calidad y producción en empresas de consumo masivo, actualmente me desenvuelvo en la industria farmacéutica en donde he tenido la oportunidad de aportar con mi criterio en varios procesos dentro del amplio espectro industrial en el cual tiene participación la Ingeniería Química.

Evaluación de la Calidad del Agua de Riego Proveniente de la Acequia Tilipulo Enríquez-Cotopaxi Mediante la Relación de Absorción de Sodio (RAS)

Rodríguez, Suly^{1,*} ; Jaramillo, Soraya¹ ; Zurita, Dominic¹ ; Valdiviezo, Amanda¹ ; Choloquina, Carlos¹ 

¹Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, Quito, Ecuador

Resumen: El presente estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del agua de la acequia Tilipulo Enríquez mediante la Relación de Absorción de Sodio (RAS) como indicador y así determinar si es apta o no para el riego de cultivos tomando como referencia las Normas Riverside. Para lo cual, se tomaron muestras en tres puntos del cantón Latacunga y uno de Saquisilí: Tanicuchí, Guaytacama, Saquisilí y Poaló. Se obtuvo como resultado que en el punto de muestreo 1 perteneciente a Tanicuchí, el agua es de buena calidad y apta para el riego, debido a que presenta fallas geológicas con pendientes entre 5 y 25%, además de que en esta zona del río Yanayacu aporta agua a la acequia aumentando su cauce y disminuyendo la conductividad del recurso hídrico, favoreciendo la calidad del agua. Además, al comparar estos resultados con Guaytacama (punto 2) y Saquisilí (punto 3) las aguas son utilizables para el riego con precauciones, ya que, estos territorios presentan pendientes entre 5 y 12%, un clima con temperaturas entre 12 a 15°C y precipitaciones entre 400 a 500 mm factores que contribuyen al aumento de conductividad y la salinidad de sus aguas. Por último, en el punto 4 de muestreo ubicado en Poaló el agua es de buena calidad y apta para el riego, pues esta zona es húmeda lluviosa y presenta mayor caudal lo cual incide principalmente en la disminución de la conductividad y concentración de sodio. Finalmente, este estudio en la acequia Tilipulo Enríquez puede aportar para futuras investigaciones, soluciones para la prevención y cuidado del agua de esta acequia.

Palabras clave: agua, acequia, índice RAS, muestreo, riego.

Evaluation of the Quality of Irrigation Water from the Tilipulo Enríquez-Cotopaxi Acequia Through the Sodium Absorption Ratio (SAR)

Abstract: The objective of this study is to evaluate the quality of the water in the Tilipulo Enríquez canal using the Sodium Absorption Ratio (SAR) as an indicator and thus determine whether or not it is suitable for irrigation of crops, taking as a reference the Riverside Standards. For which, samples were taken in three points of the Latacunga canton and one of Saquisilí: Tanicuchí, Guaytacama, Saquisilí and Poaló. It was obtained as a result that at the sample point 1 belonging to Tanicuchí, the water is of good quality and suitable for irrigation, due to the fact that it has geological faults with high slopes of up to 25%, in addition to the fact that in this area the Yanayacu River provides water to the ditch by increasing its channel and decreasing the conductivity of the water resource. Compared with Guaytacama (point 2) and Saquisilí (point 3), the waters are usable for irrigation with precautions, since these territories have slopes between 5 and 12%, a climate with temperatures between 12 and 15 °C and rainfall between 400 at 500 mm factors that contribute to the increase in conductivity and salinity of its waters. Finally, at sampling point 4 located in Poaló, the water is of good quality and suitable for irrigation, since this area is humid and rainy, with a higher flow, which mainly affects the decrease in conductivity and sodium concentration. Finally, this study in the Tilipulo Enríquez ditch may contribute to future research on solutions for the prevention and care of the water in this ditch.

Keywords: water, ditch, SAR index, sampling, irrigation.

1. INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca en su Plan Nacional de Riego y Drenaje del periodo 2012-2027 menciona que el Ecuador posee un abundante sistema hídrico

y es suficiente para abastecer las necesidades del agua para riego en la agricultura. En una superficie total de 3.1 millones de hectáreas, donde solo 942.000 representa la tercera parte y están siendo utilizadas para este fin.

*suly@hotmail.es

Recibido: 16/07/2021

Aceptado: 22/02/2022

Publicado en línea: 23/03/2022

10.33333/rp.vol49n2.06

CC 4.0

En general, los problemas que afectan a los recursos hídricos del Ecuador se derivan de actividades antropogénicas como la extracción de minerales, el crecimiento poblacional, la escasez de servicios básicos y alcantarillado, el uso excesivo de agroquímicos, la deforestación, la expansión de la agricultura y ganadería (Jiménez, 2015). Esto da como resultado altas concentraciones de metales pesados, nitratos, nitritos, fosfatos, tensoactivos, material orgánico, hidrocarburos y agentes patógenos que afectan a la salud y al equilibrio ambiental (Gil, 2013). La contaminación por origen natural del agua en el país según Romero (2010) proviene del arrastre de los sedimentos, de la interacción de calor y los restos de materia orgánica y en un determinado tiempo estos son depurados naturalmente por las características físicas y químicas, propias de cada cuerpo de agua.

En el Foro de los Recursos Hídricos (2013), la inversión del gobierno a nivel nacional en cuanto a la infraestructura y la red de riego ha sido del 12%. Mientras que por propia inversión comunitaria ha sido del 82% ya que la mayor parte es administrada, operada y mantenida por las mismas comunidades aledañas al recurso hídrico. Según los datos de la Secretaría Nacional del Agua (2015), existen 9.952 sistemas hídricos de los cuales 6.603 son destinadas para consumo directo, 124 para agua potable y 3.225 para riego. Weemaels (2009) indica que de las 3 140.000 hectáreas de cultivo en el Ecuador, el 30% cuenta con infraestructura para riego, mientras que el 70% utiliza riego por gravedad.

Por otro lado, la Organización de Alimentación y Agricultura de las Naciones Unidas (FAO) en su informe del 2012 manifiesta que la agricultura debe ser sostenible para garantizar el abastecimiento de alimentos sin tener efectos ambientales, sanitarios y socioeconómicos. Además, según Vera (2012) advierte que la calidad de agua que se utiliza en la producción de los alimentos debe cumplir con los estándares normativos propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), ya que el agua debe estar libre de componentes tóxicos que puedan bioacumularse en el organismo de los seres vivos. La FAO (2012) propone medidas para la agricultura sostenible como las instalaciones de sistemas de monitoreo para la calidad de agua, planes de prevención de impactos negativos por las actividades agrícolas, optimización de los residuos generados, reducción de los agroquímicos, prevención de riesgos por escorrentías y sedimentos, tratamiento de aguas residuales, manejo de plagas, generación de compostaje y educación ambiental en las comunidades sobre los efectos que provocan los productos químicos como los plaguicidas, fungicidas y herbicidas.

Sin embargo, las deficientes políticas ecuatorianas tomadas en los gobiernos anteriores han generado conflictos en la sociedad perjudicando a la calidad y cantidad de agua que se utilizaba para distintas actividades humanas. Estas políticas beneficiaban principalmente a las industrias privadas, nacionales y extranjeras de tipo extractivas, donde el mal manejo de este recurso afectó negativamente a aquellas comunidades que previamente lo utilizaban y también a los ecosistemas acuáticos (Zapata, 2008). En Ecuador, no existe autoridad competente que tome la postura de mediador para resolver los conflictos entre las comunidades sobre el aprovechamiento del agua. Estos conflictos se acentúan en las

épocas de sequía de los meses de junio y julio ya que hay escasez de agua (Proaño, 2002).

Grandes sistemas de riego en el país fueron creados por los indígenas de la época colonial las cuales favorecían a los hacendados. Hoy en día, comunidades enteras ya tienen mayor acceso al agua, pero ciertas haciendas privadas aún se rehúsan en facilitar estas necesidades. Además, aún continúan empleando técnicas de riego poco eficientes, que han provocado el deterioro en los suelos productivos (Jiménez, 2015).

Tanicuchí es una parroquia del cantón de Latacunga. Tiene una altitud promedio de 2.981 m.s.n.m., una extensión de 54 km² y una temperatura promedio de 18 °C (GADP Tanicuchí, 2019). Limitada con ciertas parroquias: al norte con Pastocalle, al sur con Guaytacama, al este con Mulaló y al oeste con Toacaso.

Dentro del mismo cantón está ubicada en la parroquia Guaytacama. Tiene una superficie de 32 km² a una altitud de 2.859 m.s.n.m. por lo cual la temperatura promedio es de 14°C, catalogado como clima templado andino. Limitando con otras parroquias rurales como Toacaso y Tanicuchí en el norte, al sur con San Felipe y Poaló, en el este con Mulaló y Aláquez, por último, al oeste con Saquisilí (GADP Guaytacama, 2014).

La última parroquia perteneciente al cantón de Latacunga en este estudio es Poaló. Tiene una extensión de 75.36 km², ubicada a una altitud promedio de 3.560 m.s.n.m. con una temperatura promedio de 10 °C, igualmente con un clima templado andino. Limita al norte con la parroquia de Saquisilí, al sur con la parroquia Once de Noviembre, al este con el cantón de Latacunga y al oeste nuevamente con Saquisilí (GADP San José de Poaló, 2015).

Por último, la parroquia de Saquisilí ubicada en el cantón del mismo nombre, tiene una extensión de 205.4928 km², una altitud entre 2.240 a 4.280 m.s.n.m., limita con tres cantones: al norte, sur y este con Latacunga, al oeste con Pujilí y Sigchos, se registran temperaturas entre 6 °C y 14 °C en todo su territorio (GADMC Saquisilí, 2015).

Según los datos recopilados por el (INEC, 2010) en las parroquias pertenecientes al cantón Latacunga, en el año 2010 la población correspondiente de Tanicuchí fue de 12.831 habitantes, 9.668 en Guaytacama y 5.709 en Poaló. Se estima que en la siguiente década 2020 la cantidad de habitantes será de: 14.336 en Tanicuchí, 10.802 en Guaytacama y 6.379 para Poaló.

Pese al crecimiento poblacional que se registra, los niveles de pobreza para Guaytacama son altos, denotando el poco desarrollo de la parroquia. Mientras que en Poaló el índice de necesidades básicas insatisfechas y de pobreza es aún mayor, con el 98.1%. Por otra parte, en Tanicuchí se encuentra la zona industrial de Lasso considerada como una fuente importante de empleo para la parroquia.

Para el cantón Saquisilí según las proyecciones del INEC en el 2020 la población será de 31.478 habitantes. Comparado con el decrecimiento de los caudales de agua a causa del crecimiento poblacional, que indica una tendencia negativa en el abastecimiento del líquido vital para esta población (GADMC Saquisilí, 2015).

Con respecto a las actividades antropogénicas realizadas en Tanicuchí, la economía de la parroquia es movida en un gran porcentaje por las industrias ubicadas en su territorio, formando el parque industrial entre los cuales se encuentran empresas como: Aceropaxi, Indulac, La Avelina, Lácteos Tanicuchí, Sancela, Aglomerados Cotopaxi, Textiles Río Blanco y algunas florícolas. Estas son las principales fuentes de empleo para la población, además se mantienen las actividades agrícolas y ganaderas en varias haciendas de la zona (GADP Tanicuchí, 2019).

En la parroquia de Guaytacama en su sector primario económico se encuentran las actividades de la agricultura que se basan en la siembra de maíz, cereales, hortalizas y en especial de brócoli. Además, dentro de esta actividad se toma en cuenta las zonas ganaderas y actividades pecuarias. Como sector terciario de la economía, se encuentra el comercio debido a la cercanía con la parroquia de Saquisilí que tiene una gran influencia en intercambios comerciales. Así como también se han registrado que lo pobladores tienen pequeños negocios o emprendimientos. El trabajo principal que se da en la zona es netamente de labores agrícolas, seguido de las empresas florícolas y en una minoría las actividades de artesanías (GADP Guaytacama, 2014).

Dentro de la parroquia de Poaló un aproximado de 84,59% de los pobladores se dedican a las actividades de agricultura, ganadería y silvicultura. El 5,65% a la manufactura, el 6,68% al sector público y el 3,08% al comercio. Debido a la ubicación geográfica y a su elevada altitud las actividades pecuarias se dan en un bajo porcentaje, ya que representa un alto costo el empleo de técnicas de producción pecuaria (GADP San José de Poaló, 2015).

En el Cantón Saquisilí existe una población económicamente activa (PEA), de la cual actualmente cerca del 52,08% de la población total se dedica a la actividad primaria como: agricultura, ganadería, silvicultura y pesca. Otro porcentaje de la población realiza actividades secundarias, es decir, industria y manufactura correspondiente al 4,34%, dentro de las actividades terciarias están las relacionadas con actividades de servicio y comercio representando el 40,60% de la economía (GADMC Saquisilí, 2015).

Las zonas de estudio descritas anteriormente, poseen una red hídrica conformada por distintos ríos como Chinchil, Pumacunchi y Cutuchi. También existen quebradas, acequias y zanjas que muchas aún no están identificadas con sus nombres. La acequia de Tilipulo Enríquez es parte de este sistema hídrico y es utilizada para el riego en la agricultura de los sectores ya mencionados. Es importante la calidad de agua de riego ya que interfiere en la capacidad de producción de los suelos. Navarro (2012) afirma que con una mala calidad de agua para riego, afecta negativamente las características del suelo como: alteración de sus propiedades fisicoquímicas,

elevadas concentraciones de sales, cambios en el pH, disminución de la capacidad de intercambio iónico y acumulación de trazas de compuestos tóxicos, entre otros.

En este estudio, se va a analizar la Relación de Absorción de Sodio (RAS) como un indicador de calidad del agua (Ecuación 1) y así determinar si es apta o no para el riego en los cultivos. Cuando el agua tiene altas concentraciones de sodio mayores al calcio y magnesio, provoca la dispersión de coloides y genera debilidad en la estructura microscópica del suelo ya que descompone las partículas arcillosas y también impide el paso del agua y aire. Según Catelon (2015), cuando el sodio es abundante el suelo pierde la capacidad de conducir agua y oxígeno, generando un ambiente anaerobio, acumulando sales que no son nutrientes para las plantas afectando a su capacidad reproductiva (Quintero, 2015). Es importante, realizar este análisis mencionado cada tres o cuatro años para verificar la variabilidad de la calidad del agua de riego. Los resultados de este parámetro van a depender de la frecuencia de los riegos, la cantidad del agua que se utilice y de los sistemas de riego presurizados (Herrera, 2016).

Según García (2012), los estudios realizados por el Laboratorio de Salinidad del USDA se ha demostrado que el índice RAS es efectivo para determinar un balance del agua con el suelo. El índice RAS se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

Dónde: Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se expresan en unidades de: $\frac{meq}{L}$.

2. ARÉA DE ESTUDIO

Complementando lo anterior, según Sánchez (2003), existen muchas acequias en el país que fueron construidas por las comunidades aledañas como lo es la acequia de este estudio llamada Tilipulo Enríquez. A lo largo de la trayectoria de la acequia atraviesa las parroquias de Tanicuchí, Guaytacama, Saquisilí y Poaló, pertenecientes a la provincia de Cotopaxi, en mayor extensión esta acequia está situada en el cantón de Latacunga en Tanicuchi, Guaytacama y Poaló y en menor proporción atravesando el cantón de Saquisilí.

3. METODOLOGÍA

Para realizar la determinación del índice RAS, se analizó la acequia de Tilipulo Enríquez en el mes de diciembre del 2020, se pueden observar los puntos de muestreo (Figura 1), que pertenecen a las parroquias de Tanicuchí como punto 1, la parroquia de Guaytacama y Saquisilí como puntos 2 y 3. Finalmente, la parroquia de Poaló como punto 4.

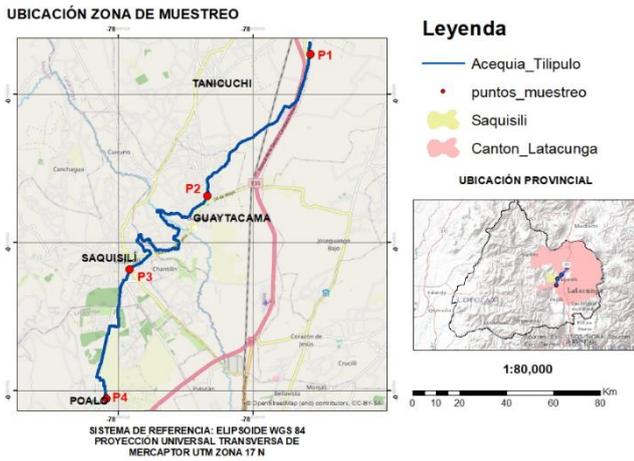


Figura 1. Mapa puntos de muestreo en la zona de estudio

A continuación, en la Tabla 1, se detallan las coordenadas UTM correspondientes a los puntos de muestreo del estudio.

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de muestreo (WGS84 UTM 17N)

Punto	Sector	Coordenadas	
1	Tanicuchi	766273.490 E	9914596.089 N
2	Guaytacama	762599.974 E	9909525.821 N
3	Saquisilí	759809.607 E	9906902.892 N
4	Poaló	759809.607 E	9906902.892 N

Posteriormente se describe cada punto de muestreo establecido, para saber el nivel de contaminación que presentan por actividades antropogénicas, que se detalla a continuación.

En el punto 1 de muestreo perteneciente a la parroquia de Tanicuchí, se visualizó ganado vacuno en las proximidades de la acequia. Además, debido a la falta de conciencia ambiental de los moradores se presenció restos de residuos sólidos en la acequia como fundas plásticas, contenedores de comida, generando un foco de contaminación. El proveedor de estos residuos es una gasolinera que se encuentra en sus proximidades.

En el punto de muestreo 2, perteneciente a la parroquia de Guaytacama se encontraron cultivos de maíz, también se pudo visualizar una tubería que pasa por encima de la acequia, la cual tiene como finalidad recoger agua para regar los cultivos. Este cuerpo de agua se encuentra cercana a las autopistas de tránsito, siendo propensa a la acumulación de residuos sólidos urbanos. Pero no en gran cantidad, ya que periódicamente dentro de la parroquia se realizan mingas para limpiar las calles y los cuerpos de agua de esta zona.

En la parroquia de Saquisilí, perteneciente al punto de muestreo 3, resalta su entrada, en la cual el canal de la acequia se encuentra abierto y soportado por hormigón armado. Se pudo observar en su mayoría fundas plásticas, y pedazos de madera cerca de la acequia.

Como último punto está la parroquia de Poaló, se encuentra cerca de la Unidad Educativa Poaló García Moreno. Se

presenció una gran cantidad de residuos sólidos urbanos como tanques plásticos, fundas y envolturas, como también acumulación de materia orgánica. Esto es debido a que se encuentra en una zona muy transitada por los habitantes, dejando sus desperdicios cerca de la canaleta.

Obtenidas las muestras de agua se procedió a implementar los siguientes métodos:

Determinación de sodio en agua mediante espectroscopia de emisión atómica

La espectroscopia por emisión atómica (OES) es utilizada para la determinación y cuantificación de elementos químicos debido a que no requiere lámparas especiales para cada elemento a analizar. Esta metodología se basa en el hecho de que una vez que se excita un átomo de un elemento específico este emite luz con un patrón característico de longitudes de onda (un espectro de emisión) a medida que vuelve al estado base (Agilent Technologies, 2016).

Según West, et al. (2015), la espectroscopia de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP) es la fuente más popular y usada en espectrometría de emisión. Dicha espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) puede ser aplicada en el monitoreo de aguas, determinación de trazas de elementos en agua, y análisis cuantitativo de elementos en muestras de agua.

En esta metodología se utiliza un plasma acoplado inductivamente con argón para desolvatar, atomizar y excitar los átomos de la muestra líquida. La intensidad de la luz emitida se mide mediante una detección óptica en las longitudes de onda características de los elementos de interés. Estas medidas pueden compararse con un patrón para cuantificar la concentración de los elementos en la muestra (Agilent Technologies, 2016).

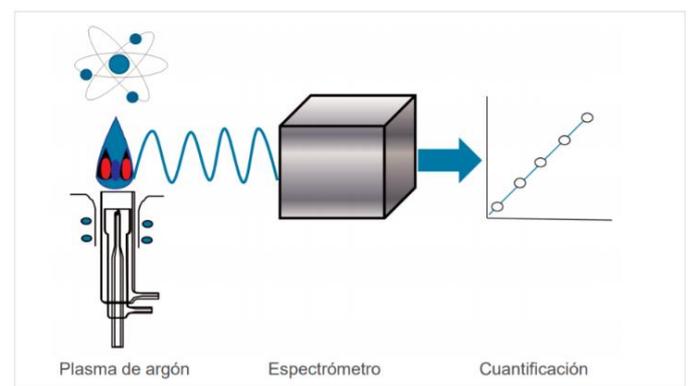


Figura 2. Diagrama esquemático simplificado del sistema de espectrofotómetro de ICP-OES (Agilent Technologies, 2016)

Para la Espectroscopia de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), se utilizan plasmas de gases inertes ionizados (Ar normalmente), altamente energéticos, que permiten alcanzar temperaturas de 6.500 °C a 10.000 °C. El Ar fluye a través de una antorcha formada por tres tubos concéntricos generalmente de cuarzo. Un serpentín de Cu rodea la parte superior de la antorcha y está conectado a un generador de radio-frecuencia. Cuando el Ar fluye

tangencialmente a través de los tubos, una chispa produce electrones que inician la ionización del gas: $\text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + e^-$ (Hernández, 2010).

Posteriormente, el generador de radio-frecuencia origina un campo electromagnético que acelera estos electrones, haciéndolos altamente energéticos. Ellos inducirán la ionización del Ar por colisiones con sus átomos, formándose el plasma, donde la resistencia al movimiento de las partículas cargadas dará lugar a las temperaturas características. Es entonces cuando la muestra se introduce en un aerosol, donde es desolvatada, vaporizada y atomizada, para después excitarse átomos neutros e iones, que al regresar a su estado basal emitirán radiación (Hernández, 2010).

Se observa más a detalle los componentes de un espectrofotómetro para emisión atómica que consta de un atomizador o ionizador (A), un monocromador de gran resolución (M), el detector multiseñal (D), y un dispositivo de lectura (L).

Determinación de Calcio y Magnesio mediante espectrofotometría de Absorción Atómica

En el estudio, se procedió a trabajar con el método de espectrofotometría de absorción atómica y la cuantificación mediante una curva de calibración lineal. Se utilizó el modo de absorción, con una lámpara de cátodo hueco específica para magnesio y calcio, con las siguientes longitudes de onda: 285,2 nm y 422,7nm respectivamente, usando la mezcla de aire y acetileno para la llama en las porciones y flujo recomendados por el manual del espectrofotómetro usado para el análisis el cual fue de marca Thermo, serie Solaar (Pérez, 2014).

Dentro de la metodología, las muestras de agua recolectadas fueron almacenadas en un refrigerador a una temperatura de 4°C para ser preservadas. De igual forma para evitar posibles contaminantes los materiales a usarse fueron lavados con una solución de ácido nítrico al 10% V/V. Posteriormente, se procedió a preparar todas las muestras, para lo cual previamente se preparó dos Erlenmeyer de 125 mL marcados con blanco, dos con estándar de Ca y Mg y los necesarios para las muestras recogidas; agitándolo vigorosamente para homogeneizar la muestra. Con una probeta de 50 mL se toma una alícuota de 50 mL de agua desionizada para el blanco; 50mL del estándar de control de 1mg/L de (Ca y Mg) y 50 mL de las muestras recogidas. Entre cada toma de alícuota se enjuagó la probeta dos veces con agua desionizada y por último con agua acidulada. Adicionar a cada Erlenmeyer anteriormente preparado, 5ml de HNO_3 más 1 mL de peróxido de hidrógeno al 30% y agitar suavemente, preparadas las muestras se inicia el proceso de digestión el cual consta de un calentamiento suave a 100°C en una placa calentadora eléctrica, por aproximadamente 2 horas y media hasta que quede un residuo cercado a los 5 mL del volumen inicial. Transcurrido el tiempo, se saca el residuo y se deja enfriar para luego enjuagar las paredes de los Erlenmeyer con agua acidulada.

Finalmente, se prepara los embudos de polipropileno con papel filtro en los soportes correspondientes de manera que el vástago quede dentro de los balones aforados clase A de 50 mL de boca ancha; transferir el producto de la digestión de los Erlenmeyer a los balones correspondientes, enrasándolos con agua acidulada (Gaitan, 2004). Realizada la digestión se procede a ingresar la muestra al equipo de absorción atómica para su posterior medición. Antes de ser ingresadas se debe calibrar el espectrofotómetro de tal forma que de una curva lineal.

Norma de calidad de agua para riego Riverside

Según Acosta-García & Salvadori (2017), Richars L.A. propuso en 1954 al Laboratorio de Salinidad de Riverside un resumen de los criterios de clasificación de salinidad, conductividad e índice S.A.R. en un llamativo sistema (Figura 3).

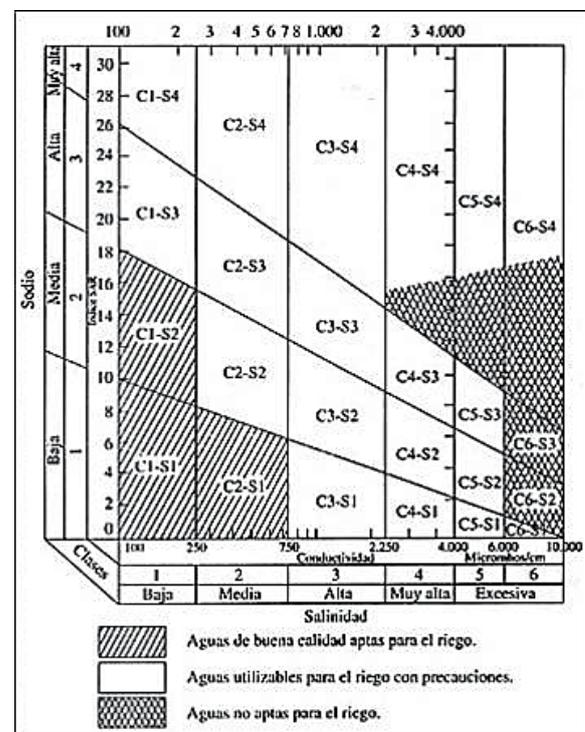


Figura 3. Sistema propuesto por el Laboratorio de Salinidad de Riverside (Acosta-García & Salvadori, 2017)

Basa su estudio en dos criterios fundamentales, la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y el índice S.A.R, el índice C es conductividad y la S el índice S.A.R, estas se convierten en categorías o clases de aguas (Acosta-García & Salvadori, 2017). Cada índice tiene un subíndice numérico cuyo valor aumenta variando de 1 a 4 en S.A.R y de 1 a 6 en la conductividad, de acuerdo con la correlación se puede determinar si un agua es apta o no para el riego (Quishpe, 2016). Según Mera (2017), como norma general a medida que los subíndices reciben números más altos la calidad del agua es muy baja. Las categorías que presentan son:

Tabla 2. Clasificación del peligro de salinización y restricción de uso para aguas según Laboratorios de salinidad Riverside

Clase	Peligro de salinización	C.E (mS cm ⁻¹ a 25 °C)	Restricción de uso
C1	bajo	< 0,25	Apta
C2	Moderado	0,25-0,75	Apta
C3	Medio	0,75-2,25	Apta con precauciones
C4	Alto	2,25-4	Apta con precauciones
C5	Muy alto	4-6	No apta
C6	excesivo	>6	No apta

Fuente: (Acosta-García & Salvadori, 2017)

Tabla 3. Clasificación de peligrosidad sódica según Laboratorios de salinidad Riverside, en función del índice SAR

Clases	Peligro de sodificación	RAS	Restricciones de uso
S1	Baja peligrosidad sódica	0-10	Apta
S2	Mediana peligrosidad sódica	10-18	Apta con precauciones
S3	Alta peligrosidad sódica	18-26	Apta con precauciones
S4	Muy alta peligrosidad sódica	>26	No apta

Fuente: (Acosta-García & Salvadori, 2017)

Para obtener el índice de conductividad eléctrica (C) y salinidad (S) (Figura 3), se debe trazar una línea partiendo desde la línea de conductividad y una línea horizontal desde la línea SAR, donde la intersección indica la categoría de C y S (Acosta-García & Salvadori, 2017).

Un ejemplo para interpretar de mejor manera es el agua de una muestra con un índice de salinidad de 1 y una conductividad de 1148 ($\mu\text{S cm}^{-1}$), dando como intersección la categoría de C3-S1 que se analiza como un cuerpo de agua baja en sodio, por lo tanto, es óptima para utilizarla en riegos de cultivos tolerables como la remolacha azucarera, espárrago, espinaca, dátil, algodón, cebada y césped. Cabe decir que los cultivos tolerantes al sodio mencionados anteriormente dependerán también de la planta, el clima, las condiciones del suelo y de las técnicas agronómicas utilizadas (Acosta-García & Salvadori, 2017).

Además, para el análisis de los datos obtenidos en esta investigación se ha empleado una estadística descriptiva y desviación estándar.

4. RESULTADOS

En este artículo se ha analizado la calidad de muestras de agua de riego provenientes de la acequia Tilipulo Enríquez en la provincia de Cotopaxi, Ecuador. La Tabla 4 muestra las determinaciones físico-químicas obtenidas. El pH de las muestras estudiadas fluctuó entre 7,66 y 8,05 (media 7,86 \pm DE 0,16), indicando su naturaleza alcalina. Con los valores de conductividad eléctrica (CE), se obtuvo una media de 0,805 $\mu\text{S/cm}$ (\pm DE 0,253) con un rango mínimo y máximo de 0,550 y 1,120 $\mu\text{S/cm}$, respectivamente. Las concentraciones de iones que contribuyeron a la salinidad del agua en orden decreciente fueron sodio, calcio, magnesio y potasio. Como se ha descrito, el sodio fue el catión predominante con valores promedio de 67,86 mg/L (\pm DE 31,92). Con respecto a la dureza del agua, se puede apreciar que la media es 239,05 con un rango entre 175,2 y 307,9.

Tabla 4. Características físicoquímicas de calidad de agua medidas en la acequia Tilipulo

#	Mg (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Na (mg/L)	pH	Dureza	CE (mS cm ⁻¹)
1	26,8	9,76	29,42	55,87	8,05	183,7	0,66
2	38,26	17,46	52,85	114,49	7,9	289,4	1,12
3	47,67	13,51	44,74	58,87	7,82	307,9	0,89
4	27,78	4,72	24,38	42,2	7,66	175,2	0,55

En la Tabla 5, se muestra una comparación entre los parámetros físicoquímicos medidos en el muestreo y los límites definidos para la calidad del agua para riego de acuerdo con la FAO y el Ministerio de Medio Ambiente de Ecuador.

Tabla 5. Comparación de los límites mínimos y máximo de calidad del agua definidos por la FAO y el Ministerio de Medio Ambiente de Ecuador

Parámetros físicoquímicos	Límite mínimo	Límite máximo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Químicos						
Magnesio (mg/L)	0 [†]	60,75 [†]	26,8	38,26	47,67	27,78
Potasio (mg/L)	0 [†]	152,49 [†]	9,76	17,46	13,51	4,72
Calcio (mg/L)	0 [†]	408 [†]	29,42	52,85	44,74	24,38
Sodio (mg/L)	0 [†]	920 [†]	55,87	114,49	58,87	42,2
pH	6,5 [§]	8,4 [§]	8,05	7,9	7,82	7,66
Físicos						
CE (m Ω /cm)	0,7 [§]	> 3,0 [§]	0,66	1,12	0,89	0,55
Dureza	-	-	183,7	289,4	307,9	175,2
Otros						
RAS	< 3,0 [§]	> 9,0 [§]	1,8	2,9	1,5	1,4

[†] Sin datos.

[†] Límites definidos por la FAO (1).

[§] Límites definidos por la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua del Ministerio de Ambiente de Ecuador (2).

De acuerdo con lo establecido por estas dos instituciones, los parámetros químicos de las muestras tomadas en la acequia Tilipulo Enríquez se encuentran dentro de los límites considerados para su empleo como agua de riego.

Por otra parte, en la Figura 4 se puede observar la correlación entre la RAS y la CE frente la correlación entre la concentración de cationes y la CE resultantes de los modelos realizados.

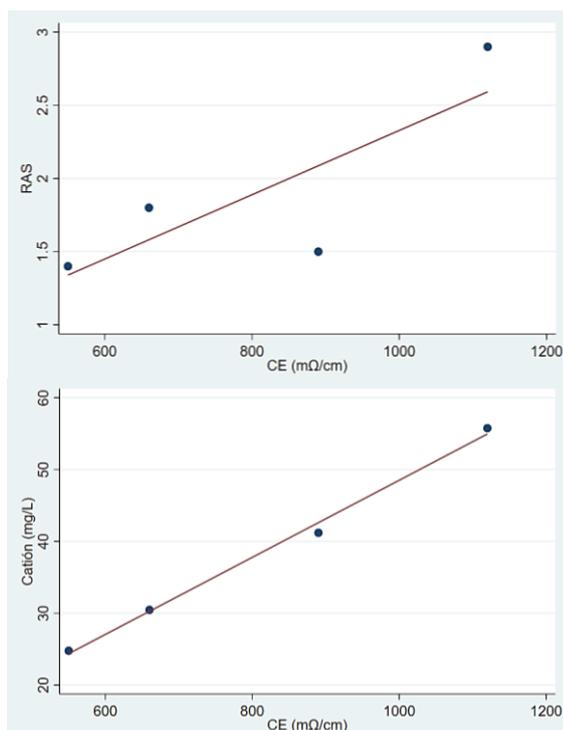


Figura 4. Correlación entre RAS y CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) vs Cationes (mg/L) y CE ($\text{m}\Omega/\text{cm}$)

La R^2 para el modelo entre las variables RAS y CE es de 0,6546, mientras que la R^2 para el modelo entre las variables cationes y CE es de 0,9949.

Al considerar la norma Riverside para la determinación de la calidad del agua, se puede apreciar que las muestras 1 y 4 corresponden a la clasificación C2 y S1, mientras que las muestras 2 y 3 se encuentran en la clasificación C3-S1, como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de las muestras según las Normas Riverside

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	RA S	Clasificación Normas Riverside	CLASE
0,660	1,8	Aguas de Buena Calidad Aptas para el riego	C2-S1 Baja en Sodio y Media en Salinidad
0,112	2,9	Aguas Utilizables para el riego con precauciones	C3-S1 Baja en Sodio y Alta en Conductividad
0,890	1,5	Aguas Utilizables para el riego con precauciones	C3-S1 Baja en Sodio y Alta en Conductividad
0,550	1,4	Aguas de Buena Calidad Aptas para el riego	C2-S1 Baja en Sodio y Media en Conductividad

Fuente: (Acosta-García & Salvadori, 2017)

5. DISCUSIONES

En el presente estudio, se comparó los resultados obtenidos con la norma de calidad de agua para riego Riverside, destacando que el recurso hídrico de la acequia Tilipulo Enríquez puede ser usado para riego de cultivos en los sectores de Tanicuchí y Poaló, debido a que el agua es baja en sodio y media en conductividad. Mientras que en las zonas de Guaytacama y Saquisilí puede usarse la acequia para riego con

precauciones, ya que el agua es baja en sodio y alta en conductividad, lo cual podría ocasionar deficiencia en el crecimiento de los cultivos. Por lo tanto, al analizar las características de cada zona de muestreo se obtuvo que:

Conforme con los valores obtenidos para el punto 1 perteneciente al sector de Tanicuchí, siendo $0,660$ ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$) de conductividad eléctrica y 1,8 de RAS, Tabla 6, se clasifica como agua apta para riego debido a que la parroquia está en una zona de grandes fallas geológicas con pendientes altas, variando entre 5 a 25% ocasionando que los valores de conductividad eléctrica sean bajos (GADPR Tanicuchi, 2016). Por lo tanto, la cantidad de sales es menor y la calidad de agua para riego es excelente. Además, la captación de agua se la hace desde el río Yanayacu aportando con un caudal de $473,69$ L/s a la acequia, por lo tanto, esta condición influye en la disminución de los valores de conductividad ya que a mayores caudales se presenta menor conductividad eléctrica. De igual forma debido a que el río antes mencionado se ubica dentro del parque nacional Llanganates, que es un área protegida; favorece así que al comienzo de la acequia el recurso hídrico se mantenga sin daños o alteraciones (GADP Tanicuchí, 2019).

En el punto 2 de muestreo ubicado en Guaytacama, se obtuvo $0,112$ ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$) de conductividad eléctrica y 2,9 de RAS, Tabla 6, la cual es un tipo de agua utilizable para riego con precauciones a causa del elevado contenido de sodio, dureza y RAS, cuyos valores respectivamente son $114,49$ mg/L, es de $289,4$ mg/L en Tabla 5 y 2,9 en la Tabla 6, valores elevados con respecto a los demás puntos de muestreo. Asociándose a este factor con toxicidades específicas por los altos contenidos de iones de sodio en las aguas de regadío que afecta a la permeabilidad del suelo y es la posible causa de problemas de infiltración (Mera & Vasquez, 2017). El elevado valor de RAS en este sector incrementa el riesgo de sodificación, tomando en cuenta que el RAS corresponde a la relación de la concentración de sodio con respecto a la de calcio y magnesio, para determinar así el riesgo de sodificación (Demin, 2016). También se ve afectada la productividad de los cultivos de la zona, al no existir un drenaje adecuado en el suelo y las plantas no toleren elevada salinidad.

Con respecto al punto 3 correspondiente a Saquisilí, se obtuvieron los siguientes valores: $307,9$ mg/L de dureza, Tabla 5, $0,890$ ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$) de conductividad eléctrica y 1,5 de RAS, Tabla 6, lo cual indica que es utilizable para riego con precauciones. Debido a que a mayor contenido de sales en el agua mayor será el esfuerzo que realizan las plantas para obtenerla, ya que, se incrementa el potencial osmótico del suelo (Castellón et. al., 2015). Además, se registra una alta conductividad en el sector, como indicador de alta concentración de sales en el agua y por ende incide en la dureza de la misma.

Otros factores que han influenciado en los puntos 2 y 3 de muestro, Guaytacama y Saquisilí es la presencia de pendientes de inclinación regular, suaves o ligeramente onduladas entre 5 a 12%, con un clima con temperaturas entre 12 a 15°C y precipitaciones entre 400 a 500 mm (GAD de la Provincia de Cotopaxi, 2015). Además, estas zonas son medianamente secas, por lo que al aumentar la temperatura y disminuir las

precipitaciones aumentan la conductividad y la salinidad. Por lo tanto, al recurso hídrico de ambos sectores se ha clasificado como aguas utilizables para riego con precaución, motivo por el cual estas aguas podrán usarse en cultivos que soporten la salinidad, ya que las sales disueltas incrementan el esfuerzo que la planta debe realizar para absorber el agua, y en la medida que disminuye el contenido de agua y aumenta la concentración de sales el potencial de la planta decrece y ocasionaría una reducción en la producción agrícola (Pocoy, 2015).

En el punto de muestreo 4 en el sector de Poaló, se obtuvo $0,550(\mu\text{S cm}^{-1})$ de conductividad eléctrica y 1,8 de RAS, Tabla 6, los cuales permitieron clasificar como agua apta para riego debido a su baja conductividad eléctrica y salinidad. Estos resultados se deben a que el suelo tiene características similares a la zona de Tanicuchí. Este se considera como un sector húmedo y lluvioso, con variaciones entre 92 y 95% de humedad, además de precipitaciones entre 700 y 800 mm (GADM Santiago de Píllaro, 2021). Por lo tanto, en este punto de muestreo la acequia al presentar mayores caudales afecta ciertas características del recurso hídrico, como baja conductividad y disminución en la concentración de sodio.

La parroquia cuenta con un canal de riego en buenas condiciones que permite llegar a más usuarios conectados a esta red, disminuyendo así la posibilidad de erosionar la capa arable del suelo y sus nutrientes; además de optimizar el uso del recurso hídrico. Se demuestra que, al contar con un sistema de riego tecnificado, en referencia al componente ambiental, infraestructura, método y una distribución de parcelas o cultivos, alcanza mayor eficacia de riego. (GADP San José de Poaló, 2015).

6. CONCLUSIONES

El análisis de la calidad de agua mediante el índice SAR permitió evaluar con éxito la calidad del agua de riego proveniente de la acequia Tilipulo Enríquez de la parroquia Poaló.

El punto 1 sector de Tanicuchí, según los resultados obtenidos, el agua es de buena calidad, apta para el riego con concentraciones bajas de sodio y mediana salinidad, esto debido a que es el primer punto donde el agua se capta del río Yanayacu. El cual al ser parte de una zona protegida de los Llanganates posee poca contaminación e intervención antropogénica que favorece a su buena calidad.

El punto 2 ubicado en Guaytacama, proporcionó resultados con las más altas concentraciones de sodio y con un SAR de 2,9. Este sector se clasifica como agua óptima para utilizarse para riego con precauciones. Este comportamiento se debe a cultivos aledaños que usan elementos tóxicos provenientes de pesticidas y fungicidas que al atravesar la parroquia Guaytacama, está propensa a las actividades humanas industriales que desarrollan las florícolas, invernaderos y brocoleras. Otros factores que afectan al trayecto de la acequia son la erosión del suelo y las rocas, la baja precipitación junto a altas temperaturas que dan lugar a la acumulación de sales (GADP Guaytacama, 2014).

El punto 3 del sector Saquisilí presenta las mismas características del punto anterior, es decir, se clasifica como aguas óptimas para utilizarse para riego, pero con precauciones. Esto se debe a que comparten estrechamente los mismos factores climatológicos y antropogénicos, actividades industriales como las florícolas, invernaderos y brocoleras que se desarrollan aún por estos sectores.

El punto 4 ubicado en Poaló, es una de las zonas más aptas para el riego que se clasifican como aguas de buena calidad con concentraciones bajas de sodio y mediana conductividad. Se explica este comportamiento favorable gracias a las características geológicas, su ubicación geográfica que provoca que tengan baja conductividad y salinidad. En este tramo de la acequia, el recorrido es a través de una canaleta de hormigón, lo cual no favorece a la erosión del suelo y no está en contacto con actividades industriales (GADP San José de Poaló, 2015).

El estudio permite exponer a los pobladores de Poaló que el agua empleada para sus actividades de riego si bien no posee restricciones hay que considerar e informar sobre el uso con precaución, es decir, cada actividad relacionada con el cuerpo hídrico se debe tener cuidado puesto que el agua está moderadamente contaminada; esto permite a los representantes y las directivas de aguas implementar medidas preventivas, como principales actividades a tener en cuenta son: fomentar mingas de limpieza de la acequia con equipo protección personal y restringir el uso directo del agua de la acequia para fines pecuarios, domésticos y recreativos.

Este estudio aporta con información importante que será de utilidad para futuras investigaciones ya que el incremento de la población, la demanda de alimentos, consumo de productos que no son de primera necesidad han provocado una alta demanda del agua de la acequia. Este antecedente ayudaría a proponer proyectos en torno a este cuerpo hídrico en la parroquia Poaló y así facilitar a la toma de decisiones.

REFERENCIAS

- Acosta-García, J., & Salvadori, J. (2017). *Evaluación De La Calidad De Agua Para Riego Mediante El Empleo De Criterios Actualizados*. [Tesis Ingeniería]. Argentina: U.N.L.Pam.
- Agilent Technologies. (14 de Marzo de 2016). Fundamentos de Espectroscopia Atómica: Hardware.
- Aguirre, J. (2019). *Propiedades fisicoquímicas del suelo*. Obtenido de Edafología: <http://edafologia.ugr.es/introeda/tema05/ccc.htm>
- Ayers R, W. D. (1994). *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and drainage paper. Obtenido de <http://www.fao.org/3/T0234E/T0234E00.htm>
- Barrows, H., & Drosdoff, M. (1958). *Comparación de metodos para determinar la capacidad de intercambio de base de algunos suelo de planicie costera baja del sureste de Estados unidos*. Madrid: Sociedad Estadounidense de Ciencias del suelo.
- CAIRO. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Nanegalito*. Quito.
- Castellón, J., Bernal, R., & Hernández, M. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería*, 19-1, 39-50,

- ISSN 1665-529-X. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750924004.pdf>
- Demin, P. (2016). Calidad de agua de riego. Variación espacial y temporal en el canal Principal del Este del dique Las Pirquitas, provincia de Catamarca. *Revista estudios ambientales*, 4(1). 4-18.
- FAO. (2012). *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos. Riego y drenaje-55*.
- Foro de los Recursos Hídricos. (2013). *Hacia una nueva ley Aguas Transformadora*. Quito: Tiraje.
- GAD de la Provincia de Cotopaxi. (2015). *Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial Cotopaxi 2025*. Cotopaxi: Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Cotopaxi (GAD Cotopaxi).
- GADM Santiago de Pillaro. (18 de Mayo de 2021). *Municipalidad de Santiago de Pillaro*. Obtenido de Municipalidad de Santiago de Pillaro: https://www.pillaro.gob.ec/?page_id=3343
- GADMC Saquisilí. (2015). *Actualización Del Plan Participativo Intercultural De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Del Cantón Saquisilí*. Saquisilí.
- GADP Guaytacama. (2014). *Contenidos Del Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Del Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial De Guaytacama*. Latacunga.
- GADP San José de Poaló. (2015). *Plan De Desarrollo Y De Ordenamiento Territorial*. Latacunga.
- GADP Tanicuchí. (2019). *Gad Parroquial Rural De Tanicuchi*. Obtenido de <https://tanicuchi.gob.ec/cotopaxi/datos-generales/>
- GADPR Tanicuchí. (2016). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia "San Lorenzo de Tanicuchi"*. Cotopaxi: GADPR San Lorenzo de Tanicuchi.
- Gaitan, M. S. (2004). *Determinación de metales con digestión ácida y solubles lectura directa por espectrofotometría de absorción atómica*. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- García, A. (2012). Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua para riego. *IAH*, 27-36.
- García, M. (2013). *Análisis químico de suelos y aguas*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Gil, H. A. (2013). Tecnologías verdes para el aprovechamiento de aguas residuales urbanas: análisis económico. *Revista Ambiente & Agua*, 8(3), 118-128. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1174>
- Gobierno Parroquial Nanegalito y Fundación Imaymana. (2011). *Plan De Desarrollo Territorial Participativo 2011*.
- Hernández, D. J. (2010). Espectrometría óptica atómica. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 14(41). 3-10.
- Herrera, A. (2016). *Análisis de relación de absorción de sodio*. Obtenido de Microlab Industrial: <http://www.microlabindustrial.com/parametros/propiedades-agregadas/707/relacion-de-absorcion-de-sodio#:~:text=L%20Relaci%C3%B3n%20de%20Absorci%C3%B3n%20de%20Sodio%20%28RAS%2C%20o,RAS%2C%20el%20agua%20es%20menos%20apta%20para%20riego>.
- INEC. (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- Jiménez, S. (2015). *Evaluación de la contaminación en el sistema riego en la acequia Tambo, para la optimización del recurso hídrico*. [Tesis Ingeniería]. Universidad Técnica del Norte - Ibarra, Ecuador.
- Julca, A., Meneses, L., Blas, R., & Bello, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *INDESIA (Arica)*, 24(1), 49-61. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>.
- Loaiza, S. (2014). *Obtención de biol a partir de estiércol de ganado porcino y vacuno producido en la finca Bella María, cantón Quito, sector Nanegalito*. Universidad Internacional SEK, Quito.
- López, H., Oropeza, I., & Betancourt, C. (2017). Determinación de la concentración de calcio, magnesio y potasio en agua potable de consumo humano, empleando la técnica de espectroscopia atómica. *Revista de Investigación de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador*, 41(90), 120-133.
- MAGAP. (2013). *Plan Nacional de Riego y Drenaje 2012-2027*. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuicultura y Pesca, 5-13. Quito.
- Maldonado, A. (2016). *Evaluación de diferentes dosis de hexametafosfato de sodio en la determinación de tres tipos texturales de suelo, mediante el método de bouyoucos*. [Tesis Ingeniería]. Quito: Universidad central del Ecuador.
- Maldonado, E. (2014). *Propuesta de Gestión y Desarrollo de Turismo Sostenible para las ruinas arqueológicas de Tulipe*. [Tesis Ingeniería]. Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Mera & Vasquez. (2017). *Determinación De La Calidad De Agua Para Riego En El Sistema De Conduccion, Santa Ana*. [Tesis Ingeniería]. Universidad Técnica de Manabí. Santa Ana.
- Meza, J. (15 de abril de 2015). *Museos de Quito*. Obtenido de <https://museosdmjennifermeza.wordpress.com/2015/04/30/comp-lejo-arqueologico-de-tulipe/>
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua*. Quito. Obtenido de Available from: <http://www.fao.org/faolex/results/details/es/c/LEX-FAOC155128/>
- Muñoz, A. (2020). *La importancia de conocer la capacidad de intercambio catiónico del suelo*. Obtenido de Contexto Ganadero: <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/la-importancia-de-conocer-la-capacidad-de-intercambio-cationico-del-suelo>
- Navarro, V. H. (2012). *Hablemos de Riego*. Ibarra.
- Pérez, E. (2014). Idoneidad del método de análisis de magnesio en agua potable por absorción atómica con curva de calibración cuadrática. *Tecnología en Marcha*, 27(4), 23-29.
- Pocoy, Y. (2015). *Calidad del agua para riego en el centro de investigación y producción agrícola*. [Tesis Ingeniería] Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
- Proaño, M. (2002). *Primer Foro de los Recursos Hídricos*. Quito - Ecuador: CAMAREN – MANRECUR.
- Quintero, L. (2015). *La Relación de Absorción de Sodio*. Obtenido de Fertilab: <https://www.fertilab.com.mx/Sitio/Vista/La-Relacion-De-Adsorcion-De-Sodio.php>
- Quinteros, D. (2019). Evaluación de la calidad de agua para riego y aprovechamiento del recurso hídrico de la quebrada Toglhuayco. *in Siembra*. 6(2), 046-057. <https://doi.org/10.29166/siembra.v6i2.1641>
- Quishpe, M. J. (2016). *Evaluación de la calidad físico química y bacteriológica del agua de riego de la Estación Experimental de*

Cota Cota. [Tesis Ingeniería] Universidad Mayor de San Andrés. La Paz.

Rodríguez, B. (2009). *Movilidad, Biodisponibilidad y Degradación inducida de isómeros de hexaclorociclohexano (HCH) en suelos contaminados*. [Tesis Ingeniería]. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.

Romero, A. A. (2010). *Contaminación ambiental y calentamiento global*. Mexico: Trillas.

Sánchez, J. (2020). *Fertilidad del suelo y nutrición*. Obtenido de UNNE: <http://www.exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FERTILIDAD%20DEL%20SUELO%20Y%20NUTRICION.pdf>

Sanchez, J. Z. (2003). *Visión Integral y análisis de sistemas de riego*. Quito: RUVENZ.

Secretaría de Ambiente Distrito Metropolitano de Quito . (2015). *Plan de Monitoreo, Control y Vigilancia Ambiental en la ACUS Maspi-Guaycuyacu-Sahuangal y Sistema Hídrico y Arqueológico Pachijal, Distrito Metropolitano de Quito* . Quito.

Soto, S. (2010). *Concepto de Capacidad de Intercambio Catiónico en el suelo*. Universitat Politècnica de València.

Tanicuchí, G. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial*. Cotopaxi: Gobierno Autónomo Descentralizado de la Parroquia Tanicuchi.

Vera, M. C. (2012). Análisis de la directiva europea: paradigma de la justificación y establecimiento de los valores paramétricos. el caso concreto de los plaguicidas. *Revista Española de Salud Pública*, 86(1) 21-35.

Weemaels, N. (2009). *Uso y aprovechamiento del agua*. Quito.

West, D. M., Skoog, D. A., Holl, F. J., & Crouc, S. R. (2015). *Fundamentos de Química Analítica* (9na Edición ed.). México D.F: Cengage Learning Editores, S.A. .

Zapata, A. (2008). *Una aproximación a los conflictos por el agua en el Ecuador*. Quito: Aline Arroyo.



Soraya Abigail Jaramillo Castro, estudiante de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Central del Ecuador (UCE).



Lorena Dominic Zurita Calle, estudiante de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Central del Ecuador (UCE).



Amanda Gabriela Valdiviezo Aguilar, estudiante de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Central del Ecuador (UCE)

BIOGRAFÍAS



Suly Margoth Rodríguez Ayala, PhD. en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Docente de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Central del Ecuador (UCE). Ha realizado investigaciones de contaminación y remediación ambiental y publicado varios artículos científicos.



Carlos Anibal Choloquina Changoluisa, estudiante de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Central del Ecuador (UCE)

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

Apellido, Nombre¹; Apellido, Nombre²

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

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

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

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

Title of Manuscript

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

Keywords: Include a list of 3 to 6 words.

1. SECCIÓN I

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

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

2. SECCIÓN II

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

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

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

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

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

3. SECCIÓN III

3.1 Figuras, tablas y márgenes

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

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

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

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

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

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

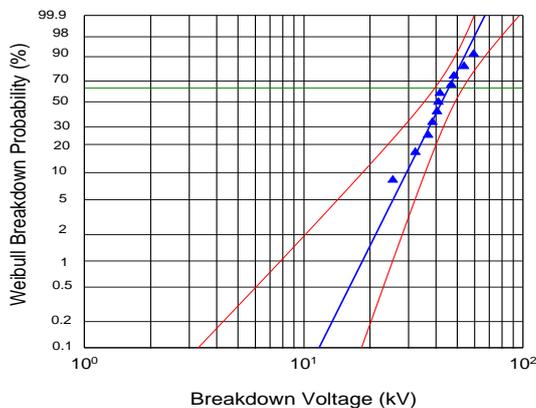


Figura 1. Distribución Weibull de 60 Hz voltajes de ruptura de cables $\alpha = 45,9$ kV $\text{pico}\beta = 5,08$. Intervalo de Confidencia 95%

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

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

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

Tabla 1. Márgenes de página

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

3.2 Ecuaciones

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

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

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

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

3.3 Unidades

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

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

3.4 Abreviaturas y Siglas

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

3.5 Otras recomendaciones

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

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

REFERENCIAS

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

El artículo debe contener un mínimo de 6 referencias.

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

Formato básico para referenciar libros:

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

- **Libros con un autor:**

En las referencias:

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

Cita en el texto:

(King, 2000) o King (2000) argumenta que ...

- **Libros con dos autores:**

En las referencias:

Treviño, L. K., y Nelson, K. A. (2007). *Managing business ethics: Straight talk about how to do it right*. Hoboken, NJ: Wiley

Cita en el texto:

(Treviño y Nelson, 2007) o Treviño y Nelson (2007) ilustran...

- **Libros con dos o más autores:**

En las referencias:

Krause, K.-L., Bochner, S., y Duchesne, S. (2006). *Educational psychology for learning and teaching* (2nd ed.). South Melbourne, VIC., Australia: Thomson.

Cita en el texto:

De acuerdo con Mezey et al. (2002) o ... (Mezey et al., 2002).

Formato básico para referenciar artículos científicos

Apellido, Inicial Nombre. (Año). Título del Artículo. *Título/Iniciales de la Revista*. Número de Volumen (Tomo), páginas

- **Artículos en revistas:**

En las referencias:

Sainaghi, R. (2008). Strategic position and performance of winter destinations. *TourismReview*, 63(4), 40-57.

Cita en el texto:

(Sainaghi, 2008) o Sainaghi (2008) sugiere ...

- **Artículos con DOI**

En las referencias:

Shepherd, R., Barnett, J., Cooper, H., Coyle, A., Moran, J., Senior, V., & Walton, C. (2007). Towards an understanding of British public attitudes concerning human cloning. *Social Science & Medicine*, 65(2), 377-392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.socscimed.2007.03.018>

Cita en el texto:

Shepherd et al. (2007) o Shepherd et al. (2007) resaltan la...

- **Artículos sin DOI**

En las referencias:

Harrison, B., & Papa, R. (2005). The development of an indigenous knowledge program in a New Zealand Maori-language immersion school. *Anthropology and Education Quarterly*, 36(1), 57-72. Obtenido de la base de datos Academic Research Library

Cita en el texto:

(Harrison y Papa, 2005) o En su investigación, Harrison y Papa (2005) establecieron...

- **Artículos en línea**

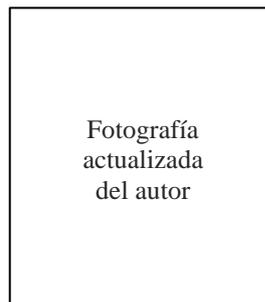
En las referencias:

Snell, D., & Hodgetts, D. (n.d.). The psychology of heavy metal communities and white supremacy. *Te Kura Kete Aronui*, 1. Obtenido de: <http://www.waikato.ac.nz/wfass/tkka>. (Mayo, 2015).

Cita en el texto:

(Snell y Hodgetts, n.d.) o Snell y Hodgetts (n.d.) identificaron "..."

BIOGRAFÍA



Mini biografía del primer autor con un máximo de 100 palabras.

Fotografía
actualizada
del autor

Mini biografía del segundo
autor con un máximo de 100
palabras.

INDEXACIONES



revistapolitecnica.epn.edu.ec





revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



REVISTA
POLITÉCNICA



EPN
editorial

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec