



# REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

ISSN: 1390-0129  
eISSN: 2477-8990

Volumen 52, Nro. 2, Noviembre 2023 · Enero 2024



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



REVISTA  
POLITÉCNICA



**EPN**  
*editorial*

[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)  
[www.epn.edu.ec](http://www.epn.edu.ec)



# REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

ISSN: 1390-0129  
eISSN: 2477-8990

Volumen 52, Nro. 2, Noviembre 2023 · Enero 2024



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL



REVISTA  
POLITÉCNICA



EPN  
*editorial*

[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)  
[www.epn.edu.ec](http://www.epn.edu.ec)

## TEMÁTICA Y ALCANCE

La Revista Politécnica es una publicación periódica trimestral editada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, creada en el año 1961, siendo la primera revista científica ecuatoriana, cuyo objetivo es contribuir al conocimiento científico y tecnológico, mediante la publicación de estudios científicos relacionados con las áreas de ciencias básicas (Física, Química, Biología y Matemática) e ingenierías (Química y Agroindustria, Civil y Ambiental, Eléctrica y Electrónica, Geología y Petróleos, Mecánica, y Sistemas). La Revista Politécnica está dirigida a profesionales e investigadores que trabajan en estos campos del conocimiento.

### EDITORIA

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

### CO-EDITOR

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

### CONSEJO EDITORIAL

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

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

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

Ph.D. Hernán 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*  
Organización Latinoamericana de Energía, Ecuador

Ph.D. Gabriel Salazar

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 diferentes índices, siendo los principales SCOPUS, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ).

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

MSc. Karina Játiva  
karina.jativa@epn.edu.ec

#### *Proofreader*

MSc. María Eufemia  
Torres

#### *Diseño de Portada*

Cristian Basurto  
Diseñador Gráfico

#### *Fotografía de Portada*

Eduardo Carrasco  
Archivo  
Universidad Católica  
de Cuenca

## 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**

### **La ciencia para la paz y el desarrollo**

El 10 de noviembre, a nivel mundial se celebra el día de la ciencia para la paz y el desarrollo. Esta fecha antecede a la Semana Internacional de la ciencia y la paz desarrollada a partir del 11 de noviembre. Los dos eventos tienen como propósito acercar a la sociedad con los descubrimientos científicos más relevantes, fomentar la paz a través del intercambio académico y destacar la importancia de la ciencia en la vida cotidiana. A diferencia de lo que algunos piensan, el derecho humano al acceso a la ciencia no es reciente; la ciencia fue proclamada derecho en la Declaración Universal de los Derechos Humanos de 1948 y en el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de 1966. Desde entonces, todos los seres humanos tienen el derecho de intervenir en la ciencia y favorecerse de ella.

La ciencia es considerada como el conjunto de conocimientos relacionados con la naturaleza, la sociedad y el pensamiento que son acumulados a lo largo de los años. Su existencia permite comprender el mundo que nos rodea y se desarrolla como resultado de la actividad práctica de los seres humanos. Su intervención permite encontrar soluciones tecnológicas y eficientes a los desafíos que continuamente, se presentan en la sociedad. Por lo que, el acceso abierto a la ciencia y el aprovechamiento del progreso científico en todos los estratos de la sociedad es primordial para el desarrollo.

El lema del día mundial de la ciencia para la paz en este año es “generar confianza en la ciencia”. Convertir a la ciencia en el centro de toma de decisiones; es decir, tomar decisiones a nivel político y personal basadas en experimentación previa y validez científica se convertiría en la solución a problemáticas globales como la desnutrición, desempleo o cambios medioambientales, y trazaría un camino prometedor hacia la paz. Lamentablemente, generar esta confianza se ha vuelto un reto constante ante limitaciones como una baja inversión en investigación científica, educación parcializada, intereses o conflictos de grupos políticos, entre otros. En este sentido, una de las prioridades dentro de las mesas de conversación en la semana de la ciencia y la paz de este año es destacar la importancia de la independencia de los investigadores científicos, al tener como base de su trabajo a valores éticos, socio culturales o medioambientales.

La divulgación científica aporta un rol importante en la creación de vínculos confiables entre la ciencia y la sociedad. Una forma de generación de conocimiento es el resultado de un trabajo planificado, organizado y estructurado, con base en el estudio de fenómenos observados y validados. La presentación por medio de artículos científicos de conclusiones y data generadas dentro de estas investigaciones es una forma de acercamiento de la ciencia al público en general.

Alineada con esta premisa, la Revista Politécnica es un espacio que promueve la confianza en la ciencia y la paz para divulgar e incluir en sus publicaciones periódicas, de forma gratuita y accesible, los artículos más relevantes en el ámbito científico, seleccionados bajo los estrictos criterios de revisión. En este nuevo número, se incluyen cuatro artículos enfocados en soluciones tecnológicas para el medio ambiente, dentro de las áreas de ingeniería civil, ambiental y física. Cinco artículos que proporcionan innovaciones tecnológicas para la automatización e industrialización de procesos en las ramas de ingeniería en sistemas, civil, electrónica y telecomunicaciones, y petróleo; y un artículo que brinda una solución alternativa para el almacenamiento de alimentos en silos, dentro del área de ingeniería mecánica.

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

El Comité Editorial de la Revista reitera el agradecimiento a la confianza de la comunidad científica. Estamos comprometidos como equipo para continuar elevando los estándares de rigurosidad y calidad, con el objetivo de impactar en contextos internacionales.

## **Editorial**

Every November 10, the Science for Peace and Development Day is celebrated worldwide. This date precedes the International Week of Science and Peace, which begins on November 11. The purpose of both events is to bring society closer to the most relevant scientific discoveries, to promote peace through academic exchange and to highlight the importance of science in everyday life. Contrary to what some people think, the human right of access to science is not recent; science was proclaimed a right in the Universal Declaration of Human Rights of 1948 and in the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights of 1966. Since then, all human beings have the right to participate in and benefit from science.

Science is considered as the body of knowledge related to nature, society and thought that is accumulated over the years. Its existence makes it possible to understand the world around us and develops as a result of the practical activity of human beings. Its intervention allows finding technological and efficient solutions to the challenges that continuously arise in society. Therefore, open access to science and the use of scientific progress in all strata of society is essential for development.

The theme of this year's World Science Day for Peace is "building trust in science". Making science the center of decision making; that is, making decisions at the political and personal level based on prior experimentation and scientific validity would become the solution to global problems such as malnutrition, unemployment, or environmental changes, and would chart a promising path towards peace. Unfortunately, generating this confidence has become a constant challenge in the face of limitations such as low investment in scientific research, biased education, interests, or conflicts of political groups, among others. In this sense, one of the priorities within the roundtable discussions during this year's Science and Peace Week is to highlight the importance of the independence of scientific researchers, having ethical, socio-cultural, or environmental values as the basis of their work.

Science outreach plays an important role in creating reliable links between science and society. A form of knowledge generation is the result of a planned, organized, and structured work, based on the study of observed and validated phenomena. The presentation through scientific articles of conclusions and data generated within these investigations is a way of bringing science closer to the public.

Aligned with this premise, the Revista Politécnica is a space that promotes confidence in science and peace by disseminating and including in its periodical publications, free and accessible, the most relevant articles in the scientific field, selected under strict review criteria. This new issue includes four articles focused on technological solutions for the environment, within the areas of civil, environmental engineering and physics. Five articles provide technological innovations for the automation and industrialization of processes in the fields of systems engineering, civil engineering, electronics and telecommunications, and petroleum; and one article provides an alternative solution for food storage in silos, within the area of mechanical engineering.

We would like to thank our readers who every day consider Revista Politécnica as a reference in their research. We are sure that the content of these manuscripts will captivate the interest of researchers, professors, and students in their own activities.

The Editorial Board of the Journal reiterates its gratitude to the confidence of the scientific community. We are committed as a team to continue raising the standards of rigor and quality, with the aim of making an impact in international contexts.

**Contenido**  
**Vol. 52, No. 2**  
**Noviembre 2023 - Enero 2024**

7

Cordero, Paula; Zambrano, Yuliana; Heras, Diego; Matovelle, Carlos

**El Bioindicador Idóneo para la Detección de Plomo Atmosférico a Partir de una  
Experiencia en Cuenca, Ecuador**

*The Suitable Bioindicator for the Detection of Atmospheric Lead From an Experience in  
Cuenca, Ecuador*

19

Castro-Martin, Ana Pamela; Silva-Naranjo, Patricio

**Dispensador Inteligente de Frutos Secos para Producción Personalizada en la Industria  
4.0**

*Smart Nut Dispenser for Customized Production in Industry 4.0*

29

Almeida Navarrete, Javier; Hube, Matías; Khorami, Majid

**Evaluación Experimental de la Resistencia Sísmica de Muros de Concreto Armado de  
Espesor Reducido en Viviendas de Baja Altura**

*Experimental Evaluation of the Seismic Resistance of Reinforced Concrete Walls with Reduced  
Thickness in Low-rise Residential Buildings*



37

Rivera, David; Ávila, Alvaro; Ávila, Carlos

**Parametric Research of Granular Flow in Silos: A Micro- Mechanical Approach**

*Estudio Paramétrico del Flujo Granular en Silos: Una Aproximación Micro-Mecánica*

47

Beltrán, Franklin

**Principio de Certeza Máxima ( $\aleph_{max}$ ). Análisis Teórico de un Nuevo Invariante Probabilístico con Aplicaciones en el Estudio de Tormentas en Quito-Ecuador**

*Maximum Certainty Principle ( $\aleph_{max}$ ). Theoretical Analysis of a New Probabilistic Invariant with Applications in the Study of Rainstorms in Quito-Ecuador*

59

Roncero, Cristhian; Martínez, Yuselys; Vegas, Ruben; Rodríguez, Yenisbeth

**Sistema de Supervisión y Control de Rehervidores de Deshidratación de Gas: Caso Trenes A y B del Complejo Muscar**

*Supervision and Control System of Gas Dehydration Reboilers: Case of Trains A and B of the Muscar Complex*

69

Egas, Carlos; Gil-Castañeira, Felipe; Herrera, Carlos

**Análisis del Retardo en la Transmisión de Secuencia de Tramas en Redes Inalámbricas de Sensores Lineales Usando iACK**

*Analysis of the Delay in the Transmission of Frame Sequence in Wireless Networks of Linear Sensors Using iACK*

77

Martínez, Fabiola; Prieto, Cristhian; Martínez, Paulina; Ochoa, Pablo

**Calidad Ecológica de las Cuencas Abastecedoras de Agua en la Ciudad de Loja – Ecuador**

*Ecological Quality of the Water Supply Basins in the City of Loja – Ecuador*

87

Sandobalin, Julio; Iñiguez-Jarrín, Carlos

**Modeling Cloud Infrastructure Provisioning: A Software-as-a-Service Approach**

*Modelado del Aprovechamiento de Infraestructura en la Nube: Un Enfoque de Software como un Servicio*

99

Arriola, Guillermo; Villegas, Luis; Fernandez, Joseph; Vallejos, Jheny; Idrogo, Cesar

**Assessment of Parameters of the Generalized Extreme Value Distribution in Rainfall of the Peruvian North**

*Evaluación de Parámetros de la Distribución Generalizada de Valor Extremo en Precipitaciones del Norte Peruano*

# El Bioindicador Idóneo para la Detección de Plomo Atmosférico a Partir de una Experiencia en Cuenca, Ecuador

Cordero, Paula<sup>1,2,\*</sup> ; Zambrano, Yuliana<sup>1</sup> ; Heras, Diego<sup>1</sup> ; Matovelle, Carlos<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Católica de Cuenca, Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción. Cuenca, Ecuador

<sup>2</sup>Grupo Geociencias, Ambiente y Recursos Naturales, Cuenca, Ecuador

**Resumen:** La alteración ecosistémica debido a metales pesados es uno de los mayores problemas ambientales y de salud pública; generalmente se miden en aire, suelo y agua, pero en menor medida se conoce su incidencia sobre los seres vivos. Este trabajo se enfoca en la concentración de plomo tanto en el aire como en los bioindicadores miel y polen de abejas en Cuenca (Ecuador). Se tomaron muestras de partículas atmosféricas (PM10) en tres sitios de la zona urbana y muestras de miel y polen en 6 sitios distintos, con 3 repeticiones cada una. Se analizó la concentración de plomo mediante espectrofotometría de absorción atómica. En miel, el plomo encontrado está en un rango de 0,033 a 0,08 mg/kg, menor a los límites superiores según la norma del Servicio Nacional de Normalización del Ecuador (INEN): 1 mg/kg, y la norma europea 0,10 mg/kg. Las cantidades de plomo detectadas en polen no sobrepasan los 0,12 mg/kg, siendo inocuo para el consumo, pues, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) establece que, el consumo máximo de plomo por individuo es de 0,214 mg al día. La densidad de plomo en partículas atmosféricas se estableció en una categoría de  $1 \times 10^{-7}$  a  $9 \times 10^{-7}$  ug/m<sup>3</sup>, entre los límites instaurados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 1,5 ug/m<sup>3</sup>. Se concluye por el índice de Yuen que el polen es un mejor bioindicador de concentración por plomo que la miel y, que existen bajas ocurrencias de este metal en Cuenca, Ecuador.

**Palabras clave:** contaminación atmosférica, bioindicador, plomo, polen, miel

## The Suitable Bioindicator for the Detection of Atmospheric Lead From an Experience in Cuenca, Ecuador

**Abstract:** The ecosystem alteration due to heavy metals is one of the biggest environmental and public health problems; generally measured in air, soil and water, but their incidence on living beings is known to a lesser extent. This work focuses on the concentration of lead both in the air and in the bioindicators honey and bee pollen in Cuenca (Ecuador). Samples of atmospheric particles (PM10) were taken at three sites in the urban area and samples of honey and pollen at 6 different sites, with 3 repetitions each. Lead concentration was analyzed by atomic absorption spectrophotometry. In honey, the lead found is in a range of 0.033 to 0.08 mg/kg, less than the upper limits according to the standard of the National Standardization Service of Ecuador (INEN): 1 mg/kg, and the European standard 0.10 mg /kg. The amounts of lead detected in pollen do not exceed 0.12 mg/kg, being safe for consumption, since the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) establishes that the maximum consumption of lead per individual is 0.214 mg a day. The lead density in atmospheric particles was established in a category of  $1 \times 10^{-7}$  to  $9 \times 10^{-7}$  ug/m<sup>3</sup>, within the limits established by the WHO of 1.5 ug/m<sup>3</sup>. It is concluded from the Yuen index that pollen is a better bioindicator of lead concentration than honey and that there are low occurrences of this metal in Cuenca, Ecuador.

**Keywords:** air pollution, bioindicator, lead, pollen, honey

### 1. INTRODUCCIÓN

La relación del ser humano con su medio se ha vuelto cada vez más difícil debido a las variaciones en la forma de vida de las sociedades humanas, que se han dado en los últimos 150 años con la Revolución Industrial, esto ha ocasionado

incluso el uso de nuevos vocablos entre ellos “contaminación”, que no es más que la alteración de los distintos medios naturales, la misma que se establece mediante la medición de parámetros y su comparación con normas establecidas (Kimura et al., 2009).

\*pcorderoc@ucacue.edu.ec

Recibido: 10/03/2023

Aceptado: 22/06/2023

Publicado en línea: 14/11/2022

10.33333/rp.vol52n2.01

CC 4.0

La forma más evidente de contaminación del aire es el smog que puede visualizarse en las ciudades. Pero, existen otras formas de polución visible e invisible, algunas de ellas contribuyen al calentamiento global. La contaminación del aire se da por cualquier sustancia existente en su composición que tiene efectos dañinos sobre los seres vivos y el ambiente (Saénz, 2017; Vullo, 2003). El Ecuador, al ser un país inmiscuido en el progreso industrial forma parte del “mundo contaminado” y entre sus ciudades pujantes está Cuenca, por ello la investigación ambiental dentro de este territorio es prioritaria (Tello, 2018).

La contaminación ambiental tiene efecto directo sobre la salud humana, es por eso que el estudio de los valores máximos permisibles en cuanto a diferentes contaminantes atmosféricos, entre ellos la concentración de plomo se relaciona con las enfermedades que pueden provocar (Bogdanov, 2006; Parikh et al., 2021; Ruiz et al., 2013). Las sustancias tóxicas entran en la cadena alimenticia de los ecosistemas provocando bioacumulación en los organismos, entre ellos en las abejas y por tanto en sus exudados como la miel y el polen apícola (Kumar et al., 2020; M Van der Steen et al., 2015). Además, para ejercer control sobre la contaminación atmosférica se la debe monitorear constantemente. Una de las maneras sencillas de hacerlo es el uso de bioindicadores como los insectos y particularmente áfidos y sus derivados como el polen, la miel, las ceras (Bogdanov, 2006; Conti y Botrè, 2018; Lambert et al., 2012; M Van der Steen et al., 2015).

Muchos metales pesados proceden de fuentes geoquímicas de fondo natural. Sin embargo, la mayor parte de ellos son utilizados como materia prima de componentes electrónicos, maquinaria y materiales. Por ejemplo, actualmente se utiliza un material eléctrico resultante de la mezcla de zirconato de plomo y de titanato de plomo, con las consiguientes emisiones y residuos peligrosos generados. Entre los casos más antiguos de contaminación ambiental en el mundo están los de los romanos que ya extrajeron y usaron metales pesados en la fundición de: cobre, mercurio y plomo (Ryzkowski, 1993; Tello, 2018). En la actualidad durante el transporte de contaminantes, y entre ellos el plomo, debido a la recirculación del viento pueden llegar a zonas alejadas a las de su origen (Freije, 2015).

Existen muchas fuentes de contaminación de metales pesados, entre ellas: pintura, baterías, fertilizantes o pesticidas, al no poder ser biodegradados, entran en la cadena trófica y persisten por cientos de años. Además, se traslocan al ser humano, causando muchas enfermedades crónico-degenerativas que, pueden producir intoxicación aguda y hasta la muerte (Labanda y Fernández, 2012; PNUMA, 2010).

Las partículas de plomo de pequeño tamaño habitualmente persisten en suspensión en la atmósfera durante semanas y, en este tiempo, pueden transportarse cientos de kilómetros, razón por la cual se puede encontrar plomo en organismos voladores prácticamente de cualquier lugar en el mundo (Cortez-Lugo et al., 2003). De acuerdo con (Sbarato et al.,

2000) la técnica actual de monitoreo ambiental de plomo en partículas atmosféricas solo da valores puntuales de concentración en una área específica. En cambio, especies bioindicadoras como las abejas dan cuenta de toda el área que recorren, a más de que se conoce que los metales pesados son bioacumulables en el tiempo y por tanto, mediante este tipo de monitoreo se pueden tener datos ecológicos con mayor validez en cuanto a lapso y superficie (Colin et al., 2019; Develliers, 2002); además de que la presencia de metales pesados no les provoca mayores dificultades.

El crecimiento del parque automotor dentro y fuera de las ciudades desde los años 70 y la adición de plomo en las gasolinas hasta el año 1998 (FLACSO, MAE y PNUMA, 2008), aumentaron el riesgo de contaminación por plomo en la atmósfera, lo cual afecta de diferentes maneras a toda la cadena trófica, empezando por los polinizadores ya sea directamente por inhalación o indirectamente por bioacumulación en sus tejidos y al ser humano también por inhalación e ingesta desde otros compuestos orgánicos. La intoxicación por plomo provoca saturnismo o plumbismo, cuando el plomo ingresa al cuerpo humano ya sea por ingestión o inhalación. Esta es una enfermedad que, a su vez, llega a provocar anemia, pues, interviene en el traslado de oxígeno en el tejido sanguíneo e impide la síntesis de hemoglobina. La sangre es la encargada de transportar este metal por todo el organismo y si llega al cerebro provoca problemas neurológicos irreversibles (Honorio-Labanda & Fernández-García, 2012).

Debido a que la contaminación por plomo y otros metales pesados se ha convertido en un problema de salud pública en muchos países. En los últimos años, se han llevado a cabo investigaciones, las cuales sugieren utilizar la miel y el polen como bioindicadores de contaminación ambiental (Cáceres, 2014; Córdor, 2015; Gallardo, 2007; Gutiérrez, 2016; Saenz, 2017; Sattler et al., 2016).

La mayor parte de las partículas atmosféricas son el resultado de actividades relacionadas con la construcción, las partículas secundarias se forman por la condensación de gases, provenientes de: el ozono ( $O_3$ ), los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), el dióxido de azufre ( $SO_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles ( $COV$ ), los mismos que producen problemas respiratorios en los seres humanos. Las partículas atmosféricas sólidas o líquidas de diferente composición (polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen) que se encuentran dispersas en la atmósfera y que tienen un diámetro aerodinámico menor que  $10 \mu m$  se conocen como  $PM_{10}$  y puede llegar a las vías respiratorias inferiores, y las que tiene diámetro aerodinámico menor que  $10 \mu m$   $PM_{2,5}$  suele penetrar hasta las áreas de intercambio de gases en el pulmón, y, por ello, el  $PM_{2,5}$  es considerado como un elemento cancerígeno (EMOV EP, 2014).

Las cantidades de plomo atmosférico reportadas en la ciudad de Cuenca no son mayores respecto a grandes ciudades latinoamericanas como Ciudad de México o Lima (Aguilera et al., 2019; Bedregal et al., 2012; EMOV, 2015;

Tello, 2018), sin embargo existen actualmente fuentes de contaminación como: la industria de pinturas, galvanizados y en los combustibles utilizados en el transporte. Este metal puede ser medido de manera directa mediante su concentración en PM10 o también mediante bioindicadores de manera indirecta pero que dan cuenta de un proceso de contaminación dentro del ecosistema y dentro de los seres vivos (Gutiérrez, 2016).

La calidad ambiental puede ser evaluada mediante bioindicadores, los mismos que pueden ser: especies, algunas comunidades e incluso ciertos procesos biológicos, que al ser dinámicos dan razón de cambios temporales (Parikh et al., 2021). El uso de abejas como especies indicadoras es documentado por Ruiz et al. (2013) quienes afirman que: se inicia en el año 1935 cuando Svoboda estableció que este himenóptero podría proporcionar información importante a cerca del impacto ambiental provocado por las industrias en un área específica.

Las abejas se han convertido en un valioso instrumento de monitorización ambiental, debido a sus particulares características (Gutiérrez, 2016):

- Fácilmente reconocible
- Han sido muy estudiadas en distintos ámbitos
- Su distribución es extensa en todo el mundo y su abundancia es destacada.
- Permiten un monitoreo prolongado
- Son indicadoras de cambios climáticos
- Responden a las variaciones del ambiente
- Son manipulables

Las abejas llevan a sus colmenas algunos contaminantes como: herbicidas, pesticidas, metales pesados entre otros, los mismos que están presentes en las cercanías de las colmenas y que se encuentran en las superficies de las plantas visitadas, sobre todo de las flores y el polen que recogen como alimento, además del néctar con el cual ellas fabrican la miel. Por tanto, son las abejas melíferas las más expuestas porque asimismo recorren superficies considerables de hasta 7 km<sup>2</sup> a la redonda (Gutiérrez, 2016; Zambrano, 2018). También, la miel que es un exudado proveniente de las abejas melíferas y al igual que el polen, es un producto apícola comúnmente utilizado en la alimentación ya que contienen un alto valor nutritivo (Conti y Botrè, 2018; Ryzkowski y Borowiecki, 1993; Taha, 2015). Por todas las razones antes expuestas constituyen los bioindicadores idóneos en los cuales evaluar la concentración de plomo atmosférico en el ecosistema.

Este estudio consiste en la recolección y análisis de miel de abeja y de polen para determinar el nivel de concentración de plomo mediante espectrofotometría de absorción atómica en estos dos sustratos y así analiza cuál de ellos sería un mejor bioindicador, al compararlos con los datos de contaminación atmosférica por plomo existente en las partículas atmosféricas (PM10) en los diferentes sectores la ciudad de Cuenca-Ecuador, considerando los posibles lugares de mayor contaminación por este metal. Los resultados serán comparados con las normas permisibles de concentración de plomo en alimentos y en el aire y se

realizará un análisis espacial de la contaminación por este metal.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Zona de estudio

El estudio se realizó en la zona urbana de Cuenca, misma que, registra una población de 636 996 para el año 2020, y representa el 38,3% del territorio de la provincia del Azuay en el Ecuador (INEC, 2011).

Los sitios escogidos fueron posibles lugares con presencia de plomo: el parque industrial, la autopista sur, el centro histórico; zonas con alto movimiento de automotores y de emisión industrial. También se tomaron muestras de miel y polen en las zonas cercanas a las estaciones fijas de muestreo de aire. Se escogieron seis distintos sitios para la toma de muestras de miel y polen y tres sitios de estaciones fijas de muestreo de aire (EMOV EP, 2014). De las cuales se extrajeron partículas atmosféricas PM10 para el análisis de plomo en aire. Ver Figura 1.

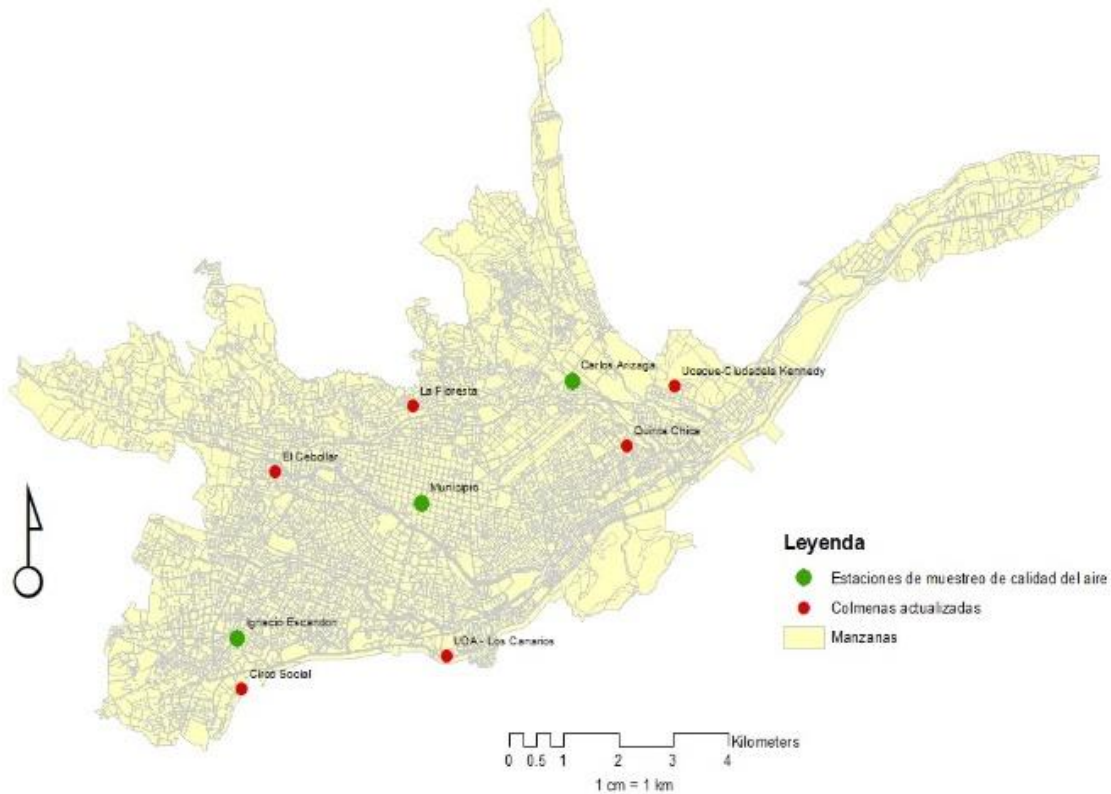
### 2.2. Toma de muestras

Las muestras de aire fueron tomadas en: mayo, julio y septiembre ya que se representan variaciones en cuanto a temperatura y precipitaciones que pueden afectar a la concentración de plomo atmosférico del filtro de PM10; el mismo que, puede precipitar con la lluvia. Además, se tomaron 100 gr. de miel y 50 gr. de polen mediante una trampa, en apiarios ya establecidos por sector, con la misma periodicidad establecida. Posteriormente, las unidades de muestreo fueron examinadas en el laboratorio mediante el método químico de digestión húmeda en alimentos (Furr, 1996) para la detección de plomo en las muestras de miel, polen y partículas atmosféricas. Las concentraciones de plomo y cadmio son generalmente ínfimas en los alimentos, por tanto, se someten a un tratamiento de aglutinación de estos compuestos a través de la extracción con disolventes entre ellos: el ácido nítrico y perclórico (Furr, 1996; Thompson et al., 1979).

Las muestras son atomizadas a través de espectrofotometría de absorción atómica, pues, los metales pesados se absorben a una longitud de onda específica sobre un detector, para lo cual es indispensable que la porción nebulizada se disperse a modo de aerosol sobre una flama de aire, mediante acetileno u óxido nitroso acetileno (Román et al., 2002; Ruiz-Jiménez et al., 2003).

### 2.3. Tratamiento de datos

Con los resultados, se realizaron dos análisis de la distribución espacial de plomo. El primero utiliza una interpolación IDW (Poderación de Distancia Inversa), que es un método determinista y exacto; que usa un algoritmo simple fundamentado en distancias y no se apoya en procesos estadísticos, esta metodología analiza diferentes combinaciones de vecinos más cercanos (Sajid et al., 2013).



**Figura 1.** Localización de las zonas de muestreo de miel de abeja, polen y PM10 en la ciudad de Cuenca

Según Cely et al. (2002); Lozano et al. (2010) y Moreno (2013) se puede analizar que la tendencia para entender la distribución de contaminantes del aire, particularmente la técnica IDW que presenta resultados convenientes al organizar superficies continuas (Afik et al., 2006). El segundo análisis es una autocorrelación considerando el espacio, mediante el índice de Moran, que es uno de los más utilizados. Una característica del cómputo del  $I$  de Moran es resultante de comparar los parámetros de cada unidad de análisis con los valores de la media, como se muestra en la Ecuación 1 (Siabato y Guzmán-Manrique, 2019).

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{W \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

Donde  $N$  es el número de unidades de análisis y  $W$  corresponde al número total de vecindades.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con Zambrano (2018), la densidad de plomo en miel no pudo ser encontrada con especificidad y esto conlleva a considerarlo como un elemento traza, que no pudo ser detectado por la técnica utilizada, debido a que en las unidades muestrales la concentración de plomo no fue detectable al ser menor a 0,033 mg/kg, y por tanto, no

superan los límites máximos de plomo permitidos la norma INEN:CODEX 193:2013 que es de 1 mg/kg en compotas y conservas (FAO y OMS, 2015). En el Ecuador, no se presentan normas particulares para la concentración de plomo permitida en miel y derivados apícolas, por ello los resultados encontrados se contrastan con la norma Europea, que señala niveles máximos 0,10 mg/kg de plomo en miel (Davis y Grant, 2003).

Se realizaron comparaciones con otros estudios, de las cuales, Kulike y Voget (1983) detectan en Berlín niveles de plomo en miel de 0,018 mg/kg bastante menor al detectado en Cuenca-Ecuador. En Israel, en el año 2006, las concentraciones de plomo detectadas fueron de 1,2 mg/kg (Afik et al., 2006) En Irán, la concentración de plomo establecida en miel de abeja es de 0,93545 mg/kg (Mohammadi Aghamirlou et al., 2015). En Córdoba, España el plomo detectado en miel tiene un rango de 0,01 a 0,05 mg/kg (Gutiérrez, 2016).

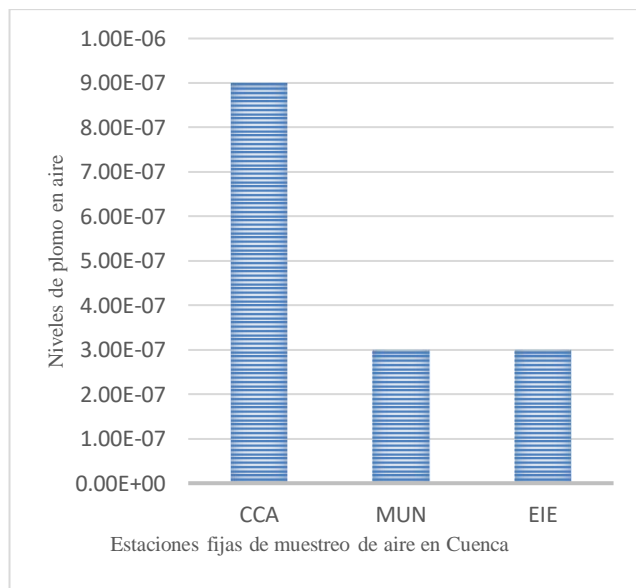
En Latinoamérica, se reporta en Arequipa-Perú concentraciones de plomo en miel de 0,68 a 2,74 mg/kg (Cáceres, 2014). En el Ecuador y específicamente en Quito, la concentración de plomo medida es de 0,079 a 0,13 mg/kg (Córdor, 2015). En cuanto a los resultados de este estudio, el único dato distinto corresponde al mes de mayo en el sector la Floresta aledaño al Parque Industrial cuya cantidad se acerca al valor de detección de acuerdo con la Tabla 1.

**Tabla 1.** Datos de niveles de plomo encontrados en los diferentes sectores medios en miligramos por kilogramo (mg/kg)

	Sector	Fuente	Mayo	Julio	Septiembre
1	CA	Aire	1,14	0,033	0,87
2	MU	Aire	0,41	0,033	0,26
3	IE	Aire	0,30	0,033	0,41
4	UC	Polen	0,02	0,080	0,07
5	CS	Polen	0,02	0,120	0,08
6	QC	Polen	0,07	0,070	0,03
7	CB	Polen	0,03	0,040	0,03
8	FI	Polen	0,03	0,110	0,02
9	UCK	Polen	0,03	0,080	0,02

Fuente: (Zambrano, 2018)

En cuanto al plomo en el aire a través de las mediciones de PM10, el valor medio más alto corresponde al sector 1 “Carlos Arízaga” con un valor de 0,681 mg/kg, los sectores 2 y 3 poseen valores medios similares de acuerdo con la Figura 2.

**Figura 2.** Niveles de concentración de plomo en aire promedio por sector medido en microgramos por metro cúbico (µg/m³) en el año 2018

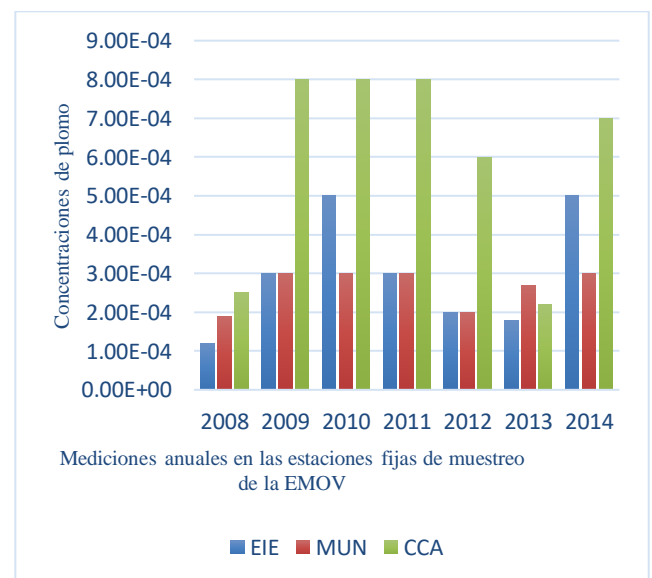
El coeficiente de variación en los tres sectores evidencia mucha mutabilidad en los datos de niveles de Pb, con los intervalos de confianza al 95%. Estos valores son mínimos respecto a concentraciones de plomo en Cuenca, que solían ser altos y que se detectaron hasta el año 1998 en que el 6,6% de niños presentaban posible saturnismo (Oviedo et al., 2000).

En el sector 1 “Carlos Arízaga” (CCA), se encuentran las mayores concentraciones de plomo y, en los sectores 2 y 3 “Municipio”(MUN) e “Ignacio Escandón” (EIE) los niveles de plomo son menores y similares con variabilidades aproximadas entre sí. Esto puede deberse a que el sector 1,

es el que está más próximo al Parque Industrial en el que se supone las emisiones de plomo son mayores (Astudillo, 2014; Tello, 2018). Las medidas de plomo en partículas atmosféricas deben transformarse de ppm a µg/m³, y deben ser promediadas por zona geográfica para estimar las concentraciones de plomo en aire (Cortez-Lugo et al., 2003). Los resultados de los análisis de plomo en aire se encuentran en un rango de  $1 \times 10^{-7}$  a  $9 \times 10^{-7}$  µg/m³, valores que son muy bajos y que no sobrepasa los límites permisibles según la OMS 1,5 µg/m³ (Davis y Grant, 2003; Ministerio del Ambiente del Ecuador et al., 2012).

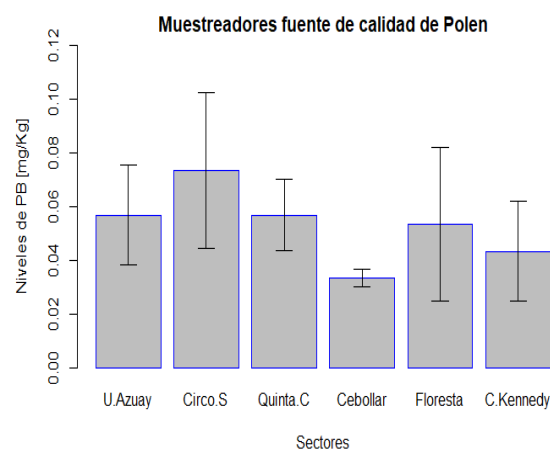
Estos resultados se corroboran con los de la institución oficial: Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca EMOV EP. Las concentraciones de plomo en la ciudad de Cuenca entre el año 2008 y el año 2014 se encuentran en un rango de  $1 \times 10^{-4}$  y  $8 \times 10^{-4}$  µg/m³ (EMOV, 2015), de acuerdo con la Figura 3. Se corrobora que los índices de plomo encontrados en las partículas atmosféricas extraídas de las estaciones fijas de muestreo de calidad del aire se correlacionan con la concentración en diferentes organismos y exudados.

Al compararlos con otros estudios se demuestran que las concentraciones en Cuenca son bajas. Bedregal et al. (2012) reportan en Perú, específicamente en Lima su capital densidad de plomo en aire de 0,05 a 0,68 µg/m³; en el año 2003 en Ciudad de México los niveles de plomo en aire establecidos van de 0,79 µg/m³ a 1,22 µg/m³ (Cortez-Lugo et al., 2003). Otro estudio de plomo en aire en la ciudad de Quito reporta valores entre 0,4 y 3,5 µg/m³ (Noriega-Rivera et al., 2008) En la zona de Boyacá en Colombia, se reportó plomo en aire en concentraciones que van de 0,1 a 1,3 µg/m³ (Agudelo-Calderón et al., 2016).

**Figura 3.** Concentración de plomo en el aire de Cuenca entre los años 2008-20014 medido en microgramos por metro cúbico (µg/m³)

Como se puede apreciar en la Figura 4, las concentraciones de plomo encontrados en el polen muestreado en los distintos sitios, de mayor a menor concentración son: “Circo Social”, seguido de la “Floresta”, “Quinta Chica” y

“Universidad del Azuay” con valores medios aproximadamente parecidos, de este grupo la variabilidad es más alta en la “Floresta”. Los niveles de plomo son más bajos en el “Cebollar” de acuerdo con Zambrano (2018). Estos resultados pueden estar relacionados a que en el sector Circo Social existe un mayor tráfico de vehículos, pues, por allí pasa la autopista que bordea el sector sur de la ciudad; por otro lado, el sector de la Floresta está localizado en las inmediaciones del Parque Industrial reportado con mayores niveles de este metal por Tello (2018).



**Figura 4.** Diagramas de barras y error del plomo muestreado en polen cuantificado en miligramos por kilogramo (mg/kg)

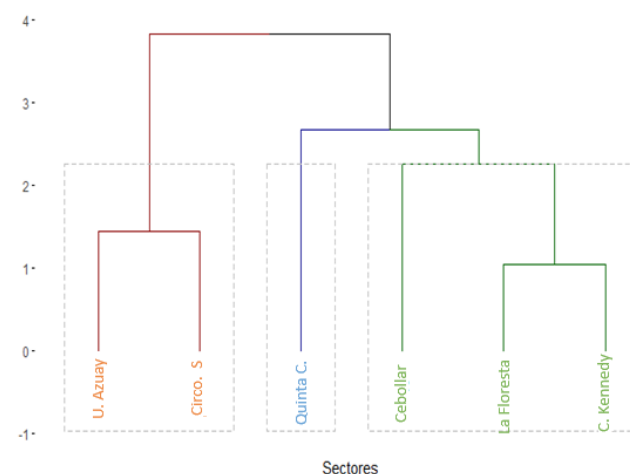
Por otra parte, en los niveles de plomo en polen se puede apreciar que el valor medio más alto se encuentra en el sector 5 “Circo Social” con una variabilidad del 68,6%, seguido de los sectores 4 y 6 “Universidad del Azuay” y “Quinta Chica” con un valor medio de 0,0567 mg/kg y variabilidades de 56,7% y 40,75% respectivamente, los sectores restantes poseen niveles muy cercanos al límite mínimo de detección de 0,03 mg/kg con variabilidades muy elevadas en los sectores de la “Floresta” y “Ciudadela Kennedy” (Zambrano, 2018).

Los resultados de los análisis muestran concentraciones de 0,02 y 0,12 mg/kg de plomo en polen (Zambrano, 2018). Por lo tanto, en el polen los niveles de plomo detectados son mayores que en la miel; a pesar de ello, su concentración no es mayor a 0,12 mg/kg bastante inferior al valor establecido por la FAO de 0,214 mg como consumo máximo diario de plomo (FAO y OMS, 2000). De acuerdo a la densidad de plomo encontrado una persona debería comer 3,73 kg de polen al día para exceder el límite máximo.

En cuanto a comparación con otros estudios, en Venezuela en el año 2014 en el estado de Mérida se reportan concentraciones de plomo entre 0,198 y 0,288 mg /kg (Gutiérrez et al., 2014), estos niveles detectados son bastante mayores a los reportados por Saénz (2017) en Durango México en el año 2007 con valores de entre  $33 \times 10^{-6}$  a  $71 \times 10^{-6}$  mg/kg, incluso inferiores a los de Cuenca Ecuador y Río Grand do Sul Brasil cuya variación está entre 0,012 y 0,018 mg/kg (Sattler et al., 2016), un poco más altos que los encontrados en el polen de Cuenca, cuyos valores son mucho menores a los encontrados en Quito

Ecuador (Cóndor, 2015), Venezuela e incluso Francia en donde se establece una media de 0,240 mg/kg (Lambert et al., 2012).

En la Figura 5, se muestra el resultado de un análisis clúster usando distancias de similitudes euclidianas para los indicadores de plomo en polen en función de sus características de variabilidad temporal para identificar el conjunto de sectores que poseen similitudes en su comportamiento. El análisis de conglomerados para este caso busca aglomerar el conjunto de sectores en grupos, de forma que los lugares de un mismo grupo sean similares según sus características en cuanto a la concentración de plomo en polen en los meses analizados.



**Figura 5.** Dendrograma por sectores de la concentración de plomo en polen

El propósito para el análisis de conglomerados en los sectores es de tratar de identificar una estructura natural en los mismos, explorar potenciales diseños conceptuales útiles que den cuenta de como se da el agrupamiento de las distintas zonas, a fin de formular posibles hipótesis de acuerdo con la representación y búsqueda de los grupos formados en este caso respecto a las concentraciones de plomo en aire (Díaz y Morales, 2012).

Se puede apreciar en el dendrograma que, según el corte estimado se forman tres grupos, “Floresta – Ciudadela Kennedy - Cebollar”, “Universidad del Azuay – Circo Social” y “Quinta Chica”, en los cuáles se puede considerar que los niveles de plomo en los meses muestreados tienen un comportamiento similar, esto puede deberse a su cercanía.

En cuanto a los resultados del análisis espacial la interpolación IDW ponderación de distancia inversa, trabaja con una sola combinación, la distancia máxima entre los vecinos más cercanos fue de 2,382 metros (distancia diagonal máxima), de acuerdo con la Figura 6. se puede observar la distribución espacial del plomo de acuerdo al método IDW. Los resultados corroboran mayores concentraciones de este metal en la zona norte y sus estaciones, que pueden repercutir sobre las concentraciones encontradas en el polen ponderación de distancia inversa.



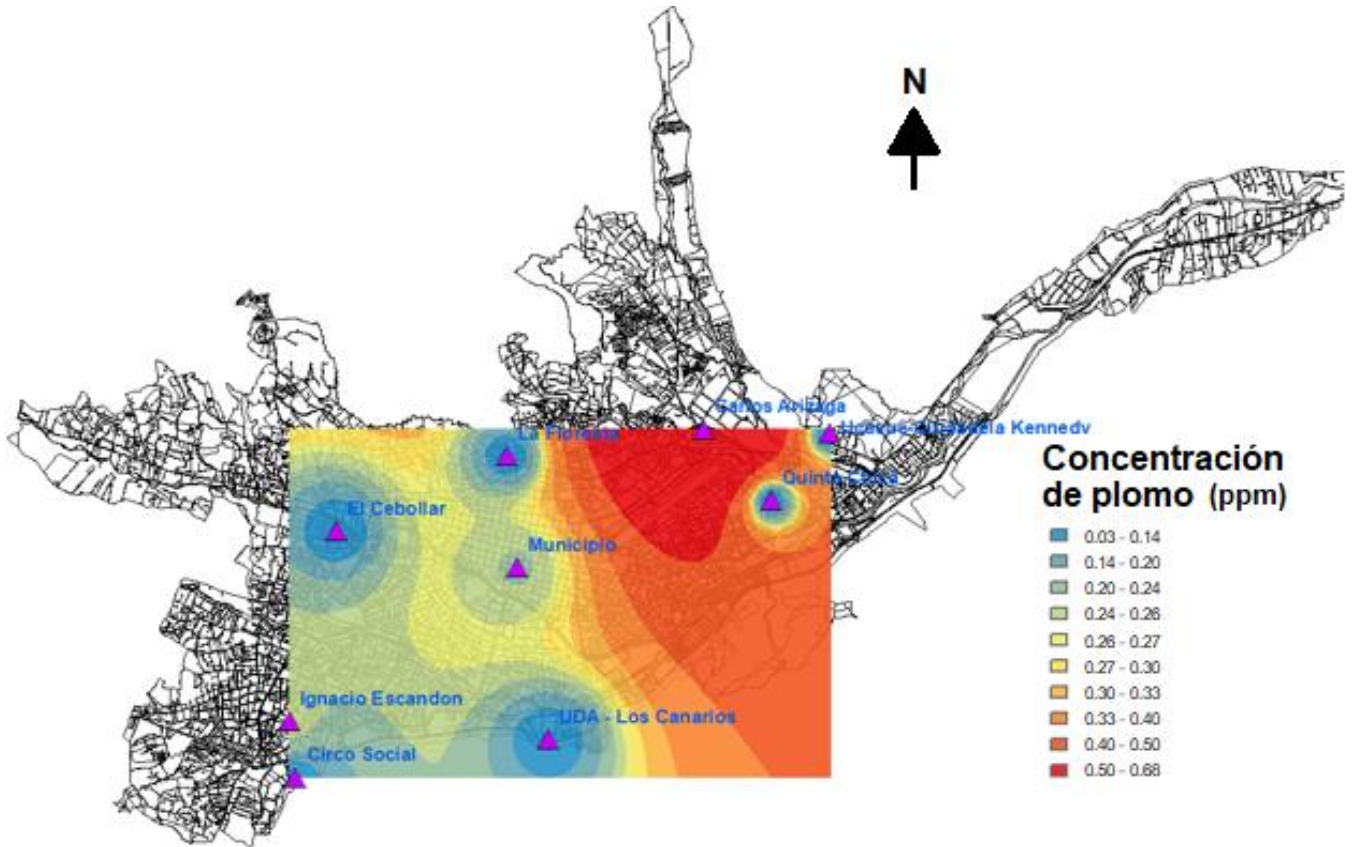


Figura 6. Distribución espacial del plomo en la ciudad de Cuenca

En la misma Figura 6 se muestra que la estación Carlos Arízaga (CA) es donde se encuentra la mayor concentración de plomo, esta estación se encuentra en el Parque Industrial de Cuenca y se dispersa en la zona noreste de la ciudad por las concentraciones mayores. Ya que según la distribución espacial es evidente la concentración de plomo distinta en los bioindicadores, el siguiente paso es analizar si existe una relación espacial entre los puntos de monitoreo, pues la medida de plomo en aire es indirecta y se basa en su concentración en el PM10.

Posteriormente, se realizaron tres análisis diferentes para encontrar relaciones entre las estaciones de monitoreo. En el primero se busca la relación entre todos los lugares que tienen mediciones de plomo, en el segundo análisis se busca una relación entre las que se localizan en la zona norte y el tercero se busca relación espacial entre las estaciones de la zona sur. En la Figura 7, se encuentran las estaciones de los tres análisis realizados. Los valores estadísticos obtenidos indican si los datos de análisis se encuentran dispersos, agrupados o tienen una distribución aleatoria.

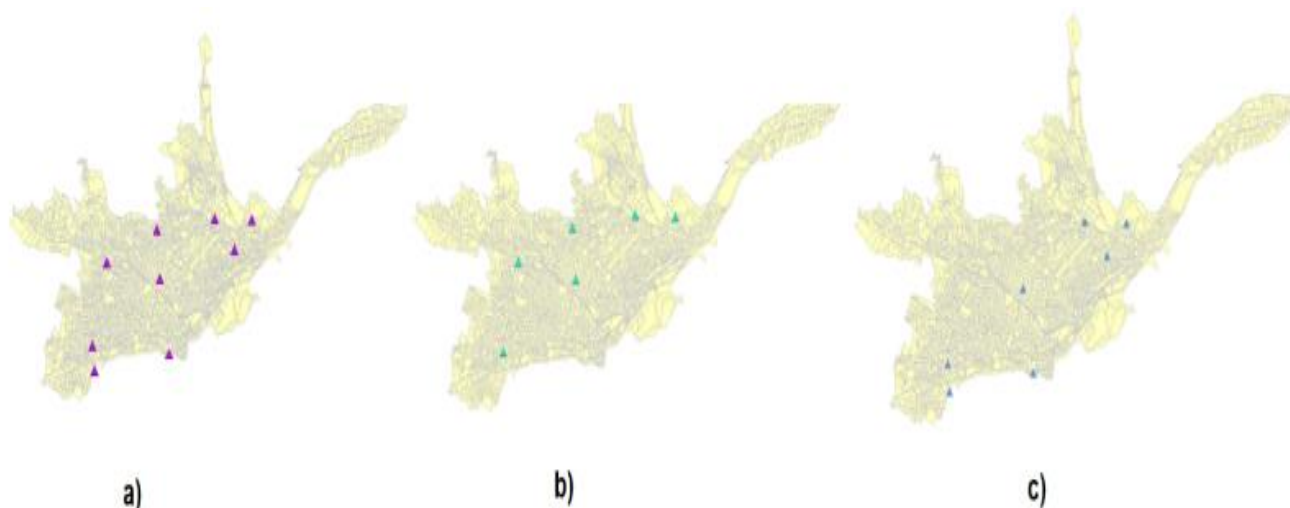
Para esto se trabajó con el Índice de Moran, previas las siguientes consideraciones estadísticas: la hipótesis nula, indica que los valores se dispersan de forma aleatoria. Si el valor de P es cercano a cero la posibilidad de que se cumpla la hipótesis nula es muy pequeña. El parámetro de Z representa las desviaciones estándar, si es próximo a cero no existe suficiente evidencia estadística como para

rechazar la hipótesis nula. Si P es muy pequeño los números que adquiere Z son muy elevados (ya sean positivos o negativos).

El I de Moran analiza patrones para saber si existe relación espacial. En la Tabla, se presenta un resumen de los valores estadísticos de cada análisis.

Tabla 2. Resumen de análisis de I de Moran

	Primer análisis	Segundo análisis	Tercer análisis
Índice de Moran	-0,460718	-0,330647	-0,498102
Variancia	0,060064	0,078457	0,085286
Puntuación Z	-1,369837	-0,0466429	-0,134907
P valor	0,170738	0,640908	0,256414
Conceptualización	Distancia Inversa	Distancia Inversa	Distancia Inversa
Método de distancia	Euclidiana	Euclidiana	Euclidiana
Distancia límite	2724,0231 metros	2917,7090 metros	2598,4642 metros



**Figura 7.** a) Análisis de todas las estaciones, b) análisis de las estaciones de la zona norte, c) análisis de las estaciones de la zona sur

Si los parámetros tienden a agruparse espacialmente (valores bajos con valores bajos; valores altos con valores altos) el índice de Moran será positivo. Si las medidas se dispersan (valores bajos cerca de valores altos) el índice de Moran será negativo.

Para cada una de las pruebas el valor del I de Moran es negativo, lo que indica que las estaciones analizadas no tienen una relación espacial, su comportamiento es aleatorio; los valores P en las pruebas son cercanos a cero, por tanto, existe una pequeña probabilidad de que se cumpla la hipótesis nula, que en este caso es: que exista relación espacial entre las variables de análisis. Esto puede deberse principalmente a la dispersión del plomo en la atmósfera y su relación con las fuentes de emisión, además del hecho ya indicado del radio de vuelo de las abejas.

Se aplicó el análisis de varianza ANOVA de una variable para comparar las concentraciones de plomo entre la miel y el polen utilizados como bioindicadores. Como resultado el valor P es inferior al nivel de significancia  $\alpha = 0,05$ , por tanto, se rechaza la hipótesis nula que afirma que las concentraciones de plomo en los tres grupos examinados son diferentes estadísticamente.

A pesar de ello, y a modo de análisis final se utilizó la prueba de YUEN para dos medias independientes como son los datos de concentración de plomo en el polen y en la miel. Como resultado se comprueba que el polen es un mejor bioindicador respecto a la miel, lo mismo que afirman Lambert et al. (2012)

#### 4. CONCLUSIONES

- Las concentraciones de plomo en miel y polen en la ciudad de Cuenca-Ecuador no sobrepasan los límites permisibles en alimentos ya que se encuentra en un rango entre 0,02 a 0,12 mg/kg en el polen y de 0,03 a 0,08 mg/kg en el caso de la miel.

- Los niveles de plomo encontrados en este estudio en el aire y medidos dentro de las partículas atmosféricas PM10 están en valores que van desde 0,021 a 0,72  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , siendo un valor insignificante de presencia de plomo en el ambiente y que no afecta a la salud del ecosistema y de las personas.
- Se concluye que el polen es mejor bioindicador, ya que los análisis demuestran mayores valores de concentración. Por tanto, se recomienda su manejo como indicador de la presencia de plomo y probablemente de otros metales pesados.
- Se recomienda monitorear la calidad ambiental en Cuenca mediante bioindicadores de diferentes contaminantes, pues se conoce que la bioacumulación, aporta datos que pueden contribuir a una gestión eficiente de la calidad del aire.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se desarrolló gracias al aporte económico del GAD Municipal de Cuenca a través de la Comisión de Gestión Ambiental CGA mediante convenio con la Universidad Católica de Cuenca, institución que aportó con los investigadores y los laboratorios necesarios para esta investigación.

#### REFERENCIAS

- Afik, O., Dag, A., Kerem, Z., & Shafir, S. (2006). Analyses of avocado (*Persea americana*) nectar properties and their perception by honey bees (*Apis mellifera*). *Journal of Chemical Ecology*, 32(9), 1949–1963. <https://doi.org/10.1007/s10886-006-9120-1>
- Agudelo-Calderón, C. A., Quiroz-Arcenales, L., García-Ubaque, J. C., Robledo-Martínez, R., & García-Ubaque, C. A. (2016). Evaluación de condiciones ambientales: Aire, agua y suelos en áreas de actividad minera en

- Boyacá, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 18(1), 50–60. <https://doi.org/10.15446/rsap.v18n1.55384>
- Aguilera, A., Bautist, F., Delgado, C., Gogichaichvili, A., Cejudo, R., Gutiérrez-Ruiz, M., Cenicerros-Gómez, A., & NR, L.-S. (2019). Spatial analysis of lead in the street dust of Mexico City: implications for human health. *Journal of Environmental Science and Public Health*, 03(02), 210–225. <https://doi.org/10.26502/jesph.96120058>
- Astudillo, A. (2014). Estudio de genotoxicidad del material particulado (PM 10) de la zona urbana del cantón Cuenca. [Tesis de maestría de Toxicología de la Universidad de Cuenca]. En repositorio institucional de la Universidad de Cuenca, Ecuador. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5467/1/tesis.pdf>
- Bedregal, P., Ubillús, M., Hurtado, J., & Mendoza, P. (2012). Evaluación de la contaminación atmosférica en puntos críticos de la ciudad de Lima y Callao, utilizando Tillandsia capillaris como biomonitor. *Informe Científico Tecnológico*, 12(1), 41–47. <https://revistas.ipen.gob.pe/ict/article/view/63>
- Bogdanov, S. (2006). Contaminants of bee products. *Apidologie*, 37(1), 1–18. <https://doi.org/10.1051/apido:2005043>
- Cáceres, I. (2014). Determinación de los niveles de plomo en miel de abeja por voltamperometría y su aplicación como bioindicador de contaminación ambiental, Arequipa-2012. [Tesis de licenciatura de la Universidad Católica Santa María], Arequipa, Perú. <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/4311>
- Cely, J., Siabato, W., Sánchez, A., & Rangel, A. (2002). Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental. *Revista Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 7(2), 31–38. <https://doi.org/10.14483/23448393.2815>
- Colin, T., Meikle, W. G., Paten, A. M., & Barron, A. B. (2019). Long-term dynamics of honey bee colonies following exposure to chemical stress. *Science of the Total Environment*, 677, 660–670. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.402>
- Cóndor, F. (2015). Determinación de metales pesados en miel de abeja para su evaluación como indicador ambiental en zonas contaminadas, en la provincia de Pichincha-Ecuador. [Tesis de Ingeniero en Biotecnología de Universidad de las Fuerzas Armadas. Quito, Ecuador]. Repositorio de la ESPE. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/10886>
- Conti, M. E., & Botrè, F. (2018). Honeybees and their products as potential bioindicators of heavy metals contamination genetic and metabolic profiling of elite athletes view project monitoring and evaluation of the spatial variability of PM chemical components through spatially resolved. *Environmental Monitoring and Assessment*, 667, 267–282. <https://doi.org/10.1023/A:1010719107006>
- Cortez-Lugo, M., Téllez-Rojo, M., Gómez-Dantés, H., & Hernández-Avila, M. (2003). Tendencia de los niveles de plomo en la atmósfera de la zona metropolitana de la Ciudad de México. 1988-1998. *Salud Pública de México*, 45(2), 196–202. <https://doi.org/10.1590/s0036-36342003000800005>
- Davis, J. M., & Grant, L. D. (2003). Experiencias de la instauración de normas relativas al contenido de plomo en aire y el agua, en los Estados Unidos de América. *Salud Pública de México*, 45(2), 237–243.
- Develliers, J. (2002). *Honey bees: estimating the environmental impact of chemicals*. En J. Devellers & M. Pham-Delegue (Eds.), Book (p. 347). Taylor & Francis. <http://www.amazon.co.uk/Honey-Bees-Estimating-Environmental-Chemicals/dp/0415275180>
- Díaz, L., & Morales, M. (2012). *Análisis Estadístico de Datos Multivariados* (Universidad Nacional de Colombia). [https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79916/Análisis Estadístico de Datos Multivariados 9789587751062.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/79916/Análisis%20Estadístico%20de%20Datos%20Multivariados%209789587751062.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- EMOV. (2015). Informe de calidad del aire de Cuenca 2015. [https://www.emov.gob.ec/sites/default/files/Calidad%20del%20Aire%20final%202015\\_0.pdf](https://www.emov.gob.ec/sites/default/files/Calidad%20del%20Aire%20final%202015_0.pdf)
- EMOV EP. (2014). Informe Calidad del Aire 2014 I Red de Monitoreo de Calidad de Aire - EMOV EP. [https://www.researchgate.net/publication/280320700\\_Informe de la calidad del aire de Cuenca Ano 2014 Cuenca - Ecuador](https://www.researchgate.net/publication/280320700_Informe_de_la_calidad_del_aire_de_Cuenca_Ano_2014_Cuenca_-_Ecuador)
- FAO, & OMS. (2000). Codex Alimentarius. Proyecto de norma revisado para la miel. (Número Apéndice 1). [ftp://ftp.fao.org/codex/Meetings/CCS/ccs7/S00\\_03s.pdf](ftp://ftp.fao.org/codex/Meetings/CCS/ccs7/S00_03s.pdf)
- FAO, & OMS. (2015). CODEX ALIMENTARIUS. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/es/>
- FLACSO, MAE, & PNUMA. (2008). Estado del aire en el Ecuador. En G. Fontaine, I. Narváez, & P. Cisneros (Eds.), Informe sobre el estado del medio ambiente (FLACSO, p. 105). Observatorio Socio Ambiental de la FLACSO. [http://www.pnuma.org/deat1/pdf/Ecuador/pdf/04\\_Capitulo\\_2\\_Estado\\_del\\_aire.pdf](http://www.pnuma.org/deat1/pdf/Ecuador/pdf/04_Capitulo_2_Estado_del_aire.pdf)
- Freije, A. M. (2015). Heavy metal, trace element and petroleum hydrocarbon pollution in the Arabian Gulf: Review. *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 17(1), 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.jaubas.2014.02.001>
- Furr, K. (1996). *Analytical methods for atomic absorption spectroscopy*. The Perkin-Elmer Corporation.
- Gallardo, O. (2007). *Las abejas melíferas biomonitores de metales pesados en el aire de Torreón y sitios aledaños* [Tesis de licenciatura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro]. Repositorio universitario UAAAN. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/42733>
- Gutiérrez, I. (2016). *Empleo de Apis mellifera como bioindicador de la contaminación de metales pesados en el término municipal de Córdoba*. [Tesis Doctoral Universidad de Córdoba]. <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/13253/2016000001367.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gutiérrez, L., Bonive, F., Paz, L., Vielma, J., Carrero, P. E., Delgado, Y., Cerinza, J. P., & Vit, P. (2014). Uso del polen apícola como bioindicador ambiental en la determinación de plomo en el municipio Antonio Pinto Salinas, del estado Mérida-Venezuela. *Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel*, 45, 191–210.

- INEC. (2011). Resultados del censo 2010 en la provincia del Azuay. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/azuay.pdf>
- Kimura, M., Saito, K., & Motoda, H. (2009). Blocking links to minimize contamination spread in a social network. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, 3(2), 1–23. <https://doi.org/10.1145/1514888.1514892>
- Kulike, H., & Voget, M. (1983). Honey as a biological indicator of lead and cadmium air pollution. *Allg. dt. Imkerztg*, 17(10), 323–324.
- Kumar, A., Kumar, A., Cabral-Pinto, M., Chaturvedi, A. K., Shabnam, A. A., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Gupta, D. K., Malyan, S. K., Kumar, S. S., Khan, S. A., & Yadav, K. K. (2020). Lead toxicity: Health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph17072179>
- Lambert, O., Piroux, M., Puyo, S., Thorin, C., Larhantec, M., Delbac, F., & Pouliquen, H. (2012). Bees, honey and pollen as sentinels for lead environmental contamination. *Environmental Pollution*, 170, 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.012>
- Labanda, P., & Fernández, C. (2012). Saturnismo, a propósito de un caso. *Medicina y seguridad en el trabajo*, 59, 168–173. <https://dx.doi.org/10.4321/S0465546X2012000200009>
- Lozano, A., Usero, J., Vanderlinden, E., Raez, J., Contreras, J., Navarrete, B., & El Bakouri, H. (2010). Optimization of the design of air quality monitoring networks and its application to NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in Jaen, Spain. *Microchemical Journal*, 96(2), 406–411. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2010.07.002>
- M. Van der Steen, J. J., de Kraker, J., & Grotenhuis, T. (2015). Assessment of the Potential of Honeybees (*Apis mellifera* L.) in Biomonitoring of Air Pollution by Cadmium, Lead and Vanadium. *Journal of Environmental Protection*, 6, 96–102. <https://doi.org/10.4236/jep.2015.62011>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador, OPS, & OMS. (2012). Lineamientos Generales para Establecer Políticas de la Calidad del Aire en Ecuador.
- Mohammadi Aghamirlou, H., Khadem, M., Rahmani, A., Sadeghian, M., Mahvi, A. H., Akbarzadeh, A., & Nazmara, S. (2015). Heavy metals determination in honey samples using inductively coupled plasma-optical emission spectrometry. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0189-8>
- Moreno, A. (2013). Población y polución atmosférica intraurbana por dióxido de nitrógeno en Madrid: Análisis desde la justicia ambiental basado en sistemas de información geográfica. *Cuadernos Geográficos*, 52(1), 84–107.
- Noriega Rivera, P., Medici, A., Murillo, A., Bedón, J., Haro, F., & Galecio, G. (2008). Estudio de la concentración de cadmio y plomo en el aire de la ciudad de Quito, empleando briofitas como biomonitores. *La Granja*, 8(2), 17. <https://doi.org/10.17163/lgr.n8.2008.03>
- Oviedo, J., Bossano, F., Estrella, R., Torres-Garcés, L., Gaybor, M., & Calderón, M. (2000). Monitoreo de la contaminación ambiental en el Ecuador. *VozAndes*, 13(1), 7–13.
- Parikh, G., Rawtani, D., & Khatri, N. (2021). Insects as an Indicator for Environmental Pollution. *Environmental Claims Journal*, 33(2), 161–181. <https://doi.org/10.1080/10406026.2020.1780698>
- PNUMA. (2010). Analisis de flujo del comercio y revisión de prácticas de manejo ambientalmente racionales de productos conteniendo cadmio, plomo y mercurio en América Latina y el Caribe (Oficina re). <file:///C:/Users/UCACUE/Downloads/UNEP%20Year%20Book%202010-2010917-spanish.pdf>
- Román, D. A., Rivera, L., Morales, T., Ávila, J., & Corté, P. (2002). Determination of trace elements in environmental and biological samples using improved sample introduction in flame atomic absorption spectrometry (Hhpn-Aas; Hhpn-Ff-Aas). *Anal. Chem*, 83(4), 327–341. <https://doi.org/10.1080/0306731000076869>
- Ruiz-Jiménez, J., Luque-García, J. L., & Luque De Castro, M. D. (2003). Dynamic ultrasound-assisted extraction of cadmium and lead from plants prior to electrothermal atomic absorption spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 480(2), 231–237. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(02\)01658-6](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(02)01658-6)
- Ruiz, J. A., Gutiérrez, M., & Porrini, C. (2013). *Biomonitoring of bees as bioindicators*. *Bee World*, 90(3), 61–63. <https://doi.org/10.1080/0005772x.2013.11417545>
- Ryckowski, J., & Borowiecki, T. (1993). Double impregnation-application of a preparation method for well dispersed and high metal loading Ni/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts. *Kinet. Catal. Lett*, 49(1), 2157. <https://doi.org/10.1007/BF02084038>
- Saéñz, M. (2017). *Determinación de metales pesados y pesticidas en miel de abeja del norte del estado de Durango, México*. [Tesis de maestría en Gestión Ambiental]. Instituto Politécnico Nacional IPN. Repositorio digital. <http://repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/24057>
- Sajid, A. H., Rudra, R. P., & Parkin, G. (2013). Systematic evaluation of kriging and inverse distance weighting methods for spatial analysis of soil bulk density. *Canadian Biosystems Engineering*, 55(1983), 1–13. <https://doi.org/10.7451/CBE.2013.55.1.1>
- Sattler, J. A. G., De-Melo, A. A. M., do Nascimento, K. S., de Melo, I. L. P., Mancini-Filho, J., Sattler, A., & de Almeida-Muradian, L. B. (2016). Essential minerals and inorganic contaminants (Barium, cadmium, lithium, lead and vanadium) in dried bee pollen produced in Rio Grande do Sul State, Brazil. *Food Science and Technology*, 36(3), 505–509. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.0029>
- Sbarato, V., Sbarato, D., Basan, R., Manzo, P., Ortega, J. E., Campos, M., & Salort, M. R. (2000). *Análisis y caracterización del material particulado atmosférico*. [Teis de Maestría en Gestión para la Integración Regional y Centro de Información y Documentación Regional, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina]

[http://www.monitoreoambiental.com/download/16.Análisis del Material Particulado-paper24.pdf](http://www.monitoreoambiental.com/download/16.Análisis%20del%20Material%20Particulado-paper24.pdf)

- Siabato, W., & Guzmán-Manrique, J. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 1–22. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.76919>
- Taha, E. K. A. (2015). Chemical composition and amounts of mineral elements in honeybee-collected pollen in relation to botanical origin. *Journal of Apicultural Science*, 59(1), 75–81. <https://doi.org/10.1515/jas-2015-0008>
- Tello, M. de los A. (2018). Determinación de las concentraciones de plomo y cadmio en suelos de sectores aledaños al parque industrial de la ciudad de Cuenca. *Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento*, 2, 560–577. <https://doi.org/10.26820/recimundo/2.esp.2018.560-577>
- Thompson, M., Walton, S. J., & Wood, S. J. (1979). Statistical appraisal of interference effects in the determination of trace elements by atomic-absorption spectrophotometry in applied geochemistry. *The Analyst*, 104(1237), 299–312. <https://doi.org/10.1039/an9790400299>
- Vullo, D. (2003). Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. *Química Viva*, 2(3), 93–104.
- Zambrano, Y. (2018). *Determinación de la concentración de plomo presente en miel de abejas y en polen como bioindicador de contaminación atmosférica dentro del Cantón Cuenca*. [Tesis de Ingeniera Ambiental de la Universidad Católica de Cuenca]. Repositorio de la Universidad Católica de Cuenca. <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/7954>

## BIBLIOGRAFÍAS

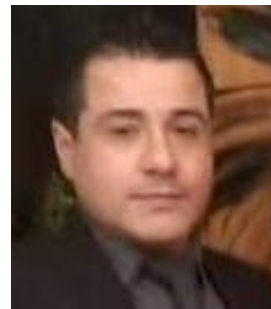


**Paula, Cordero**, Bióloga por la Universidad del Azuay, con maestría en Ciencias Biológicas, Biología Ambiental con orientación en la Restauración Ecológica en la UNAM México. Docente investigadora de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica de Cuenca. Participación en proyectos de

investigación: Determinación de la Concentración de plomo presente en la miel de abeja y plomo como bioindicador de contaminación atmosférica. Uso de diatomeas como bioindicadoras de calidad de agua en la provincia del Azuay. Vulnerabilidad de Poblaciones bajo Escenarios Extremos VULPES. Biodeterioro de Ingapirca. Cambios de uso de suelo y cambio climático en la cuenca del Tomebamba.



**Yuliana, Zambrano**, Ingeniera Ambiental por la Universidad Católica de Cuenca participó en el proyecto “Determinación de la Concentración de plomo presente en la miel de abeja y plomo como bioindicador de contaminación atmosférica en el Cantón Cuenca”, dentro de un convenio firmado entre la Comisión de Gestión Ambiental del Cantón Cuenca CGA y la UCACUE, el mismo que le permitió desarrollar su tesis de graduación y ganar el primer premio del II Congreso Estudiantil Interdisciplinario de la Universidad Agraria del Ecuador, organizado como incentivo a los trabajos innovadores en las áreas científicas aplicables a nivel nacional e Internacional.



**Diego, Heras**, Ingeniero Electrónico con master universitario en Ingeniería Computacional y Matemáticas, docente de la Universidad Católica de Cuenca en las ramas de matemática y estadística dentro de la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción, experto en estadística y manejo de datos cuantitativos y cualitativos. Colaborador de proyectos de investigación: Datos hidrológicos de las Cuenca del Pacífico Ecuador.



**Carlos, Matovelle**, Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Valencia. Especialista en Recursos Hídricos y Tratamiento de Agua. Candidato a Doctor por el Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga. Profesor por 9 años de la Carrera de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica de Cuenca, Coordinador del HYDROLAB del Centro de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología –CIITT. Como investigador ha sido Director de Proyectos Institucionales e Interinstitucionales que han resultado en publicaciones indexadas y ponencias en varios eventos científicos. Coordinador del Grupo de Investigación en Geociencias, Ambiente y Recursos Naturales adscrito al Centro de Investigación de la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción.



# Dispensador Inteligente de Frutos Secos para Producción Personalizada en la Industria 4.0

Castro-Martin, Ana Pamela<sup>1,\*</sup> ; Silva-Naranjo, Patricio<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, Ambato, Ecuador

**Resumen:** Los sistemas tradicionales de producción y manufactura se basan en una producción en masa o en lotes donde los productos poseen las mismas características para todos los clientes. Ante los cambios en las tendencias tecnológicas y requerimientos de los clientes, surge la producción personalizada, en la cual el cliente es una fuente de información para la línea de fabricación inteligente. En el presente trabajo, se diseña un dispensador inteligente de frutos secos con el cual los clientes puedan realizar el pedido seleccionando la cantidad en gramos de cuatro tipos de frutos secos. En el sistema se implementa una arquitectura de Internet de las Cosas (IoT) compuesta de tres capas: dispositivos, procesamiento y servicios en la nube. La capa de dispositivos utiliza sensores, actuadores, y mecanismos para la dispensación. La capa de procesamiento de datos en la niebla se realiza mediante las tarjetas electrónicas Arduino Mega y ESP8266. En la capa de servicios en la nube, se desarrolló las interfaces Web para clientes y administradores, estas interactúan permanentemente con una base de datos MySQL. En las pruebas se obtuvo un tiempo máximo de retardo de actualización de datos de 1,3 segundos, el tiempo promedio de llegada de un nuevo pedido fue de 1,7 segundos y un error promedio de 0.8 gramos en la dispensación. El dispensador posee características como flexibilidad al preparar el producto, conectividad, interacción constante con los usuarios, y actualizaciones de estado del sistema en tiempo real que lo integran a las tecnologías usadas en la Industria 4.0.

**Palabras clave:** Industria 4.0, dispensador inteligente, producción inteligente, producción personalizada, Internet de las cosas

## Smart Nut Dispenser for Customized Production in Industry 4.0

**Abstract:** Traditional production and manufacturing systems are based on mass or batch production where products have the same characteristics for all customers. Given the changes in technology trends and customer requirements, personalized production arises, in which the customer is a source of information for the intelligent manufacturing line. In the present work, an intelligent dispenser of mixed nuts is designed in which customers can place the order by selecting the quantity in grams of four types of nuts. The system implements an architecture of Internet of the Things (IoT) composed of three layers: devices, processing, and cloud services. The device layer uses sensors, actuators, and mechanisms in the dispensing system. The processing layer is done by fog computing with the Arduino Mega and ESP8266 electronic cards. In the cloud services layer, the Web interfaces for clients and administrators were developed, these interact permanently with a MySQL database. In the tests, the maximum data update delay time was 1.3 seconds, the average arrival time of a new order was 1.7 seconds, and an average error was 0.8 grams in dispensing. The smart dispenser has features that integrate it with the technologies used in Industry 4.0, such as: flexibility when preparing the product, connectivity, constant interaction with users, and real-time system status updates.

**Keywords:** Industry 4.0, smart dispenser, smart production, customized production, Internet of Things

### 1. INTRODUCCIÓN

La Industria 4.0 conocida como la cuarta revolución industrial es un modelo que está concentrado en la autoorganización, autogestión de sistemas productivos automatizados, nuevas tecnologías digitales y el uso de Internet (Sukhodolov, 2019). La Cuarta Revolución Industrial es actualmente uno de los

caminos hacia el desarrollo económico que trae cambios profundos de modernización para los sectores productivos en la economía nacional (Popkova, et al., 2019). La Industria 4.0 sumerge a las empresas en una mejora continua de sus procesos e innovación por medio de la tecnología y la conectividad entre los diferentes elementos que componen una industria. Esta conectividad permite el intercambio de datos

\*ap.castro@uta.edu.ec

Recibido: 03/01/2023

Aceptado: 31/05/2023

Publicado en línea: 14/11/2022

10.33333/tp.vol52n2.02

CC 4.0

crudos, datos procesados e información útil que sirve para las decisiones con base en análisis computarizados, dando lugar a la incorporación de sistemas inteligentes, fábricas más eficientes donde se automatizan procesos de fabricación, y esto es posible gracias al IoT y el concepto de hiperconectividad (Sánchez, 2018).

El aumento de la competencia industrial, la demanda del mercado y los costos de producción son aspectos que los emprendedores deben enfrentarse para iniciar con éxito un negocio. La fabricación inteligente y personalización de productos son estrategias que países como Corea del Sur, Dinamarca, Estados Unidos y Reino Unido utilizan para mantenerse como líderes en el mercado competitivo global (Del Val Román, 2016). Sin embargo, América Latina está influenciada por el marco económico interno de cada país, provocando poca iniciativa para reconfigurar los procesos en las empresas, olvidando que existen más herramientas que impulsan la transformación industrial, como la aplicación de nuevas tecnologías, la creatividad comercial y la investigación (Del Val Román, 2016).

En el Ecuador, la Industria 4.0 obtuvo mayor relevancia desde el año 2018, cuando el Ministerio de Telecomunicaciones presentó el libro Blanco de la Sociedad de la Información y el Conocimiento donde establece 5 ejes de desarrollo: infraestructura y conectividad, gobierno electrónico, inclusión y habilidades digitales, seguridad de la información y protección de datos, economía digital y tecnologías emergentes. Estos ejes de acción se centran en la transformación digital de los distintos sectores productivos del país (MINTEL, 2018). Sin embargo, en la mayoría de los sectores industriales en el Ecuador la adopción de nuevas tecnologías acorde a la Industria 4.0 es lenta. Según el estudio, "Readiness for the Future of Production", realizado en 2018, Ecuador tiene una calificación de 89/100 en la evaluación de la preparación para futuro de la producción, lo que indica un déficit en la generación Innovación y Tecnología en el país (Martin et al., 2018). Debido a esto, el gobierno de turno posee una agenda de actividades para que los sectores productivos transformen sus procesos y servicios haciéndolos más eficientes y con valor agregado, por medio del uso de nuevas tecnologías; pero muchas veces la innovación tecnológica es un paso que las empresas se resisten a darlo (Hernández, 2019; Fenech y Perkins, 2019; Carrera, 2020).

Los avances tecnológicos y las transformaciones en los mercados de la era moderna trajeron paradigmas de producción y entre los más desafiantes está la producción personalizada, la cual integra los requisitos del cliente en el diseño y configuración del producto; contrariamente a la producción en masa donde los productos tienen un enfoque basado en restricciones (Mladineo et al., 2022). Las empresas tienen el reto de añadir productos y servicios innovadores para atraer a los compradores y continuar siendo competitivos en el mercado, por lo cual, la personalización es una buena respuesta ante la demanda de los consumidores (Del Val Román, 2016). En el año 2020, Ecuador estableció como objetivo que las ciudades tradicionales deben dar el paso hacia el concepto de ciudades inteligentes y sostenibles, para que el país pueda

mejorar su competitividad en el mercado local e internacional por medio del uso de nuevas tecnologías (MINTEL, 2020).

En Ecuador, la producción personalizada es poco automatizada, y en su mayoría de manera artesanal. Sin embargo, la fabricación en ciertos sectores productivos se ha logrado gracias a la adquisición de maquinaria automatizada para la fabricación. Por ejemplo, en el trabajo realizado por Tipaz-Portilla (2019) se realiza un análisis sobre el cambio de los procesos de fabricación tradicionales en nuevos modelos de negocios con fabricación digital utilizando sistemas CAD, CAE Y CAM en tecnologías de fabricación como: impresión 3D, corte y grabado con láser, corte vinil, enrutador CNC para madera. Estas tecnologías son accesibles en Ecuador, lo que permite el diseño, desarrollo e innovación de productos desarrollados como prototipos. Coloma-Sevilla (2017) presenta la personalización de vajillas donde los clientes como chefs, y propietarios de restaurantes desean brindar una experiencia única en la presentación de los platos en sus establecimientos. Los clientes especifican características de fabricación como tamaño, color, material, forma y textura, pero la manufactura de vajillas personalizadas es un trabajo manual y poco tecnificado. En investigaciones realizadas en Ecuador, los dispensadores inteligentes están enfocados en aplicaciones como alimentadores para mascotas (Alvarez et al., 2021) y dispensador de medicamentos (Encalada-Grijalva et al., 2019; Alarcón, 2022), estos tienen características como comunicación inalámbrica, generación de alertas automáticas y monitoreo constante del sistema.

El mercado actual de venta de alimentos a granel comercializa los productos por cantidades estandarizadas en libras o kilogramos. Actualmente, no existen dispensadores de alimentos al peso o frutos secos que permita al cliente personalizar el pedido a nivel de gramos mediante un medio digital como dispositivo móvil o un computador. Los dispensadores de frutos secos o de cereales del mercado son manuales y no presentan características de automatización e hiperconectividad IoT de la Industria 4.0.

El aporte del presente trabajo es el diseño de un dispensador de frutos secos con características que lo introducen en la Industria 4.0 con base en los conceptos de producción personalizada. Se presenta una arquitectura IoT de tres capas: de dispositivos, de procesamiento y de servicios en la nube; que posibilita la interconexión de los componentes físicos al entorno virtual donde el cliente puede realizar un pedido personalizado.

En la sección 2 de este artículo, se presenta la revisión del estado del arte de la producción personalizada y un análisis de arquitecturas IoT desarrolladas por autores en aplicaciones de diversas áreas para establecer las principales características de un sistema que pueda ser implementado en un dispensador inteligente de frutos secos. En la sección 3, se propone una arquitectura IoT detallando los aspectos que definen cada capa, posteriormente se describe la implementación del dispensador inteligente de frutos secos detallando los componentes electrónicos, físicos, desarrollo de software y protocolos de comunicación utilizados para dar la inteligencia al sistema. La sección 4 contiene los resultados obtenidos de



la implementación del dispensador que permite la personalización de pedidos. En la sección 5, se presenta las conclusiones.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Fábricas inteligentes y producción personalizada

La producción industrial inteligente, el uso de computadores rápidos, sensores y máquinas inteligentes, almacenamiento y transmisión de datos; son características de la Industria 4.0 que permiten procesos industriales eficaces, productos personalizados e individualizados a costos razonables (Vaidya et al., 2018). La transformación digital en las empresas provoca la transformación de fábricas tradicionales a fábricas inteligentes donde los procesos de producción e interacción con los clientes se realizan utilizando tecnologías IoT.

Las empresas que implementan fábricas inteligentes tienen la posibilidad de generar mayor crecimiento en las ventas, alta aceptación en el mercado y mayor rentabilidad. Además, la transformación exitosa de fábricas comunes en inteligentes trae beneficios como reducción de los costos de producción, aumento de la calidad y flexibilidad, y reducción del tiempo de comercialización (Sjödín et al., 2018). Al hablar de fábricas inteligentes es necesario introducir el concepto de líneas de producción inteligente que, a diferencia de la producción tradicional, está conectada en forma continua el espacio físico con el ciberespacio por medio de las tecnologías como IoT, Big Data, e Internet móvil posibilitando el cambio de la producción masiva a la producción personalizada (Zhang et al., 2017). Para la inmersión de las empresas a la Industria 4.0 es necesario producir equipos y diseñar productos industriales que permitan una reorientación de las líneas de producción y procesos (Popkova et al., 2019).

Varios autores han trabajado en aplicaciones de producción personalizada y fabricación inteligente. Wang et al. (2018) en su trabajo exponen como aplicación de consumo personalizado el empaque de dulces, que realiza un diseño de fábrica inteligente con una arquitectura de tres capas: dispositivos físicos, nube privada, y terminales de clientes y redes. El sistema trabaja con un esquema de interacción y negociación entre capas para una reconfiguración dinámica que permite producción híbrida de productos de varios tipos. Barni et al. (2018) presentan una infraestructura de fábrica digital aplicada al diseño y construcción de muebles personalizados. Se diseña un sistema integral para la fabricación de muebles personalizados a través de la integración de software bajo una infraestructura diseño y producción que sea capaz de responder a la alta variabilidad del mercado. La conexión entre los requerimientos de los clientes en la tienda, con la fábrica de muebles; se realiza por medio de los servicios en la nube con operaciones de Gateway centralizado que gestiona los módulos de software para la fabricación inteligente. Una fábrica inteligente reconfigurable para el empaque de medicinas es presentada por Wan et al. (2018), la cual utiliza una arquitectura de tres capas: de percepción, implementación y ejecución. En la capa de percepción se adquieren los requerimientos del mercado en una base SQL y se programa el plan de producción que pueden

ser reconfigurables según la demanda de medicamentos. El sistema muestra gran flexibilidad y logra una reconfiguración útil para el desarrollo de la industria farmacéutica del futuro.

### 2.2 Análisis de Arquitecturas Iot

El amplio mundo de IoT presenta gran variedad de comunicaciones, redes, sensores, módulos y computación. Sin embargo, carece de una arquitectura IoT o modelo de referencia estandarizado para que los emprendedores puedan adoptar al momento de renovar sus servicios (Madakam et al., 2015). A fin de seleccionar una adecuada arquitectura del sistema se realizó un análisis de las arquitecturas IoT propuestas por varios autores.

Mocnej et al. (2018) presentan una arquitectura de tres bloques funcionales: dispositivo final, puerta de enlace y nube; esta arquitectura es utilizada como solución de optimización de recursos de componentes IoT. El bloque del dispositivo final se describe con tres capas: abstracción de conectividad para la conexión del dispositivo a la red, servicios del dispositivo con módulos que optimizan los recursos del dispositivo, y aplicación personalizada con capacidad de procesamiento para tareas dedicadas. El bloque de la puerta de enlace cumple con funciones de conectividad, gestión de dispositivos finales y gestión de datos. La nube es usada como administradora que permite gestionar y configurar los dispositivos sin tener que acceder a la puerta de enlace de cada uno de ellos.

Germani et al. (2019) muestran en su investigación el diseño de una arquitectura para monitoreo continuo de ganado utilizando tecnología LPWAN. La arquitectura IoT se compone por dispositivos finales que recolectan datos, tienen la posibilidad de procesar los datos o no hacerlo y enviarlos a uno o más puertos de enlaces. La siguiente etapa de la arquitectura es representada por las puertas de enlace encargadas de comunicarse con el servidor por medio de una conexión TCP/IP. La última parte de la arquitectura se compone del servidor de aplicaciones que proporciona interfaces de programación de aplicaciones para recibir y mostrar los datos provenientes de las puertas de enlace para visualización en interfaces de gráficas de usuario.

Rahimi et al. (2018) proponen una arquitectura basada en 5G y nuevas tecnologías emergentes compuesta de 8 capas. La capa de dispositivos físicos conformada por sensores, actuadores y controladores con capacidad de procesamiento y bajo consumo energético. La capa de comunicación tiene dos subcapas: comunicación de dispositivo a dispositivo con protocolos de red inalámbricos y la subcapa de conectividad donde los dispositivos se conectan a un centro de comunicación que envían y analizan los datos. La capa de cómputo en el borde o en la niebla (Edge - Fog), se realiza procesamiento y toma de decisiones en el borde. La capa de almacenamiento de datos posee unidades de almacenamiento para datos procesados y no procesados. La capa de administración de servicio que realiza la administración de la red, el cómputo en la nube y análisis de datos. La capa de aplicación donde se realiza el análisis del mercado e inteligencia de negocios. La capa de procesamiento y colaboración donde personas pueden colaborar para el

desarrollo de IoT. Capa de Seguridad está encargada de dar seguridad a todas las capas de la arquitectura ante ciberataques.

Basado en un análisis de seguridad, Almrezeq et al. (2020) establecen una arquitectura de seis capas para el desarrollo de soluciones IoT. En la capa de percepción se encuentran los dispositivos y sensores que recolectan datos. La capa de red considerada el corazón de la arquitectura IoT, se encarga del enrutamiento, el flujo de datos, la transmisión de datos a través de un conjunto de protocolos y el movimiento seguro de datos desde la capa de percepción a la capa de soporte. La capa de soporte cumple funciones de almacenamiento para la gestión de datos y servicios de niveles inferiores, permitiendo la computación en la nube. La capa de aplicación es responsable del uso eficientes de los datos recopilados y describe aplicaciones IoT como casas inteligentes, ciudades inteligentes, rastreo de animales entre otras aplicaciones. La capa de procesamiento realiza tareas de: análisis, limpieza, transmisión de datos y generación de reportes. La capa empresarial administra los servicios y actividades del sistema IoT basado en los datos recibidos de la capa de aplicación.

En el trabajo presentado por Dineva y Atanasova (2021), se diseña una arquitectura IoT basada en Amazon Web Services, utiliza sistemas ciberfísicos, equipos de IoT y servicios nativos en la nube. Posee herramientas de cómputo, almacenamiento en bases de datos, análisis, red, dispositivos móviles, desarrollo IoT, aplicaciones entre otros. Los autores de este trabajo destacan la importancia de diseñar arquitecturas IoT flexibles que satisfagan las necesidades la diversidad de clientes que requieren los servicios. Los dispositivos utilizados en esta arquitectura trabajan bajo el concepto de “Edge”, computo en el límite que pueden operar con dispositivos locales aun si se pierde la conexión con la nube.

Una vez analizadas las arquitecturas IoT de varios autores, se determina que difieren en número de capas y características. La arquitectura IoT varían en función del alcance y el tipo de proyecto o industria en la que se lo implemente, además las arquitecturas IoT dependen sustancialmente de la necesidad de cómputo de los sensores y microcontroladores y del tipo de dispositivos disponibles para el desarrollo del prototipo, donde el presupuesto puede ser un limitante. Por ejemplo, en proyectos que requieran sensores que puedan tomar sus propias decisiones y emitir datos procesados y validados a su salida, sería muy conveniente armar una arquitectura con Edge Computing (Yousefpour et al., 2019). Por otra parte, si no se dispone del presupuesto necesario para adquirir los mencionados sensores, conviene utilizar un tipo de procesamiento Fog Computing, el cual permite utilizar sensores de bajo costo y los dispositivos que se encargan de la toma de decisiones y procesamiento de datos utilizando microcontroladores o miniordenadores conectados directamente a los sensores. Por último, si se cuenta con una conectividad a Internet permanentemente confiable y estable, se podría optar por procesar y validar los datos en el servidor alojado en la nube, es decir utilizando Cloud Computing; dependiendo de las necesidades del prototipo a desarrollar, se puede adoptar cualquiera de estos tres tipos de procesamiento de datos mencionados, o a su vez, una combinación de ellos

para aumentar la seguridad y filtro de datos tomando en cuenta la menor latencia posible. (Cao et al., 2020).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 *Dispensador Inteligente*

Para el diseño físico de sistema de dispersión, se seleccionaron 3 categorías de frutos secos según el tamaño del grano: fino, medio y grueso. Se construyó un dispensador de frutos secos inteligente con cuatro contenedores que almacenan distintos productos según la categoría de tamaño de grano: ajonjolí, maní, pistachos y nuez. El dispensador cuenta con sensores para monitorear las cantidades de productos disponibles en cada contenedor y saber si se encuentra abierto o cerrado cada uno de ellos. Para que el sistema de dispensación automático pueda descargar cantidades solicitadas en gramos se requiere un sistema de control en lazo cerrado, este consiste en servomotores con mecanismos de tornillo sin fin que dosifican el producto y una celda de carga que envía la señal de retroalimentación al controlador. Se diseñó una arquitectura IoT que permite interactuar a los dispositivos y elementos del sistema con interfaces web donde el cliente puede realizar pedidos y el administrador pueda monitorear las ventas, inventario y registro de clientes. De esta manera, el dispensador implementado es compatible con las características de producción personalizada de la Industria 4.0.

#### 3.2 *Arquitectura IoT propuesta*

Se propone una arquitectura IoT de tres capas que se muestra en la Figura 1, esta permite integrar las características de la Industria 4.0 al dispensador de frutos: Capa de Dispositivos, Capa de Procesamiento de Datos y Capa de Servicios en la Nube.

Capa de Dispositivos: Consiste en la conectividad de sensores, actuadores, medios de visualización y máquinas y elementos del medio físico de los procesos, donde se extraen datos y ejecutan acciones bajo la coordinación de las capas superiores de la arquitectura IoT. En esta capa, se necesita una medición de variables en tiempo real, por lo tanto, la toma de decisiones consiste principalmente en respuestas automáticas predefinidas por la siguiente capa (Castro-Martin, 2021).

Capa de Procesamiento: Esta capa tiene funciones de acondicionamiento de señales, procesamiento y estandarización de datos previo al envío y registro de estos en la Nube. Los elementos utilizados en esta capa son microcontroladores o microprocesadores conectados directamente a los sensores que permiten realizar operaciones matemáticas, transmisión de datos válidos y control de los componentes electrónicos mediante algoritmos de programación. El tipo de procesamiento de datos implementado en esta capa es de Fog Computing (cómputo en la niebla) ya que únicamente los microcontroladores son los encargados de la toma de decisiones. Para poder comunicarse con la próxima capa, los microcontroladores o miniordenadores deben tener conexión inalámbrica Wifi.

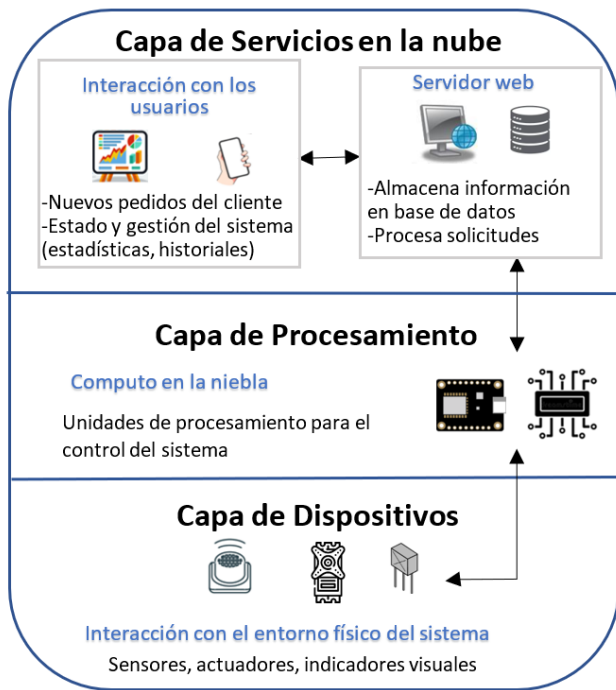


Figura 1. Arquitectura IoT propuesta para producción personalizada

Capa de Servicios en la Nube: Los servicios que proporciona esta capa principalmente es de almacenamiento de datos y de interacción con usuarios. En esta capa, se presenta el cómputo en la Nube (Cloud Computing), en el que los datos son enviados masivamente a servidores remotos por medio de Internet para ser procesados y validados por algoritmos de programación desarrollados en entornos Web. El procesamiento en la nube proporciona computación, redes, almacenamiento, control permite la interacción entre nube hasta la capa de dispositivos (Yousefpour et al., 2019). En esta capa, se establecen políticas de seguridad para la autorización y control de acceso a la información siendo un importante desafío la seguridad, propiedad, privacidad y uso compartido de datos. También proporciona información significativa a los usuarios por medio de técnicas de visualización y análisis de datos de IoT (Bhatt, 2019).

#### 4. IMPLEMENTACIÓN

A continuación, se presenta la implementación de la arquitectura IoT propuesta para el dispensador inteligente de frutos para la producción personalizada en la Industria 4.0.

##### 4.1 Implementación de la Capa de Dispositivos

Dentro de la capa de dispositivos se utilizan los sensores, actuadores y medios de visualización que reciben y envían señales para interactuar con los componentes del sistema. En la Tabla 1, se presentan los elementos del dispensador automático y se describen sus funciones.

En esta capa, los elementos se han agrupado en tres grupos como se muestra en la Figura 2: elementos del sistema de control que permiten la dosificación de productos, elementos para la monitorización de contenedores, y elementos de visualización. Los datos recolectados por los sensores y pulsadores son enviados hacia la capa de procesamiento de

datos de la arquitectura IoT. Una vez procesada la información se acciona los mecanismos de dispensación para entregar el producto solicitado.

Tabla 1. Elementos de la capa de dispositivos

Elemento	Modelo	Función
Sensor magnético de efecto hall	M44	Detectar si está o no abierta la compuerta de cada contenedor en el dispensador.
Sensor ultrasónico	HC-SR04	Medir, de forma continua, la cantidad de frutos secos disponible en los contenedores
Celda de carga y amplificador	Amplificador HX711	Pesar los frutos secos dispensados.
Servomotores	MG-995	Dar movimiento a los mecanismos de tornillo sin fin fabricados por impresión 3D para la dispensación del producto. Se usa dos servomotores en cada contenedor
Switch pulsador	Pulsador 12mm	Ante su activación, confirma el pedido para la dispensación de frutos
Diodos emisores de luz	LED rojo y verde 5mm	Indicar el estado de la puerta del contenedor (abierta o cerrada).
Display de cristal líquido	LCD 16X2	Mostrar los valores de los sensores.

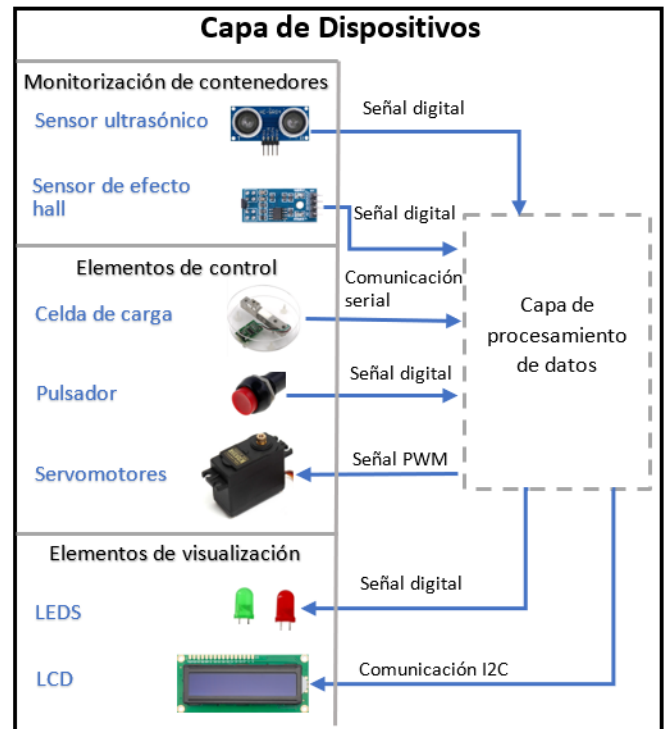


Figura 2. Diagrama funcional de la capa de dispositivos

##### 4.2 Implementación de la Capa de Procesamiento de Datos

La capa de procesamiento de datos se desarrolla en la niebla (FOG computing), los datos enviados por los elementos de la capa de dispositivos son procesados en el microcontrolador, con lo cual se reduce la latencia y se evita las sobrecargas de datos innecesarios en el servidor. La tarjeta Arduino Mega, que trabaja con el microcontrolador ATmega2560, y el módulo NodeMCU basado en el chip ESP8266 procesan los datos de los sensores para tomar decisiones sobre la activación

de los actuadores y envían la información a las pantallas LCDs. La tarjeta Arduino Mega y la NodeMCU intercambian información gracias al uso de protocolo UART, estableciendo una comunicación semidúplex. El dispensador puede conectarse a la red de comunicación inalámbrica por medio de la interfaz Wifi que posee el módulo NodeMCU, de esta manera se realiza el intercambio de datos con un servidor local.

El protocolo de mensajería usado para el intercambio de información desde la capa de procesamiento hacia la capa de servicios en la Nube es HTTP, con el método POST. El envío de datos entre el microcontrolador NODEMCU y el servidor se realiza únicamente cuando se detecta un valor diferente al último recibido ya sea por porte de los sensores o de un pedido del cliente, esto ayuda a prevenir la sobrecarga del servidor y la base de datos. Los elementos de la capa de procesamiento de datos se muestran en la Figura 3.

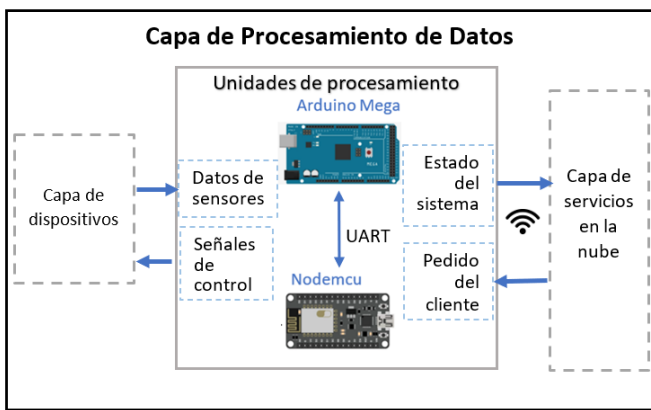


Figura 3. Diagrama funcional de la capa de procesamiento

### 4.3 Implementación de la Capa de Servicios en la Nube

Los componentes de la capa de servicios en la Nube se presentan en la Figura 4. Se desarrollaron dos interfaces web que permiten la interacción tanto del usuario vendedor, como del usuario cliente con el sistema, de esta manera se logra gestionar, monitorear y personalizar los pedidos. El vendedor puede acceder a herramientas de gestión de ventas individuales, venta acumulada, historial de pedidos, cantidad de usuarios registrados e inventario del producto disponible, es decir, de las cantidades de frutos secos en cada contenedor por medio de gráficos y tablas dinámicas. Por otra parte, el comprador puede personalizar su pedido estableciendo cuántos gramos de cada fruto seco desea comprar y finalmente conocer el valor de su compra, a la vez que disfruta de un entorno web llamativo visualizando los beneficios para la salud de cada producto.

Los datos enviados desde la capa de procesamiento hacia esta capa son almacenados en una base de datos MySQL instalada en el mismo servidor. Para el desarrollo del front-end de las interfaces web se utilizaron distintos lenguajes, como HTML que da la estructura para la creación de sitios web, CSS para estilizar los elementos creados en HTML y JAVASCRIPT para crear aplicaciones web interactivas y escalables con funciones dinámicas para el usuario. Por último, se empleó el framework Bootstrap, el cual combina potencialmente estos

tres lenguajes y posee componentes prediseñados que dan estilo a los componentes en las páginas web.

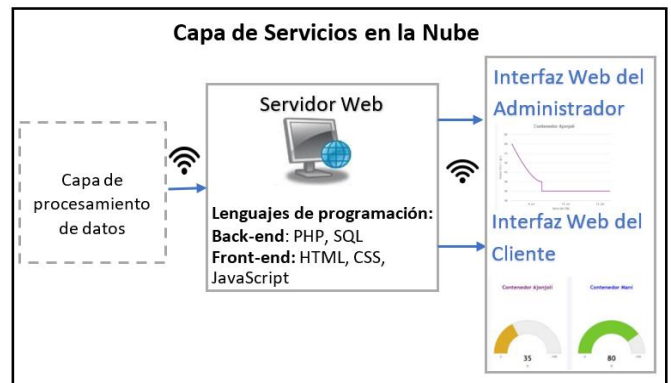


Figura 4. Diagrama funcional de la capa de servicios en la nube

En cuanto al Back-End de las interfaces web emplea lenguaje SQL para realizar consultas y modificaciones a la base de datos. También se utiliza el lenguaje PHP incrustado en HTML para validaciones de credenciales, seguridad de datos, ejecución de sentencias SQL, renderización de elementos por medio de bucles que ejecutan lenguaje HTML en conjunto con datos extraídos de la base de datos. Para el desarrollo de gráficas interactivas se empleó la librería HIGHCHARTS construidas bajo JavaScript, TypeScript, HTML y CSS, esta librería usa peticiones AJAX que permite extraer datos de la base de datos y presentarlos en tiempo real y de forma dinámica.

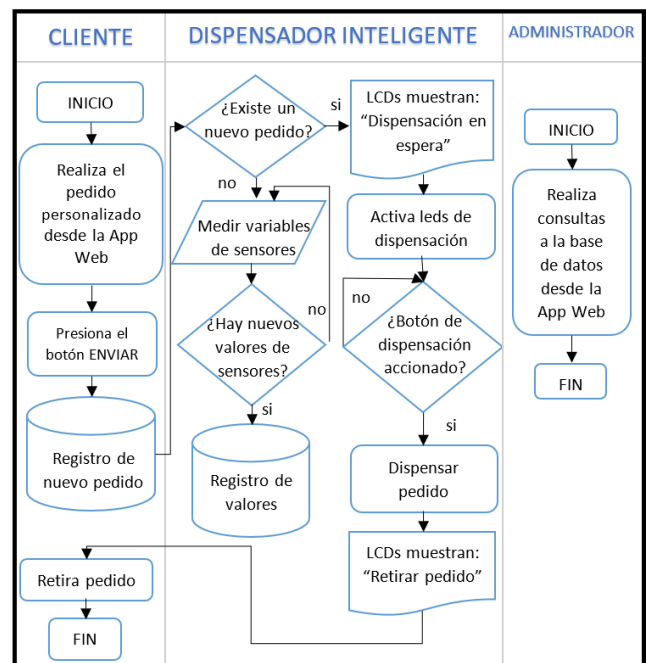


Figura 5. Aplicación Web del cliente para personalización del pedido

La Figura 5 muestra el diagrama funcional del sistema de dispensación en la Industria 4.0. La persona que requiere los frutos secos es quien va a iniciar la interacción del sistema por medio del acceso a la aplicación web donde solicita la cantidad en gramos de cada fruto, una vez realizado el pedido se le muestra el precio final de la compra y debe accionar un botón de aceptar para enviar el pedido a la siguiente etapa. La

solicitud del pedido se envía a la base de datos, el microcontrolador ESP8266, recibe el pedido desde la base de datos por el protocolo http, se valida la existencia de los granos para el pedido y espera que se confirme la dispensación por medio del accionamiento del pulsador físico.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 5.1 Funcionamiento del dispensador inteligente

El dispensador Inteligente de frutos secos se visualiza en la Figura 6. Una vez implementadas las tres capas de la arquitectura IoT para el dispensador inteligente, se presentan las funciones y actividades que realiza el cliente que va a personalizar el pedido, la máquina de dispensación de frutos que entregará el producto y el administrador de la tienda que gestiona las ventas y la materia prima del sistema.



Figura 6. Dispensador Inteligente de Frutos Secos

Como se mencionó en la revisión del estado del arte, un sistema de producción personalizado debe ser capaz de reconfigurar su funcionamiento para una producción de varios tipos de producto, esto se cumple en el dispensador implementado con flexibilidad suficiente para dispensar un solo tipo de grano o hasta 4 diferentes granos y distintos pesos según la solicitud del cliente.

Se realizaron 20 pruebas de funcionamiento con 4 usuarios de tipo cliente y un usuario de tipo administrador para determinar la funcionalidad y el porcentaje de error del sistema de dispensación. Se obtuvo un 100% de éxito de acceso a la aplicación Web cuando los usuarios así lo requirieron. Cada cliente realizó 5 pedidos con distintas cantidades y productos desde la aplicación web respectiva. El usuario de tipo administrador accedió a los estados de los contenedores en tiempo real con un máximo retardo de 1,3 segundos mediante la visualización de los gráficos web. Por otro lado, el acceso a las tablas de datos históricos de los pedidos, de forma manual, tuvo un retardo máximo de 1,2 segundos en actualizarse la

página web y reflejar los mismos. En las pruebas, los clientes accedieron a la aplicación usando una conexión Wifi, una vez aceptado el pedido y el precio por parte del cliente, se tarda en promedio 1,7 segundos en llegar la notificación al usuario tipo administrador sobre un nuevo pedido en espera para ser dispensado.

### 5.2 Aplicaciones Web para cliente y administrador de la tienda

El dispensador fue instalado en una tienda de alimentos a granel, donde se realizaron pruebas de funcionamiento. La página web del dispensador inteligente tiene dos interfaces:

- Interfaz del cliente: Los clientes acceden a través de su teléfono móvil a la aplicación de usuario donde se despliega una interfaz interactiva que se visualiza en la Figura 7, con información esencial de los productos que posee el dispensador inteligente: ajonjolí, maní, pistacho y nuez. El cliente puede seleccionar la cantidad en gramos que desea comprar, la interfaz muestra el precio que cada fruto seco y el total de su compra. La aplicación del usuario posee un menú para acceder a información adicional como el historial de compras, cantidad de producto disponible en cada contenedor y credenciales de su cuenta.
- Interfaz del administrador: El administrador de la tienda tiene el acceso a una aplicación web que se muestra en la Figura 8 donde podrá gestionar el sistema. La interfaz consta de un menú para acceder a distintas opciones como: visualización del historial de ventas, disponibilidad de producto en cada contenedor del dispensador, estado de los contenedores si están abiertos o cerrados, clientes registrados, lista de usuarios que tienen permiso de administradores, base de datos cruda. Las opciones mencionadas proporcionan una información completa para que el gerente de la tienda pueda realizar análisis como: el producto de mayor o menor venta, el tiempo de renovación de producto disponible, análisis financieros; de esta manera podrá tomar decisiones en beneficio a su empresa.

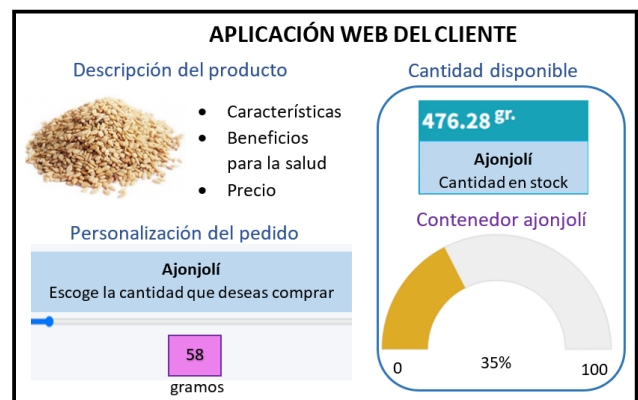


Figura 7. Aplicación Web del cliente para personalización del pedido

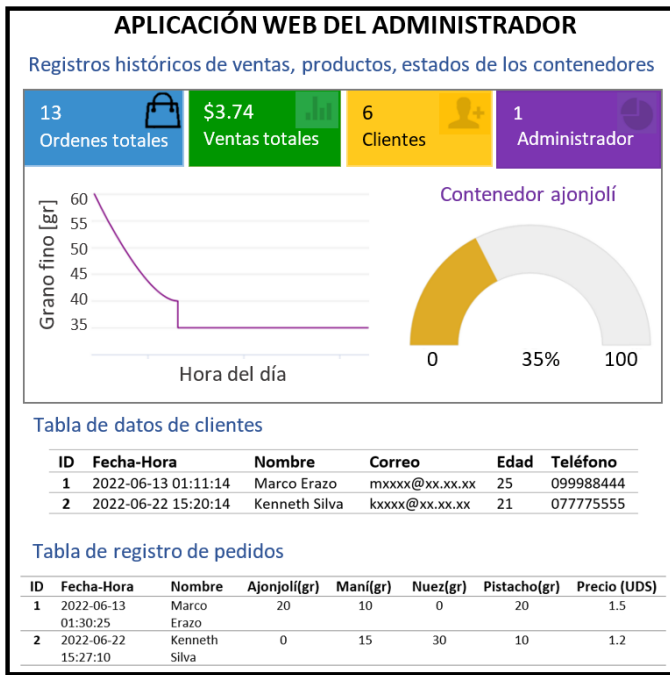


Figura 8. Aplicación Web del cliente del administrador para gestión del dispensador

### 5.3 Pruebas de dispensación de frutos secos

En la Tabla 2, se presenta la variación entre la cantidad en gramos solicitado por los clientes y la cantidad que dispense el sistema inteligente.

Muestra	Cantidad Solicitada [gr]	Cantidad Dispensada [gr]	Variación	Producto
1	10	10,5	+ 0,5	Ajonjolí
2	13	13,6	+ 0,6	
3	15	15,3	+ 0,3	
4	20	20,4	+ 0,4	
5	18	19,3	+ 1,3	Maní
6	14	15	+ 1,0	
7	7	7,6	+ 0,6	
8	10	10,6	+ 0,6	Pistacho
9	20	21,3	+ 1,3	
10	30	30,7	+ 0,7	
11	15	15,5	+ 0,5	
12	10	10,2	+ 0,2	Nuez
13	17	18,5	+ 1,5	
14	12	12	+ 0	
15	23	24,5	+ 1,5	
16	39	41	+ 2	
Error Promedio			+ 0,8125	

El error promedio que se obtuvo en los pedidos realizados al dispensador inteligente es del +0.8 gramos, siendo un error bajo. Un solo grano de los frutos como la nuez o el pistacho produce variación entre la cantidad solicitada y la cantidad dispensada. Para la industria de alimentos a granel significa un error poco significativo que no representa pérdidas económicas. En el Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN 284 “Cantidad de Producto en Preenvasados/Preempaques” se establece como error a un preenvase/preempaque inadecuado para el cual se determina que el contenido neto real es menor al contenido neto nominal (Qn) menos la deficiencia tolerable (T) permitida para el contenido neto nominal como

se presenta en la ecuación (1) (Ministerio de Industrias y Productividad, 2015).

$$Error: Contenido neto real < (Q_n - T) \tag{1}$$

Para contenido de 0 a 50 gramos que es el rango que se solicitará para cada grano, la norma establece como deficiencia tolerable al 9% del Qn. En este caso, como se mostró en la Tabla 2 las variaciones obtenidas son positivas, por lo que, el contenido neto real no es menor al contenido neto nominal en ninguna de las muestras, lo que indica que el contenido dispensado según el peso requerido por el cliente es adecuado.

## 6. CONCLUSIONES

La Industria 4.0 permite a los sistemas productivos realizar operaciones de manera más eficiente e innovadora, la producción personalizada es un paradigma que poco a poco sustituye a la producción en masa, la cual caracterizaba a la segunda revolución industrial. La flexibilidad que presenta el dispensador implementado permite que los requerimientos del cliente sean prioridad en la preparación del producto final. Este trabajo muestra la evolución de una máquina tradicional a una compatible con las nuevas tendencias de la Industria 4.0, ya que ha convertido a los dispensadores mecánicos de fruto secos en dispensadores inteligentes.

En el presente trabajo, se presenta el diseño de un dispensador inteligente con un sistema capaz de personalizar el pedido del cliente. La aplicación web del administrador permite la gestión rápida y en tiempo real lo cual abre el camino para implementar los paradigmas de la Industria 4.0 en el negocio de venta de productos a granel.

Se implementó una arquitectura IoT de tres capas: capa de dispositivos, capa de procesamiento y capa de servicios en la nube; que permite la interconexión del entorno físico del sistema con los elementos de software para el procesamiento de datos y gestión de la información.

## REFERENCIAS

Alarcón, J. (2022). Prototipo De Dispensador Automático De Medicamentos Para Personas De La Tercera Edad. *Revista Multidisciplinaria De Desarrollo Agropecuario, Tecnológico, Empresarial Y Humanista*, 4(1), 5-5. <https://www.dateh.es/index.php/main/article/view/109>

Almrezeq, N., Almadhoor, L., Alrasheed, T., Abd El-Aziz, A., & Nashwan, S. (2020). Design a secure IoT architecture using smart wireless networks. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 12(3), 401-410. <https://doi.org/10.17762/ijcnis.v12i3.4877>

Alvarez, S. A., Altamirano, R. H., Lascano, P. H., & Dávalos, P. C. (2021). Monitoreo y control remoto de un dispensador de alimento para mascotas basado en IoT. *Revista de Investigación en Tecnologías de la*

- Información, 9(17), 77-88. <https://doi.org/10.36825/RITL09.17.008>
- Barni, A., Corti, D., Pedrazzoli, P., & Rovere, D. (2018). A digital fabrication infrastructure enabling distributed design and production of custom furniture. *Customization 4.0*, 173-190. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77556-2>
- Bhatt, S., Lo'ai, A., Chhetri, P., & Bhatt, P. (2019). Authorizations in cloud-based internet of things: current trends and use cases. *2019 Fourth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, 241-246. <https://doi.org/10.1109/FMEC.2019.8795309>
- Cao, K., Liu, Y., Meng, G., & Sun, Q. (2020). An overview on edge computing research. *IEEE Access*, 8, 85714-85728. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991734>
- Carrera, A. (11 de marzo de 2020). Industria 4.0 en el Ecuador. *San Francisco Global*. <https://sanfranciscoglobal.org/industria-4-0-en-el-ecuador/>
- Castro-Martin, A., Ahuett-Garza, H., Guamán-Lozada, D., Márquez-Alderete, M., Urbina, P., Orta, P., Kurfess, T., & González, E. (2021). Connectivity as a design feature for industry 4.0 production equipment: Application for the development of an in-line metrology system. *Applied Sciences*, 11(3), 1312. <https://doi.org/10.3390/app11031312>
- Coloma-Sevilla, L. (2017). Diseño de un servicio de personalización de vajilla para restaurantes de cocina de vanguardia en la ciudad de Quito [Tesis de grado, Universidad de las Américas]. Repositorio Repositorio Digital Universidad De Las Américas. <https://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/8328>
- Del Val Román, J. (16 de Mazo de 2016). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. Informe COODDI. 1-10. <https://bit.ly/2zDyDrk>
- Dineva, K., & Atanasova, T. (2021). Design of scalable IoT architecture based on AWS for smart livestock. *Animals*, 11(9), 2697. <https://doi.org/10.3390/ani11092697>
- Encalada-Grijalva, M., Narváez-Pupiales, S., Umaquina-Criollo, A., Suárez-Zambrano, L. E., & Peluffo-Ordóñez, D. (2019). Dispensador médico de control y monitoreo para el Hogar del Anciano " San Vicente de Paúl" de la ciudad de Atuntaqui (Ecuador). *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E19), 595-607. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/dispensador-médico-de-control-y-monitoreo-para-el/docview/2260411316/se-2>
- Fenech, C. & Perkins, B. (2019). Made-to-order: The rise of mass personalization. *The Deloitte Consumer Review*, 11, 1-19. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/consumer-business/ch-en-consumer-business-made-to-order-consumer-review.pdf>
- Germani, L., Mecarelli, V., Baruffa, G., Rugini, L., & Frescura, F. (2019). An IoT architecture for continuous livestock monitoring using LoRa LPWAN. *Electronics*, 8(12), 1435. <https://doi.org/10.3390/electronics8121435>
- Hernández, N. (13 de marzo de 2019). ¿Productos personalizados en masa? Una realidad para la Industria 4.0. *Hablemos de empresas*. <https://hablemosdeempresas.com/grandes-empresas/industria-4-0-personalizacion-masiva/>
- Madakam, S., Ramaswamy, R. & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*, 3(5), 164-173. <http://dx.doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>
- Martin, C., Samans R., Leurent, H., Beti, F., Hanouz, T., & Geiger, T. (2018). Readiness for the Future of Production Report 2018. *The World Economic Forum*. [https://www3.weforum.org/docs/FOP\\_Readiness\\_Report\\_2018.pdf](https://www3.weforum.org/docs/FOP_Readiness_Report_2018.pdf)
- MINTEL. (2018). Libro Blanco de la Sociedad de la Información y del Conocimiento. *Ministerio de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información*. <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2018/07/Libro-Blanco-de-la-Sociedad-del-Infomaci%C3%B3n-y-del-Conocimiento.pdf>
- MINTEL. (12 de agosto de 2020). El MINTEL y el Municipio de Ambato trabajan para convertirla en Ciudad Inteligente. *Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información*. <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/el-mintel-y-el-municipio-de-ambato-trabajan-para-convertirla-en-ciudad-inteligente/#:~:text=Muc%C3%B3n%20result%C3%B3%20que%20desde%20el,adem%C3%A1s%2C%20facilitar%C3%A1%20la%20documentaci%C3%B3n%20de>
- Ministerio de Industrias y Productividad. (18 de septiembre de 2015). Cantidad de producto en preenvasados/preempacados. *REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN 284*. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/reglament-os/RTE-284.pdf>
- Mladineo, M., Zizic, M. C., Aljinovic, A., & Gjeldum, N. (2022). Towards a knowledge-based cognitive system for industrial application: Case of personalized products. *Journal of Industrial Information Integration*, 27, 100284. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100284>
- Mocnej, J., Seah, W. K., Pekar, A., & Zolotova, I. (2018). Decentralised IoT architecture for efficient resources utilisation. *IFAC-PapersOnLine*, 51(6), 168-173. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.148>
- Popkova, E., Ragulina, Y., & Bogoviz, A. (2019). Fundamental differences of transition to industry 4.0 from previous industrial revolutions. In *Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century*, 169, 21-29. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94310-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94310-7_2)
- Rahimi, H., Zibaenejad, A., & Safavi, A. (2018). A novel IoT architecture based on 5G-IoT and next generation technologies. In *2018 IEEE 9th annual information technology, electronics, and mobile communication*

conference (IEMCON), 81-88.  
<https://doi.org/10.1109/IEMCON.2018.8614777>

Sánchez, V. (2018). Internet de las cosas-Horizonte 2050. *Boletín IEEE*, (11), 956-969.  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6715660>

Sjödin, D., Parida, V., Leksell, M., & Petrovic, A. (2018). Smart Factory Implementation and Process Innovation: A Preliminary Maturity Model for Leveraging Digitalization in Manufacturing Moving to smart factories presents specific challenges that can be addressed through a structured approach focused on people, processes, and technologies. *Research-Technology Management*, 61(5), 22-31.  
<https://doi.org/10.1080/08956308.2018.1471277>

Sukhodolov, Y. (2019). The notion, essence, and peculiarities of industry 4.0 as a sphere of industry. In *Industry 4.0: industrial revolution of the 21st century*, 169, 3-10. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94310-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94310-7_1)

Tipaz-Portilla, M. (2019). Plan de negocios para el emprendimiento de AranwariLab [Tesis de maestría, Universidad Internacional de la Rioja]. Repositorio Institucional REUNIT.  
<https://reunir.unir.net/handle/123456789/8244>

Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0—a glimpse. *Procedia manufacturing*, 20, 233-238.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>

Wan, J., Tang, S., Li, D., Imran, M., Zhang, C., Liu, C., & Pang, Z. (2018). Reconfigurable smart factory for drug packing in healthcare industry 4.0. *IEEE transactions on industrial informatics*, 15(1), 507-516. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2843811>

Wang, S., Wan, J., Imran, M., Li, D., & Zhang, C. (2018). Cloud-based smart manufacturing for personalized candy packing application. *The Journal of Supercomputing*, 74(9), 4339-4357.  
<https://doi.org/10.1007/s11227-016-1879-4>

Yousefpour, A., Fung, C., Nguyen, T., Kadiyala, K., Jalali, F., Niakanlahiji, A., Kong, J., & Jue, J. (2019). All one needs to know about fog computing and related edge computing paradigms. *Journal of Systems Architecture*, 98, 289-330.  
<https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2019.02.009>

Zhang, Y., Cheng, Y., & Tao, F. (2017). Smart production line: common factors and data-driven implementation method. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers*, 50749, 1-7.  
<https://doi.org/10.1115/MSEC2017-2896>

## BIOGRAFÍAS



**Patricio, Silva-Naranjo.** Ingeniero en Telecomunicaciones graduado en la Universidad Técnica de Ambato, institución que le forjó una sólida base de conocimientos, principalmente en programación y electrónica, lo que le permitió enfocarse apasionadamente al desarrollo web y de sistemas embebidos.

Obtuvo meritoriamente certificados y diplomas como programador en distintos lenguajes y hacking ético por instituciones online. Con experiencia en el diseño e instalación profesional de iluminación decorativa exterior de bajo voltaje.






**Ana Pamela, Castro-Martin.** Ingeniera Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga. Tiene su título de cuarto nivel como Maestra en Ciencias con Especialidad en Sistemas de Manufactura en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey en México. Su línea de

investigación es sistemas electrónicos y tecnologías para la Industria 4.0. Actualmente es docente en la Universidad Técnica de Ambato en la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial.



# Evaluación Experimental de la Resistencia Sísmica de Muros de Concreto Armado de Espesor Reducido en Viviendas de Baja Altura

Almeida Navarrete, Javier<sup>1</sup> ; Hube, Matías<sup>2</sup> ; Khorami, Majid<sup>1,3\*</sup> 

<sup>1</sup>Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad UTE, Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Department of Structural and Geotechnical Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile and Research Center for Integrated Disaster Risk Management (CIGIDEN) ANID/FONDAP/15110017, Santiago, Chile.

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de Producción (FIMCP), Escuela Superior Politécnica de Litoral (ESPOL), Guayaquil, Ecuador

**Resumen:** Actualmente en América Latina, la construcción regular de muros de hormigón armado para estructuras de hasta dos plantas es una analogía al método utilizado en los edificios de gran altura. Los muros están diseñados con una doble capa de malla de acero horizontal y vertical. Sin embargo, el uso de refuerzo de doble malla implica una cantidad de acero mucho mayor que la necesaria para los diseños de muros de estructuras de poca altura. Este estudio tiene como propósito realizar pruebas experimentales para evaluar el comportamiento sísmico de muros delgados de concreto armado con un solo refuerzo central. El plan experimental consideró una prueba de 6 muros en una proporción de 1:1. del WSL1 al WSL6, los muros tienen una longitud de 1600 mm ( $l_w$ ), una altura de 1600 mm ( $h_w$ ) y un espesor de 100 mm ( $t_w$ ), todas las muestras se construyeron con una viga superior para aplicar cargas horizontales y una viga inferior para sujetar los muros al suelo. Se ha observado a partir de ensayos experimentales que el comportamiento y falla de los muros se controla mediante el corte. La mayoría de las primeras grietas observadas en la muestra son grietas diagonales. Las variables estudiadas en el análisis de resultados fueron: cuantía de malla de refuerzo, tipo de acero (malla o refuerzo corrugado), cuantía de refuerzos de borde vertical. Además, se analizaron los resultados experimentales para evaluar el efecto del refuerzo de borde, cuantía de mallas soldadas, el tipo de acero y cuantía de armaduras convencionales.

**Palabras clave:** Concreto Reforzado, Paredes Delgadas, Rejilla Soldada, Edificaciones de Bajo Nivel, Barras de Refuerzo, Comportamiento Sísmico

## Experimental Evaluation of the Seismic Resistance of Reinforced Concrete Walls with Reduced Thickness in Low-rise Residential Buildings

**Abstract:** Currently in Latin America, the regular construction of reinforced concrete walls for structures up to two stories is analogous to the method used in high-rise buildings. The walls are designed with a double layer of horizontal and vertical steel mesh. However, the use of double mesh reinforcement involves a much larger amount of steel than necessary for low-rise structure wall designs. The objective of this study is to experimentally evaluate the seismic performance of thin reinforced concrete walls with a single central reinforcing mesh. The experimental plan considered a test of 6 walls in a 1:1 ratio. From WSL1 to WSL6, the walls have a length of 1600 mm ( $l_w$ ), a height of 1600 mm ( $h_w$ ), and a thickness of 100 mm ( $t_w$ ), all samples were constructed with a top beam to apply horizontal loads and a bottom beam to hold the walls to the ground. It has been observed from experimental tests that the behavior and failure of the walls are controlled by shear. Most of the first cracks observed in the sample are diagonal cracks. The variables studied in the results analysis were: amount of reinforcing mesh, type of steel (mesh or corrugated reinforcement), and amount of vertical edge reinforcements. Additionally, the experimental results were analyzed to evaluate the effect of edge reinforcement, amount of welded mesh, type of steel, and amount of conventional reinforcements.

**Keywords:** Reinforced Concrete, Thin Walls, Welded Mesh, Low-rise Buildings, Reinforcing Bars, Seismic Performance

\*khoramimajid@yahoo.com  
Recibido: 30/03/2023  
Aceptado: 28/07/2023  
Publicado en línea: 14/11/2023  
10.33333/tp.vol52n2.03  
CC 4.0

### 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la construcción de viviendas en América Latina ha experimentado un notable aumento. Para cumplir esta demanda, se han construido casas y edificios con muros delgados de hormigón armado (CR) en países propensos a sismos como Ecuador, Colombia, México, Perú, Venezuela y Chile (Blandon, 2018; Gonzales, 2012; Mejia, 2019; Santa-María, 2017). La ventaja de usar muros de CR se basa en su resistencia, bajo costo y rápida construcción. Se han utilizado muros de hormigón armado de 100 mm de espesor, usando una o dos capas de refuerzo de alma, ya sea con varillas corrugadas (DB) o con refuerzo de malla soldada (WWR).

Debido a que muchas de las estructuras antes mencionadas no cumplen con los requisitos sísmicos de los principales códigos de diseño, como ACI-318 (2014), los códigos locales han incluido disposiciones especiales para muros de hormigón armado delgados. Como ejemplo, el código mexicano NTSC-(2004) permite paredes estructurales de hasta 100 mm de espesor para estructuras de uno y dos pisos, pero se requiere un espesor de 130 mm para estructuras más altas. De manera similar, el código chileno DS-60 (MINVU, 2010) permite utilizar muros de concreto reforzado convencionales en edificios de hasta cinco niveles, siempre y cuando sean diseñados con un factor de reducción de resistencia equivalente al de las estructuras de albañilería. Para tales paredes, el espesor de pared mínimo es de 100 mm y se pueden usar una o dos capas de refuerzo de alma.

Surgen diferentes preocupaciones sobre el desempeño sísmico de las estructuras con muros delgados de hormigón armado principalmente debido a la posible falta de ductilidad, la poca información disponible sobre su comportamiento durante los terremotos y la ausencia de pautas de diseño respaldadas por investigaciones experimentales. Se ha investigado el comportamiento de muros delgados de RC tanto por medios experimentales como analíticos. Quiroz (2013) probó muros

reforzados con WWR, Carrillo et al. (2015) estudiaron muros construidos con hormigón ligero y de baja resistencia. Adicionalmente, se han realizado ensayos para comparar el comportamiento cuasi estático y dinámico de muros de CR (Carrillo & Alcocer, 2013), para evaluar el comportamiento fuera del plano (Rosso et al., 2016), y para proponer resistencia al corte e histéresis (Luna, 2015). En cuanto a los estudios analíticos de muros delgados, se han propuesto ecuaciones para estimar la resistencia al corte (Carrillo & Alcocer, 2011), y se han propuesto curvas de fragilidad para muros reforzados con WWR (Quiroz, 2013). Con respecto al comportamiento de muros delgados de CR, Blandon (2018) probó cuatro paredes para caracterizar el comportamiento de edificios de altura media a alta.

Este artículo corresponde al trabajo de investigación realizada en la Pontificia Universidad Católica de Chile (Almeida, 2015), se muestra información adicional al trabajo realizado anteriormente por Hube et al., (2020) y describe las actividades experimentales de seis especímenes de muros delgados de hormigón armado a escala real con refuerzo interno de una sola capa. Los muros se detallan con diferentes tipos de acero, proporciones de refuerzo y espesores de muro. El muro 1 corresponde al muro de referencia (WSL1), el muro 2 se analizará por cuantía de borde (WSL2), el muro 3 se analizará por cuantía de refuerzo alta (WSL3), el muro 4 se analizará por cuantía de refuerzo reducida (WLS4), el muro 5 se analizará el tipo de acero (WLS5) y el muro 6 se analizará el tipo de acero con cuantía reducida (WLS6). El espécimen está sujeto a desplazamientos laterales periódicos sin carga axial. Se determinaron la relación carga-desplazamiento, el modo de falla, el modo de fisuración y se determinó la deformabilidad. Además, la resistencia medida se compara con la resistencia calculada utilizando la recomendación (ACI-318, 2014) y con las ecuaciones planteadas por los autores Carrillo & Alcocer (2011).

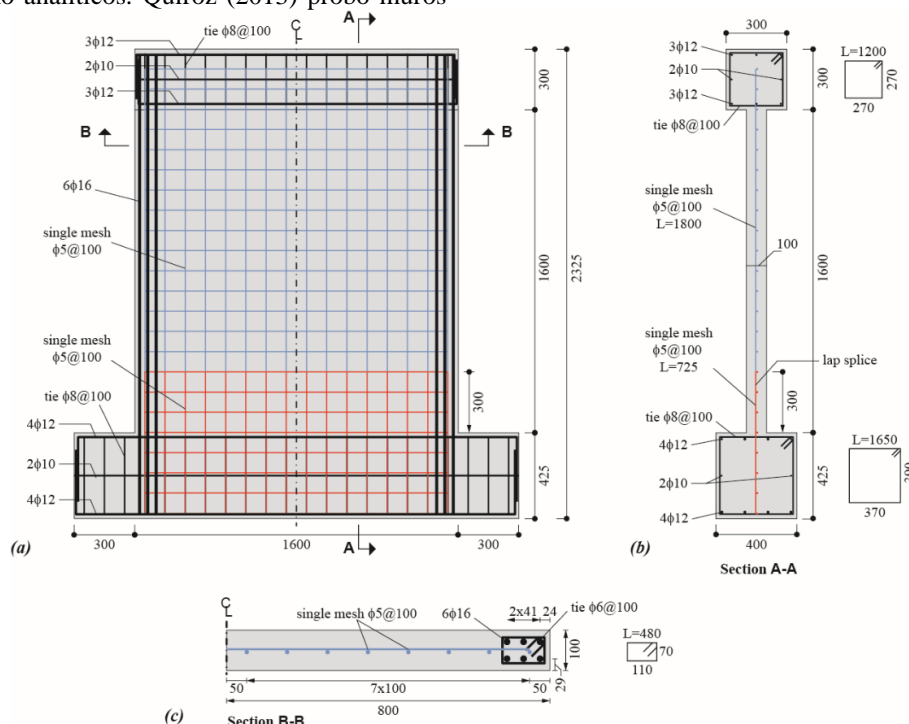


Figura 1. Geometría y detalle de refuerzo muro WSL1 (a) elevación, (b) corte A-A, and (c) mitad del corte B-B. Dimensiones en mm (Hube et al., 2020)

Tabla 1. Matriz de Ensayos

Muro	Propósito de ensayo	$t_w$ (mm)	Refuerzo Tipo	Detalle de refuerzo	$\rho_t = \rho_l$	$\rho$
WSL1	Muro de referencia	100	WWR	$\phi 5 @ 100$	0.0020	0.008
WSL2	Cuantía de borde	100	WWR	$\phi 5 @ 100$	0.0020	0.003
WSL3	Cuantía de refuerzo alta	100	WWR	$\phi 7 @ 150$	0.0026	0.008
WSL4	Cuantía de refuerzo reducida	100	WWR	$\phi 4.2 @ 100$	0.0014	0.008
WSL5	Tipo de acero	100	DB	$\phi 8 @ 250$	0.0020	0.008
WSL6	Tipo de acero y cuantía de refuerzo reducida	100	DB	$\phi 8 @ 360$	0.0014	0.008

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Matriz de prueba

Se construyeron y probaron seis muros delgados de hormigón armado con refuerzo de una sola capa, bajo desplazamientos laterales cíclicos. Las variables consideradas son el espesor de pared ( $t_w$ ), tipo de refuerzo del alma, relaciones de refuerzo transversal y longitudinal del alma ( $\rho_t$  y  $\rho_l$ ), y relación de refuerzo a flexión ( $\rho$ ), donde  $\rho$  es la relación entre el refuerzo de límite longitudinal y la superficie transversal del muro. En la Tabla 1, se resume la matriz de prueba. La longitud ( $l_w$ ) y la altura ( $h_w$ ) de las paredes fueron de 1600 mm cada una, lo que resultó en una relación de  $h_w/l_w = 1,0$ . Las muestras (WSL1 a WSL6) tenían un espesor de 100 mm. Las muestras se construyeron para obtener un comportamiento a corte debido a su relación de aspecto, razón altura y largo de muro ( $h_w/l_w$ ), y razón largo y espesor de muro ( $l_w/t_w$ ). La geometría y los detalles de WSL1 se muestran en la Figura. 1.

Los muros están conectados al marco de carga con vigas de hormigón armado superiores e inferiores. La carga lateral se aplica en el centro de la viga RC superior, a 1750 mm de la parte inferior del muro, lo que da como resultado una relación de aspecto ( $M/Vl_w$ ) de 1,09. Dado que las cargas verticales de estructuras bajas son despreciables, no se aplican cargas axiales a los muros.

El muro WSL1 se definió como el muro de referencia, y se reforzó con una malla de una sola capa de  $\phi 5$  mm de diámetro espaciadas a 100 mm, lo que da como resultado

relaciones de refuerzo transversal y longitudinal de  $\rho_t = \rho_l = 0,002$  (Figura. 1). La relación de acero transversal es equivalente a la relación mínima especificada por ACI 318 (2014) para muros ordinarios. Para simular la práctica de construcción, se fundió una malla corta con la base inferior, la cual se empalmó con el refuerzo del muro con una longitud de empalme traslapado de 300 mm (Figura. 1). Para evitar la falla por flexión, los bordes de WSL1 se reforzaron con seis varillas longitudinales de  $\phi 16$  mm, amarradas con estribos de  $\phi 6$  mm espaciados a 100 mm. La cantidad de refuerzo por flexión no es común en la práctica de la construcción, pero se usó con propósitos de prueba para asegurar una falla por cortante de los muros.

El detallamiento del muro WSL2 es idéntico al de WSL1, excepto en su borde, donde WSL2 se reforzó con dos barras longitudinales de  $\phi 16$  mm ( $\rho = 0,003$ ) y sin refuerzo transversal. Los muros WSL3 y WSL4 tenían los mismos detalles de borde que WSL1, pero un refuerzo interior diferente. El muro WSL3 se reforzó con una cuantía de acero más grande que WSL1, utilizando malla de  $\phi 7$  mm espaciadas a 150 mm ( $\rho_t = \rho_l = 0,0026$ ). El muro WSL4 se reforzó con malla de  $\phi 4,2$  mm espaciadas a 100 mm ( $\rho_t = \rho_l = 0,0014$ ), lo que da como resultado una cuantía de acero más baja que WSL1.

Para evaluar el efecto del tipo de acero, los muros WSL5 y WSL6 se detallaron con varillas corrugadas de  $\phi 8$  mm en lugar de malla refuerzo interior. El refuerzo de los especímenes WSL5 y WSL6 fueron equivalentes a las de WSL1 y WSL4, respectivamente.

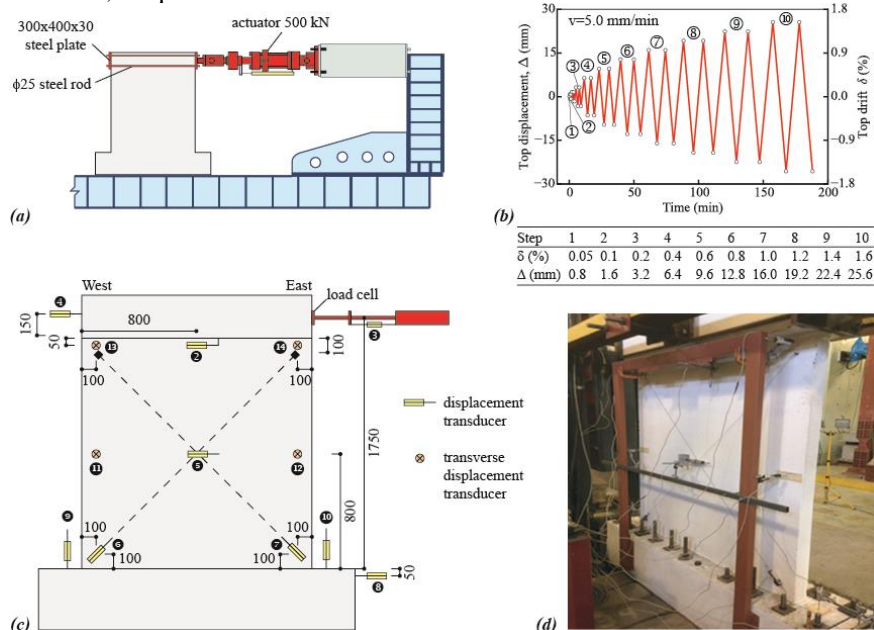


Figura 2. Programa Experimental: (a) Configuración del ensayo, (b) Protocolo de carga, (c) instrumentación y (d) Foto de un muro instrumentado (Hube et al., 2020)

2.2 Propiedades de los materiales

Para el hormigón con un tamaño máximo de agregado de 10 mm, la resistencia a la compresión especificada es de 20 MPa. La malla de refuerzo se especifica como acero con un límite elástico nominal de 500 MPa. Para barras de acero de diámetro igual o superior a Ø8 mm, el límite elástico nominal del acero es de 420 MPa, y para estribos en el borde del muro, diámetro de Ø6, el límite elástico nominal del acero es de 280 MPa.

2.3 Propiedades de los materiales

Las propiedades mecánicas del hormigón y de los aceros de refuerzo fueron medidas experimentalmente. Para el hormigón de los especímenes, se especificó con una resistencia característica teórica en probetas cúbicas de 20 MPa, con un tamaño máximo de árido de 10 mm. experimentalmente, se ensayaron un total de nueve probetas cilíndricas de 300 mm de alto y 150 mm de diámetro. Tres probetas fueron ensayadas a los días 7, tres probetas a los 28 días y tres probetas fueron ensayadas en la misma semana de ensayo de los muros para tener una resistencia más aproximada la real. La resistencia promedio del hormigón fue de 28.9 MPa y el módulo de elasticidad promedio de estos ensayos fue de 25.4 GPa.

Para el acero de refuerzo, se ensayaron a tracción tres barras  $\phi 8$  mm, dos barras  $\phi 12$  mm y dos barras  $\phi 16$  mm de acero A630-420. Las barras  $\phi 8$  mm fueron utilizadas como armadura de refuerzo tipo de malla en algunos muros y las barras  $\phi 12$  y  $\phi 16$  mm fueron utilizadas como armadura de borde. Adicionalmente, se ensayaron tres barras  $\phi 4.2$  mm, tres barras  $\phi 5$  mm y tres barras  $\phi 7$  mm de acero AT560-500 correspondientes a las mallas C139, C196, y C257 respectivamente. A partir de los ensayos se determinó la tensión de fluencia.

La tensión de fluencia medida experimentalmente, es en promedio un 10 % mayor a la tensión de fluencia nominal para las barras de acero A630-420, mientras que para el acero AT560-500 la tensión de fluencia experimental es en promedio un 18 % mayor a la tensión de fluencia nominal por lo que los dos aceros cumplen con las especificaciones. El módulo de elasticidad experimental de las barras de acero A630-420 es 196 GPa, y para las barras de acero AT 560-500, 180 GPa. La deformación unitaria en el acero A630-420 es en promedio 9.4%, mientras que la deformación unitaria en el acero AT 560-500 es en promedio de 1.1%.

El comportamiento de las barras de acero AT560-500 es más frágil por lo que la capacidad de deformación es menor a las de las barras de acero A630-420.

2.4 Configuración e instrumentación de la prueba

La configuración de prueba se muestra en la Figura. 2a. Los muros se atornillaron en la base con varillas de acero de 20 Ø25 mm. Para aplicar la carga lateral, se utilizó un actuador hidráulico con una capacidad de 500 kN atornillado a las vigas superiores de los muros de hormigón armado. El actuador se clavó en ambos extremos y se sujetó a la viga RC usando varillas de acero de 4 Ø25 mm atornilladas contra placas de acero de 400x300x30 mm ubicadas en cada extremo de la viga RC superior. Para evitar desplazamientos fuera del plano, los soportes rodantes a cada lado de la viga de hormigón armado superior se conectaron a vigas en I horizontales de acero. Los muros fueron instrumentados con una celda de carga y un total de trece transductores de desplazamiento (Figura. 2c). Los transductores de desplazamiento se utilizaron para medir los desplazamientos en el plano y fuera del plano del muro, las deformaciones diagonales del muro y el posible movimiento de la base RC inferior.

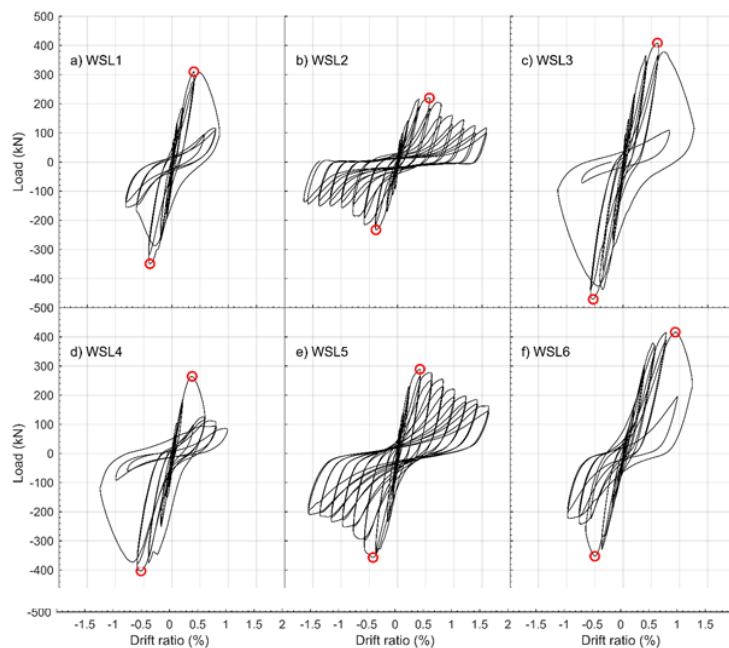


Figura 3. Relaciones carga vs deformación

## 2.5 Aplicación y control de carga

Se aplicaron a los muros desplazamientos cíclicos laterales a una velocidad constante de 5 mm/s. El protocolo de desplazamiento horizontal se muestra en la Figura. 2b y consta de dos ciclos para cada nivel de amplitud de deriva. El actuador se controló usando un sensor de desplazamiento ubicado en el borde inferior de la viga RC superior a 1600 mm de la base de la pared (transductor # 2 en la Figura. 2c). La relación de deriva se calculó con el desplazamiento del haz superior (obtenido del transductor #2 en la Figura. 2c) dividido por la distancia a la base (1600 mm).

## 2.6 Relaciones carga-desplazamiento

Las respuestas carga-desplazamiento medidas para los seis muros probados se muestran en la Figura 3. Los puntos de máxima resistencia en cada dirección de carga están marcados con círculos. La Tabla 2 resume el tipo de falla, la resistencia máxima, la relación de desplazamiento a la resistencia máxima y la relación de desplazamiento final de cada muro. La tabla muestra los valores medidos en ambas direcciones de carga. Para muros con falla por fragilidad, la relación de deriva última se define igual a la relación de deriva a la resistencia máxima. Para muros con falla dúctil, la relación de deriva máxima se define como la relación de deriva en la cual la resistencia disminuye al 80% de la resistencia máxima.

## 3. RESULTADOS DEL ENSAYO

Tabla 2. Resultados del ensayo y resistencias calculadas

Muro	Tipo de Falla	Deriva en la carga de agrietamiento (%)	Carga de agrietamiento <sup>1</sup> (%)	Deriva en Resistencia máxima (%)	Resistencia Máxima (kN)	Deriva última (%)	Resistencia Última (kN)	Resistencia al corte ACI-318 (kN)	Resistencia al corte Carrillo-Alcocer (kN)
WSL1	Tensión Diagonal / Frágil	0.10	213	0.39 0.39	310 349	0.67 0.41	248 280	394	285
WSL2	Deslizamiento / Dúctil	0.10	161	0.57 0.38	220 233	0.75 0.58	176 186	394/313 <sup>2</sup>	285
WSL3	Tensión Diagonal / Frágil	0.05	102	0.61 0.53	408 471	0.88 0.65	326 378	449	323
WSL4	Tensión Diagonal / Frágil	0.10	179	0.34 0.55	265 403	0.50 0.92	212 323	346	252
WSL5	Tensión Diagonal / Dúctil	0.10	190	0.40 0.43	289 357	0.80 0.72	231 286	350	268
WSL6	Tensión Diagonal / Frágil	0.10	131	0.93 0.50	416 353	1.13 0.64	333 282	307	234

<sup>1</sup> La carga de falla para el muro WSL1 a WSL6 se estimó a partir de la deriva en la falla y la rigidez inicial

<sup>2</sup> Para WSL2 se proporcionan la resistencia al corte (394 kN) y la resistencia al corte por deslizamiento (313 kN).

El muro WSL2, con refuerzo perimetral reducido, se comportó de manera similar a los muros descritos hasta aproximadamente un 0,5% de coeficiente de deriva, donde alcanzó su máxima resistencia. La resistencia máxima del muro WSL2 fue un 31% inferior a la del muro de referencia WSL1. Para desviaciones superiores al 0,5 %, se midió la degradación de la resistencia alcanzando aproximadamente el 50 % de la resistencia máxima con una relación de deriva del 1,5 %. En este rango, se observó deslizamiento entre el muro y la base, no identificándose fractura de barra.

Los muros WSL5, WSL6 se detallaron con DB tradicional como refuerzo de alma. Las características de la respuesta carga-desplazamiento de estos muros son las siguientes:

- 1) La rigidez inicial permanece invariable hasta la carga que produce la primera fisura diagonal significativa.
- 2) Después de la fisuración, la rigidez secante disminuye y se observa cierto punzonamiento.
- 3) La carga máxima se alcanza con una deriva de alrededor del 0,5% (Tabla 2).
- 4) La degradación de la fuerza se observa en ciclos con amplitud más allá de la fuerza máxima.

Las pruebas de los muros WSL5 terminaron con una relación de deriva de aproximadamente 1,5 % y la resistencia residual fue superior al 60 % de la resistencia máxima. No se observó fractura de las barras horizontales; tampoco hubo diferencia en la respuesta global debido a la diferente relación de refuerzo del alma o al espesor de la pared (excepto por la diferencia esperada en la resistencia máxima). La respuesta del muro WSL6 muestra pérdidas repentinas de resistencia al 0,5 % de deriva en el tercer cuadrante y al 0,9 % de deriva en el primer cuadrante. Las pérdidas de resistencia en WSL6 se atribuyen a la fractura del refuerzo del alma, que se produjo debido a la relación reducida de refuerzo del alma en el muro WSL6 en comparación con los muros WSL5. La fractura del refuerzo del alma en WSL6 muestra la importancia de proporcionar un refuerzo mínimo del alma en muros de CR con DB para evitar la fractura de la barra.

### 3.1 Modos de fallo

Se observó un modo de falla por tensión diagonal en todos los muros probados con grietas diagonales concentradas en ambas direcciones, con la única excepción de WSL2. Sin

embargo, el tipo de refuerzo fue relevante en la falla observada. Los muros reforzados con WWR (WSL1, WSL3, WSL4) exhibieron falla frágil debido a la fractura repentina del refuerzo horizontal. En contraste, los muros con DB mostraron una falla dúctil sin fractura de barra (excepto el muro WSL6 con refuerzo de alma reducido), y con una leve degradación de la resistencia.

### 3.2 Ductilidad y resistencia

La resistencia máxima de los muros varió dependiendo de la configuración del muro. Para cada muro se midieron los valores máximos de resistencia en el primer y tercer cuadrante. La diferencia entre la resistencia en ambos cuadrantes fue de 18% en promedio. La resistencia máxima más alta y más baja se midió para los muros WSL3 (471 kN) y WSL2 (233 kN), respectivamente. La mayor relación de refuerzo del alma del muro WSL3 aumentó la resistencia, pero experimentó el mismo tipo de falla por fragilidad que el WSL1.

La resistencia reducida de WSL2 fue causada por la falla por cortante deslizante, que fue inducida por el refuerzo límite inferior inesperadamente, la fuerza de WSL4 con refuerzo reducido fue mayor que la de WSL1. Este comportamiento inesperado también se observó en muros con barras deformadas donde WSL6, con refuerzo reducido, mostró mayor resistencia que WSL5, pero WSL6 experimentó un modo de falla frágil debido a la fractura de la barra. Las posibles explicaciones de este comportamiento son la variabilidad inherente de la resistencia a la corte proporcionada por el hormigón y las posibles diferencias en la resistencia del hormigón de los muros, lo que conduce a una mayor capacidad de corte a pesar de la menor relación de refuerzo.

## 4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

Esta sección analiza los efectos del tipo de acero, la relación de refuerzo, así como la resistencia y ductilidad del muro, tomando en cuenta los resultados experimentales obtenidos.

### 4.1 Efecto del tipo de acero y la relación de refuerzo

La configuración del refuerzo y el tipo de acero fueron relevantes en varios aspectos de la respuesta de los muros. Las siguientes observaciones se pueden extraer de los muros ensayados:

1) La comparación entre los muros WSL1 (muro de referencia) y WSL2 destaca la influencia del refuerzo de contorno en la resistencia del muro. El muro WSL2 tenía un tercio del refuerzo de borde de WSL1 y mostró la resistencia al corte más baja de todos los muros probados debido al modo de falla por corte deslizante.

2) La comparación de los muros WSL1, WSL4 contra los muros WSL5, WSL6 muestra las diferencias entre muros con WWR y DB. En cuanto a la fuerza, no se observaron diferencias significativas. Los muros con DB mostraron en promedio una resistencia 3% mayor que sus contrapartes con WWR, a pesar de la menor resistencia a la fluencia del DB. En términos de deriva, las proporciones de resistencia

máxima y deriva máxima fueron en promedio 29% y 91% mayores para muros con DB. Además, se observó una falla dúctil en muros con DB (excepto WSL6) a diferencia del tipo de falla frágil observada para muros reforzados con WWR.

3) El efecto de aumentar la relación de refuerzo del alma en el comportamiento del muro se observa al comparar el muro WSL1 con el muro WSL3. El muro WSL3 tiene una relación un 30 % mayor que el WSL1, y su resistencia máxima y deriva última aumentaron un 35 % y un 56 %, respectivamente. No obstante, ambos muros mostraron una falla diagonal frágil, lo que sugiere que el alma de acero adicional no compensa la falta de ductilidad del WWR.

4) Las comparaciones entre los muros WSL1 y WSL4 y entre WSL5 y WSL6 muestran que la resistencia de los muros con refuerzo de alma reducido fue mayor que la de sus contrapartes. Estos resultados fueron inesperados y se atribuyen al hecho de que solo se probó un espécimen para cada caso. Sin embargo, a pesar de la mayor resistencia observada en el muro WSL6 (en comparación con WSL1), este espécimen fue el único reforzado con DB que tuvo una falla frágil. Por el contrario, el muro WSL5 también detallado con DB pero con una mayor relación de refuerzo del alma experimentó una falla dúctil. Estos hallazgos confirman la importancia de proporcionar una relación mínima de refuerzo del alma para evitar la falla por fragilidad en los muros de hormigón armado.

### 4.2 Cálculo de la resistencia

El Capítulo 18 de ACI-318 provee las ecuaciones necesarias para calcular la resistencia al corte de los muros de concreto reforzado en estructuras que deben ser capaces de resistir terremotos. Asimismo, Carrillo & Alcocer (2011) propusieron ecuaciones para estimar la resistencia al corte de muros delgados de CR reforzados con DB y WWR. Las resistencias calculadas se resumen en la Tabla 2, donde se usaron las propiedades del material medido para calcular estas resistencias. Las ecuaciones de ACI-18 sobreestiman la resistencia máxima promedio medida de todos los muros excepto WSL6. Las resistencias calculadas con ACI-318 son en promedio 1,04 veces las resistencias experimentales promedio de todos los especímenes de prueba, excepto el WSL2, que mostró un modo de falla por cortante deslizante. Las resistencias calculadas con las ecuaciones propuestas por Carrillo & Alcocer (2011) son inferiores a las calculadas con el ACI-318 (2014). En promedio, las resistencias calculadas mediante las ecuaciones de Carrillo y Alcocer son 0,77 veces las resistencias experimentales promedio. Por lo tanto, se concluye que las ecuaciones del ACI-318 predijeron la resistencia de los muros ensayados con mayor precisión que las propuestas por Carrillo y Alcocer. Se debe mencionar que las resistencias obtenidas con las ecuaciones de Carrillo & Alcocer (2011) tienen otras características y fueron obtenidas bajo otras circunstancias.

## 5. CONCLUSIONES

Los muros de hormigón armado de estructuras de baja altura en América Latina han demostrado un comportamiento sólido en los últimos terremotos severos. Sin embargo, el

método de diseño utilizado puede no ser el óptimo, ya que es el mismo método utilizado para el diseño de edificios altos. En este artículo, se presentan y analizan los resultados de seis pruebas a escala 1:1 realizadas en muros delgados de concreto armado con refuerzo central único. El objetivo es reproducir el comportamiento sísmico de las viviendas construidas con este tipo de refuerzo y examinar la influencia de la cantidad y tipo de acero en dicho comportamiento. Para ello, se sometieron los muros a una carga lateral cíclica con desplazamiento controlado. Las conclusiones más importantes de este estudio son las siguientes:

En la investigación, se diseñaron muros de hormigón de acuerdo al código ACI-318 (2014) y al Capítulo 11 como muros ordinarios. Todos los muros fallaron por cortante, que era lo esperado, excepto uno que falló por deslizamiento. Este muro tenía un 67% menos de acero de borde en comparación con el muro de referencia WSL1. La falla en los muros de hormigón armado con malla de alambre soldado se debió a la fragilidad causada por la capacidad limitada de elongación de la malla. Esto resultó en la ruptura de las retículas horizontales y verticales de los muros. Por lo tanto, para evaluar el desempeño sísmico de los muros con refuerzo de corte, se debe considerar que la deriva última es igual a la deriva de la resistencia máxima al corte, como lo propusieron Carrillo y Alcocer en 2012.

El muro WSL1, que tuvo una disminución en el refuerzo de borde, mostró una resistencia un 50% mayor que el muro WSL2. Por otro lado, aumentar el acero de refuerzo en un 30% en el muro WSL3 aumentó su resistencia en una proporción similar. Reducir el acero de refuerzo en un 25% en el muro WSL4 aumentó su resistencia en un 16% más que la del muro WSL1. El muro WSL5 con acero tradicional fue más dúctil que el muro WSL1 con malla electrosoldada, pero ambos tuvieron una resistencia máxima similar. En los ensayos con muros de hormigón armado con acero reducido (WSL4 y WSL6) se observó una mayor capacidad de deformación en comparación con los muros con acero normal (WSL1 y WSL5). Al comparar los muros construidos con varillas tradicionales (WSL5 y WSL6), se determinó que el muro WSL5 presentó un mejor desempeño, ya que no se observó pérdida de recubrimiento. En cambio, en el muro WSL6, donde las varillas de la malla estaban espaciadas en mayor medida, se desprendieron grandes pedazos de hormigón.

El tipo de refuerzo utilizado en los muros de hormigón armado, ya sea mallas de alambre soldado o varillas tradicionales, tiene un impacto significativo en su capacidad de desplazamiento. Sin embargo, la cantidad de acero de refuerzo no parece tener un efecto en la disipación de energía, ya que se observó una energía disipada promedio del 27% en todos los muros. Se emplearon tres metodologías para estimar la resistencia al corte de los muros, y la ecuación para muros especiales del ACI-318 se identificó como la mejor estimación. Sin embargo, se observó que con esta ecuación se obtuvo resultados 13% mayores a los resultados experimentales promedios. Para la construcción de estructuras de baja altura, se recomienda el uso de muros con malla central única, no obstante, en casos en los que se requiere una mayor capacidad de deformación y ductilidad, se sugiere utilizar refuerzo convencional.

## REFERENCIAS

- ACI-318. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14)*.
- Almeida, J. (2015). *Análisis Experimental de muros delgados de hormigón armado para vivienda de baja altura. (Publicación N° 667685)*. [Tesis de postgrado, Pontificia Universidad Católica de Chile] DSpace. <https://repositorio.uc.cl/dspace/items/375acf54-9dff-4088-9e3f-6c7e2dacda63>
- Blandon, C. (2018). Response of thin lightly-reinforced concrete walls under cyclic loading. *Engineering Structures*, 176, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.089>
- Carrillo, J., & Alcocer, S. (2011). Comportamiento a cortante de muros de concreto para viviendas. *Revista de ingeniería Sísmica*, No. 85 103-126. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-092X2011000200004](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2011000200004)
- Carrillo, J., & Alcocer, S. (2013). Experimental investigation on dynamic and quasi-static behavior of low-rise reinforced concrete walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(5): 635-652. <https://doi.org/10.1002/eqe.2234>
- Carrillo, J., Lizarazo, J., & Bonett, R. (2015). Effect of lightweight and low-strength concrete on seismic performance of thin lightly-reinforced shear walls. *Engineering Structures*, 93, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.022>
- Gonzales, H. (2012). Seismic performance of buildings with thin RC bearing walls. *Engineering Structures*, 34, 244-258. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.10.007>
- Hube, M., Almeida, J., Santa María, H., López, M., Arroyo, O., & Vargas, A. (2020). Seismic performance of squat thin reinforced concrete walls for low-rise constructions. *Earthquake Spectra*, 36 (3), 1074-1095. <https://doi.org/10.1177/875529302090684>
- Luna, B. N. (2015). Seismic Behavior of Low-Aspect-Ratio Reinforced Concrete Shear Walls. *ACI Structural Journal*, 112(5): 593-604. <https://doi.org/10.14359/51687709>
- Mejia. (2019, Agosto 9). *World Housing Encyclopedia*. World Housing Encyclopedia: <http://db.world-housing.net/building/109/>
- Quiroz, L. M. (2013). Cyclic behavior of thin RC Peruvian shear walls: Full-scale experimental investigation and numerical simulation. *Engineering Structures*, 52, 153-167. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.033>
- Rosso, A. (2016). Out-of-plane behaviour of reinforced concrete members with single reinforcement layer subjected to cyclic axial loading: beam-column element simulation. <https://www.nzsee.org.nz/db/2016/Papers/O-63%20Beyer.pdf>

Santa-María, H. (2017). Development of national and local exposure models of residential structures in Chile. *Natural Hazards*, 86: S55–S79. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2518-3>

## BIOGRAFÍAS



**Javier, Almeida Navarrete**, Profesor Ocasional en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad UTE, Profesor Invitado en la facultad de Arquitectura Artes y diseño en la Universidad Indoamérica. Especialidad: Diseño y análisis sísmico de elementos de hormigón

armado y Acero. Análisis experimental de estructuras. Comportamiento sísmico de edificios. Riesgo sísmico. Magister en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Ecuador.



**Majid, Khorami**, Profesor Auxiliar en la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad UTE. Especialidad: UHPFRC: Hormigón de ultra alta resistencia con fibras, Inteligencia Artificial, Conector de corte, materiales nuevos. Doctor of Philosophy, Universidad Politécnica de Valencia.




**Matías, Hube**, Profesor Asociado en Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica en la Pontificia Universidad Católica de Chile. Especialidad: Diseño y análisis sísmico de elementos de hormigón armado. Modelación

no-lineal de estructuras utilizando.



# Parametric Research of Granular Flow in Silos: A Micro-Mechanical Approach

Rivera, David<sup>1,2,\*</sup> ; Ávila, Alvaro<sup>2</sup> ; Ávila, Carlos<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>University of Exeter, Department of Engineering, Exeter, United Kingdom

<sup>2</sup>Universidad UTE, Departamento de Ciencias, Ingeniería y Construcción, Quito, Ecuador

**Abstract:** The study of granular materials stored in silos is traditionally conducted with postulates and definitions of the continuum mechanics. Specific interactions of the granular matter into the silo (e.g. contact forces or velocity) are not quantified in this theory. Considering this limitation, the purpose of this research is to study the granular flow of corn particles and their interactions during the silo discharge by means of micro-mechanical methodologies i.e., the discrete element method (DEM). DEM is a numerical technique that allows to model granular assemblies based on their mechanical, physical properties and interactions. In this study, assemblies constructed with representative particles of corn have been developed. Velocity profiles, stresses in the silo walls, force chains and deformations of the bulk are the generated outcomes after running the simulation cases. In conclusion, the repose angle of the stored material plays a starring role in the mechanical response of the granular matter in the silo. Wall stresses, force chains and deformations increased when the silo hopper is lower than the repose angle of the corn granular assembly (27°).

**Keywords:** Corn; discrete element method; granular flow in silos; repose angle; hopper angle

## Estudio Paramétrico del Flujo Granular en Silos: Una Aproximación Micro-Mecánica

**Resumen:** El estudio del material granular almacenado en silos se lo ha realizado habitualmente con las formulaciones de la mecánica del medio continuo y los elementos finitos. Sin embargo, existen diversas limitaciones al cuantificar la interacción entre partículas y su comportamiento individual. Por lo tanto, se plantea la utilización del método del elemento discreto (DEM) para evitar las limitaciones intrínsecas de modelos continuos en el análisis del flujo de maíz (materia granular) durante los procesos de descarga en silos. El elemento discreto es una eficaz herramienta mecánico-computacional que permite modelar ensambles granulares al considerar sus propiedades físicas y mecánicas tanto al nivel individual como de conglomerado. En esta investigación, los ensambles diseñados son representaciones numéricas de granos de maíz almacenado en silos. Los resultados de las simulaciones se cuantifican en términos de perfiles de velocidad, cadenas de fuerza, esfuerzos en las paredes del silo, y deformaciones del conglomerado granular. Uno de los principales hallazgos de esta investigación es la importancia del ángulo de reposo del maíz en la descarga de silos ya que los esfuerzos, deformaciones y cadenas de fuerza varían dependiendo de este valor (27°).

**Palabras clave:** Maíz; método del elemento discreto; flujo granular en silos; ángulo de reposo; ángulo de la tolva

### 1. INTRODUCTION

Granular materials are assemblies constructed with particles whose behaviour differ at single and conglomerate level depending on the influencing environment (Goodman & Cowin, 1972; Savage, 1979). At static conditions the material can be considered as solid, but, whether the particle conglomerate moves, its behaviour is considered as fluid (Elaskar & Godoy, 2001). Productive processes in industry (e.g. pharmaceutical, mining or agriculture) handle granular

materials as the main source of production (Hill, 2012). More than 50% of the raw materials around the world are constructed or distributed in granular bulks (Boac, 2010; Gustafsson, 2008). In addition, more than 10% of the global energy consumption is utilised whilst transporting and processing them (Ishkov, 2016). Particularly, storing the material for long time under adequate conditions (e.g. temperature and humidity) have led to design reservoirs entitled as 'Silos'. Although these vessels have been largely

\*er423@exeter.ac.uk

Recibido: 04/01/2023

Aceptado: 25/07/2023

Publicado en línea: 14/11/2023

10.33333/rp.vol52n2.04

CC 4.0

studied, the complex interactions in the granular flow at micro and macro-scale have not been fully understood yet.

The contemporary design of silos applies formulations of the continuum mechanics to simplify the particle interactions in it (Wang et al., 2015). Wall pressure profiles, dynamic meshing (i.e. granular flow modelled as fluid) and flow patterns (i.e. funnel or mass flow (Mankoc et al., 2007; Rotter et al., 1998)) are typical assumptions implemented in continuum models (Brown, 2007; Wang et al., 2015). Furthermore, constitutive models (e.g. Drucker-Prager or Frictional contact) are used to model the elastoplastic interactions occurring within the silo (Elaskar & Godoy, 2001; Wieckowski, 2003). Stress and strain profiles in both the structural walls and assumed fluid are the outcomes of these models. This information is helpful when selecting the thickness and type of material to build the silo, however, realistic predictions or estimations of the granular flow during the silo discharge are not clearly described. For instance, jamming, which can be defined as a sudden stop of particle flows (Zuriguél et al., 2005), is a complex process to explain uniquely by finite formulation. Under these circumstances, the Discrete Element Method (DEM) appears as a feasible alternative to elucidate the complex interactions into the silo at micro scale (Cundall & Strack, 1979).

The robustness of the DEM compared with other formulations is its flexibility to consider each component of the granular assembly as a unique solid element that interacts with their surrounding neighbours (e.g. particle or walls) (Andrade et al., 2012; Cundall & Strack, 1979; O'Sullivan, 2011; Queteschiner & Kloss, 2010). Bulk properties (e.g. friction coefficient) or individual properties (e.g. density) are defined whilst modelling complex granular assemblies (Baars, 1995). DEM-based schemes analyse both collisions among particles and between particle and walls. The outcomes of DEM simulations are contact forces between the interacting elements, position and velocity of each particle (Cundall & Strack, 1979). Considering the benefits of DEM, investigations into further describing the granular flow in silos have been undertaken. Parafiniuk, Molenda and Horabik (Parafiniuk et al., 2013) analysed the granular flow in silos under two considerations dry and wet conditions. They found that their experimental results agreed with the numerical simulations when slow flow rates are modelled. Another interesting analysis to predict the relation between the flow rate and the silo discharge orifice was performed by Zhou et al. (Zhou et al., 2017). It was numerically predicted that both conditions interact in the volume fraction and particles velocity. In this research, 2D assemblies were applied to compare with 3D laboratory experiments. Other recent investigations limited their studies to analyse how the silo hopper or the bulk packing fractions alter the flow rate during the discharging process (Benyamine et al., 2017; Tan et al., 2016).

The purpose of this research was to develop micro-mechanical models to resemble the discharge of corn particles stored in silos to (1) identify the influence of the hopper geometry in the particle kinematics and (2) the geometry influence in the granular flow, particularly, in terms of the stresses-strains in the discharging region. The achievement of these objectives

will increase our understanding of the complex interactions between the granular matter and the silo walls.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Discrete Element Method

Granular assemblies based on the DEM will be elaborated to model the transient interaction of particles during the discharge of silos. This methodology utilises the postulates of the Newton's Law to quantify grains interactions (O'Sullivan, 2011). The equation of motion (Equation 1) describes the interacting forces in granular arrangements:

$$m_p \vec{u}_p = \sum_{c=1}^{Nc,p} \vec{F}_{pc}^{con} + \sum_{j=1}^{Nc,p} \vec{F}_{pj}^{non-con} + \vec{F}_p^f + \vec{F}_p^{app} \quad (1)$$

**Where:**

$m_p$ : mass of the particle

$\vec{u}_p$ : acceleration of each particle

$\vec{F}_{pc}^{con}$ : contact forces between particles and their neighbours

$\vec{F}_{pj}^{non-con}$ : non-contact forces with the particles

$\vec{F}_p^f$ : gravitational force

$\vec{F}_p^{app}$ : applied forces onto a particle including the contact particle-wall

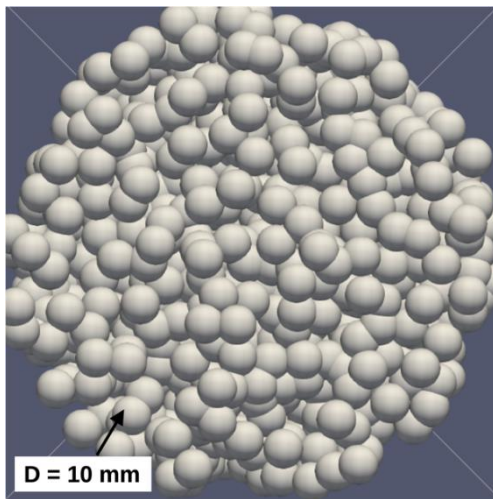
This mathematical expression considers both the individual qualities of the particles and their interacting states. In addition, the rotational and translational motions of each element are also considered. To assess the contact among particles ( $\vec{F}_{pc}^{con}$ ), formulations that analyse the contribution of each element in the system were proposed (Cundall & Strack, 1979; O'Sullivan, 2011; Queteschiner & Kloss, 2010). The soft sphere model takes advantage of the Hooke's law and the Hertz contact model to characterise the overlap between interacting particles by means of the contact stiffness, Young's Modulus (E) and Poisson ratio ( $\nu$ ) (Babié, 1988; O'Sullivan, 2011; Queteschiner & Kloss, 2010). Moreover, the soft-sphere model used in this study depends on a rheological model composed of a linear spring-dampshot (Queteschiner & Kloss, 2010). The model includes a tangential spring to compute the tangential force during the relative tangential motion between particles. The tangential force is directly influenced by the Coulomb frictional limit that depends on the coefficient of friction between particles ( $\mu_{corn}$ ) or between the particle and contact surface ( $\mu$ ) (Queteschiner & Kloss, 2010). It is worth mentioning that the interaction occurs at short instants of time, based on this, the dispersed energy at each contact is assumed to be transmitted by Rayleigh-waves (TR) (Queteschiner & Kloss, 2010). This formulation (TR) considers the density ( $\rho$ ), particle radius (R), Poisson's ratio, and shear modulus (G) of the granular media; shown in Equation (2). The solution of this equation (ranges around 0.1TR – 0.3TR) is used to estimate the time step ( $\Delta t$ ) of the DEM problem case.

$$T_R = \pi R \frac{\left(\frac{\rho}{G}\right)^{\frac{1}{2}}}{(0.1632\nu + 0.8766)} \quad (2)$$

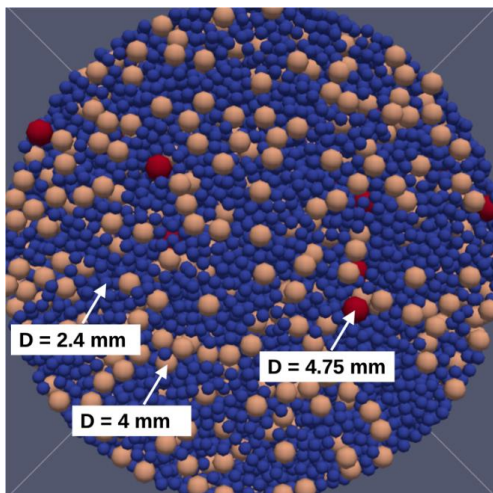
The previous information is feasible to handle in small conglomerates with a limited number of particles. However, real-life problems or even scale models group thousands of interacting elements increasing the number of contacts in the assembly. Because of this, the mathematical background which defines the DEM is implemented in numerical algorithms to manage relatively large granular assemblies (25,000 particles). In this research, the LIGGGHTS open-software is the computational tool utilised to model the silos' discharge.

2.2. Granular assemblies

Granular assemblies are sets of particles that resemble the real granulometric distribution of granular matter in a specific region. Based on this, two particle distribution alternatives which are monodisperse and polydisperse assemblies can be developed. Monodisperse models are constructed with particles of the same size; shown in Figure 1(a). On the other hand, granular elements of different sizes conform a polydisperse assembly, see Figure 1(b). This study developed polydisperse models that resemble corn stored in silos.



(a)



(b)

Figure 1. (a) monodisperse model constructed with iron ore pellets particles (diameter = 10 mm) and (b) polydisperse model built with corn

2.3. Particle and conglomerate properties

In this study, particles of corn were modelled because of the importance of this granular material in agriculture and productive processes. The definition of granular assemblies in DEM is accomplished on the basis of their individual and conglomerate properties. For corn, there are diverse studies investigating its mechanical properties at micro and macro-scale (Ileleji & Zhou, 2008; Moya et al., 2013). Each corn particle was modelled as sphere in order to reduce computational costs and increase the number of interacting elements in the assembly. The granular assemblies generated were polydisperse considering the granulometry of corn. The properties of the granular assembly and granulometry are shown in Table 1 and Table 2, respectively. To determine the repose angle of corn, we conducted an experimental test following the methodology used in a previous study by Perazzo et al. (2019), which investigated the repose angle of copper ore. The results revealed that the repose angle of corn was 27°.

Based on the experimental results and in line with published data (Moya et al., 2013), we have determined the friction coefficient between corn particles to be 0.51 ( $\mu_{\text{corn}} = 0.51 = \tan(27^\circ)$ ). Similarly, for the friction coefficient between corn and the concrete walls of the silo, the chosen value is 0.52, also in accordance with published data (Moya et al., 2013).

Table 1. Properties of the granular assembly (Boac, 2010; Fernández, 2010; Ileleji & Zhou, 2008; Lira & Pina, 2011; Moya et al., 2013)

	Particle level	
	Corn	Concrete
Young's Modulus (MPa)	298	50,000
Poisson's ratio	0.3	0.2
	Conglomerate level	
	Corn – Corn	Corn – Concrete
Restitution coefficient	0.205	0.700
Friction coefficient	0.510	0.520

Table 2. Corn granulometry

Sieve size	Aperture (microns)	Retained weight (g)	% Retained
1/2	12,700	0.00	0.00
3/8	9,500	11.60	2.32
5/16	7,940	186.35	37.27
4	4,750	301.25	60.25
8	2,360	0.80	0.16
Total		500.00	100.00

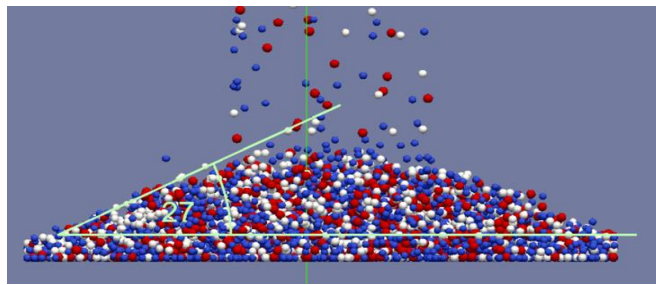
2.4. Characterisation of the silo

The silo walls were numerically characterised according to their mechano-physical properties (e.g. restitution coefficient particle and wall). In this research, silos constructed in concrete were modelled because they are widely used in industry for storing granular materials; particularly, corn. Table 1 summarises the relevant properties utilised to define silos of concrete. In geometrical terms, to identify the interaction of the granular discharge flow and the silo walls, several geometries with different hopper inclination were

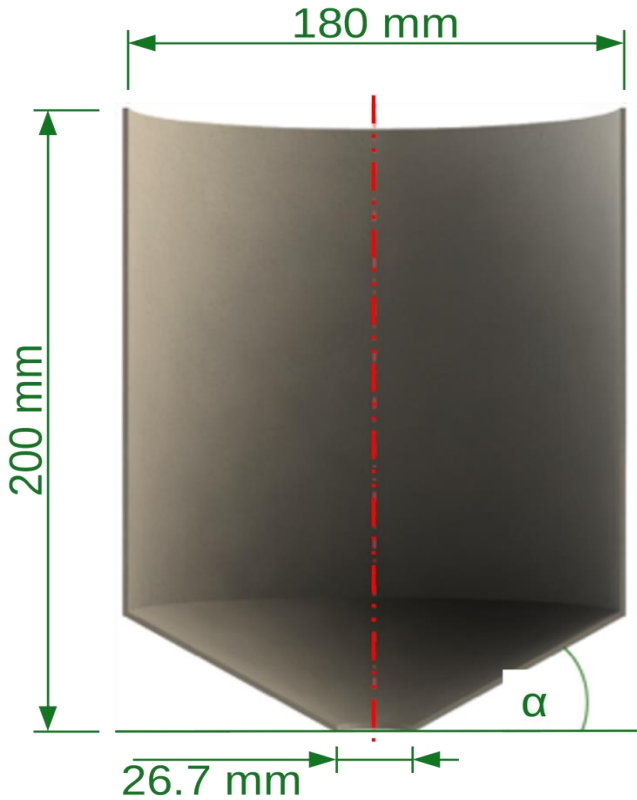
designed; shown in Figure 2(a). The baseline to construct the silo chute was the repose angle of the stored media (i.e. 27° for corn); see Figure 2(b).

### 2.5. Computational design

Considering the high computational costs that entails modelling complex arrangements by means of the Discrete Element Method, the size of the container and number of particles has been limited. 25,000 corn particles were stored in each study case and various silo geometries were designed to evaluate the granular flow in it. In order to guarantee convergence and stability in the numerical method, the timestep was assigned as  $1 \times 10^{-6}$  sec. This value was useful to define the total discharging time of the silo; approximately, 40 sec. The simulation cases were run in a serial computer with a multicore processor of 2.73 GHz. The simulation time varied between 70 to 100 h. Considering that the algorithm to generate the granular assemblies insert corn particles into the silo randomly, 3 tests per silo condition were implemented.



(a)



**Figure 2.** Characterization of the granular assembly (a) repose angle of corn and (b) geometry of the silo

### 2.6. Assessment of deformations in the granular assembly

Assessment of deformation in the granular corn assembly was performed in the boundaries of the system due to the inherent limitations in the soft sphere model that make challenging the computation of overlapping distances among contacting particles. Two mathematical approaches, which are the convex hull and Delaunay triangulation, were used to identify the boundaries (i.e. control volume) of the corn assembly stored in the silo. The convex hull identified the particles that delimited the control volume, and the Delaunay triangulation identified the contacting particles at the convex hull. Computation of the average deformation ( $\bar{\epsilon}$ ) consists of the vectorial product of the average displacements ( $\mathbf{u}^n$ ) of the particles (i, j, k) of each triangle identified by the convex hull and Delaunay triangulation and the normal vector ( $\mathbf{v}^n$ ) to the surface of each triangle (Avila & Andrade, 2012). This product is multiplied by the area ( $A^n$ ) of each triangle and divided by the volume of the convex hull (Equation 3).

$$\bar{\epsilon} = \text{sym} \left[ \frac{1}{V} \sum_{n=1}^N \mathbf{u}^n \otimes \mathbf{v}^n A^n \right] \quad (3)$$

After completing the evaluation of Equation (3), the average deformations were quantified in a tensor (Equation 4), which after evaluation of the first invariant ( $I_1$ ) and the second invariant of the strain deviator tensor ( $J_2$ ) allowed us to evaluate the volumetric changes (Equation 5), and angular deformation (Equation 7) of the corn assembly. The evaluation of  $J_2$  entails the calculation of the second Invariant ( $I_2$ ) by means of Equation 6.

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{12} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{13} & \epsilon_{23} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$I_1 = \epsilon_{ii} = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} \quad (5)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} \\ \epsilon_{13} & \epsilon_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{13} & \epsilon_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{23} & \epsilon_{33} \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$J_2 = I_2 - \frac{1}{3} I_1^2 \quad (7)$$

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The numerical experiments were designed to study the effects of the granular flow during the silo discharge. After concluding the simulations, it was determined that the nature of the granular flow was tubular as shown in Figure 3. Based on this, a cylindrical volume control was assigned in the region around the discharge hole to characterise the mechanical response of the assembly. Specifically, velocity profiles, stresses in the silo walls, average deformation and force chains among particles were evaluated.

The velocity profile identified after completing the simulation cases was identified as the funnel flow. This finding is

associated with the friction coefficient difference between the granular matter ( $\mu_{\text{corn}} = 0.51$ ) and the walls of the silo ( $\mu = 0.52$ ). The response of the particle assembly near to the silo walls appear to achieve static equilibrium; shown in Figure 4. This occurs due to the difference between the friction coefficients of the silo walls and corn.

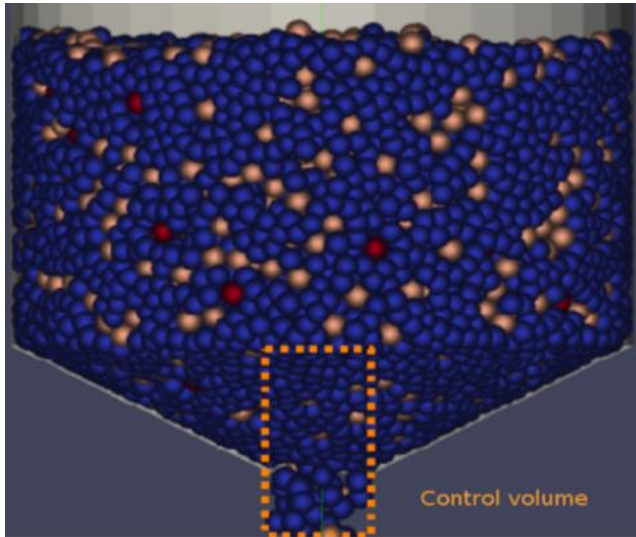


Figure 3. Funnel flow in the granular assemblies

3.1. Velocity profiles

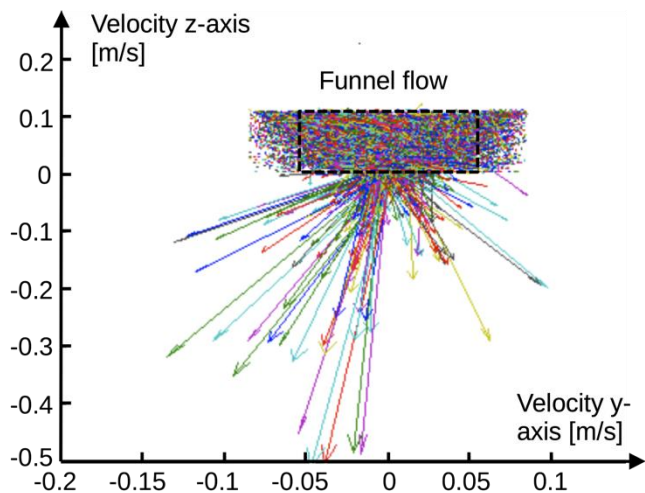


Figure 4. funnel flow during the discharge of the granular media stored in a silo with hopper

3.2. Shear stress and pressure in the walls

In **Error! Reference source not found.** is shown the comparison of the maximum shear stresses in the walls of the silo according to the hopper's angle. It is interesting to note that the repose angle ( $27^\circ$ ) appears to alter the trend in the shear stress magnitude. The maximum value occurred at this inclination (612 Pa,  $SD=140.1$  Pa). For the cases where the chute's angle was over  $27^\circ$ , the shear stress decreased. This effect could be associated with the gravity and particle-wall friction in the hopper's boundaries. Apparently, the inclination

of the discharging chute governs the magnitude of the shear stress in their walls.

The pressure in the silo's walls showed an increasing trend according to the inclination of the hopper's angle (Figure 6). The maximum pressure was achieved at a hopper's angle of  $35^\circ$  with an approximate pressure magnitude of 44.5 KPa,  $SD=8.9$  KPa. The lowest pressure was identified in the silo with a hopper angle of  $5^\circ$  ( $P = 15.31$  KPa,  $SD=3.8$  KPa). This behaviour differs with the outcomes of the shear stress where the magnitude was modified after reaching a maximum value at the chute inclination corresponding to the granular material repose angle.

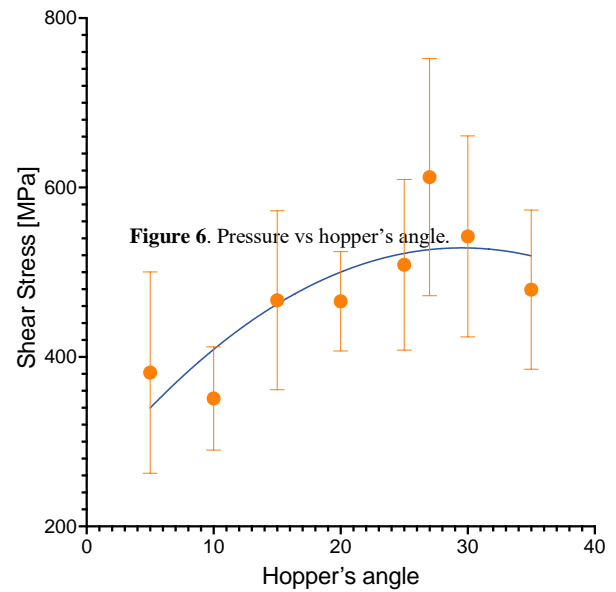


Figure 6. Pressure vs hopper's angle.

Figure 5. Shear stress vs hopper angle

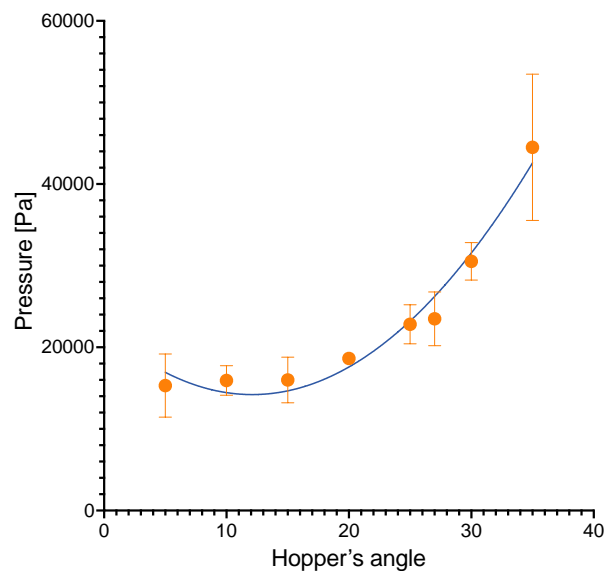


Figure 6. Pressure vs hopper angle

3.3. Average deformation in the stored granular media during its discharge.

As detailed in Section 2.6, the average deformation of the granular assemblies was quantified in terms of the principal invariant ( $I_1$ ) and the second invariant of the strain deviator tensor ( $J_2$ ). Both parameters were analysed in a control volume located in the zone of the discharging hole; shown in Figure 3.  $I_1$  is useful to identify the volumetric changes (length alterations) of the granular set. On the other hand, the shape changes were measured by means of the second main invariant ( $J_2$ ). Volumetric changes were the principal alterations registered during the discharge of the granular matter. The maximum  $I_1$  value was identified at a hopper angle of  $10^\circ$  ( $4.88 \cdot 10^{-5}$ ,  $SD=8.65 \cdot 10^{-5}$ ) and at hopper's angle similar to the repose angle of corn ( $3.78 \cdot 10^{-5}$ ,  $SD=1.66 \cdot 10^{-5}$ ). The trend in the data displayed that the volumetric deformations increased until reaching the repose angle of corn ( $27^\circ$ ). After this, the magnitude of  $I_1$  decreased for the other hopper's inclinations as shown in Figure 7. For the case of the shape changes, the maximum deformation occurred in the 5-degree chute inclination with approximately  $J_2$  of  $-3 \cdot 10^{-7}$ . Contrary to the hydrostatic strain ( $I_1$ ),  $J_2$  showed a decreasing tendency in the study cases, see Figure 8.

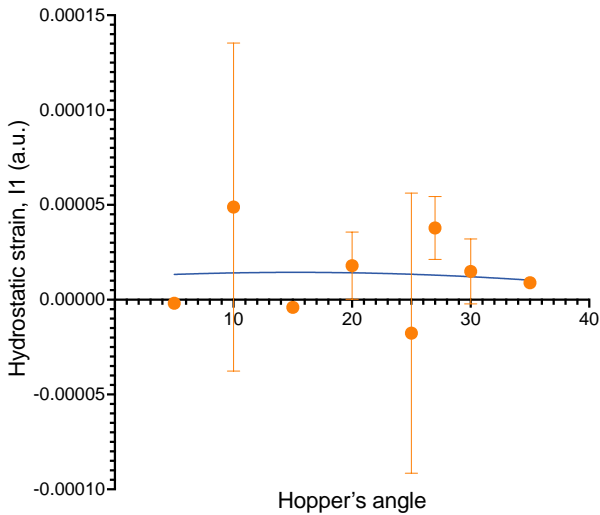


Figure 7. Hydrostatic strain,  $I_1$

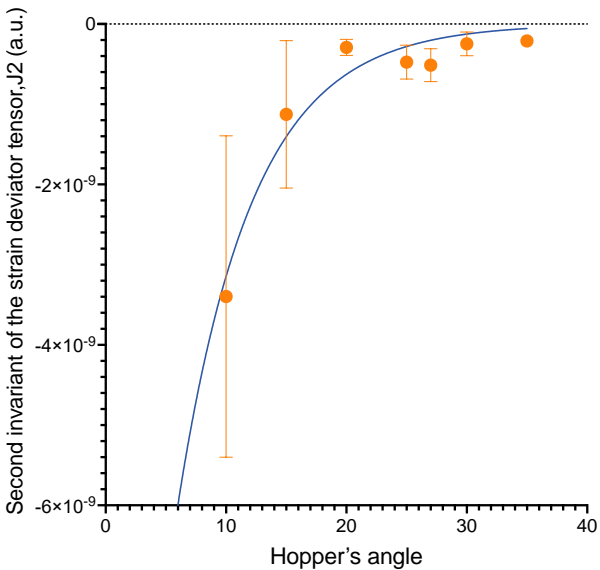


Figure 8. Second invariant of the strain deviator tensor  $J_2$

### 3.4. Force chains

The resulting force chains due to particles interaction entailed an increasing trend in their magnitudes until reaching the repose angle of corn ( $27^\circ$ ). The maximum reached value was 0.18 N. After this limit, the force chains reduce. This trend is similar to previous results such as shear stress and hydrostatic strain. The effects in the force chains are plotted in Figure 9. The force chains generated in the region surrounding the discharge hole are not strong enough to conform an arch and stop the corn flow.

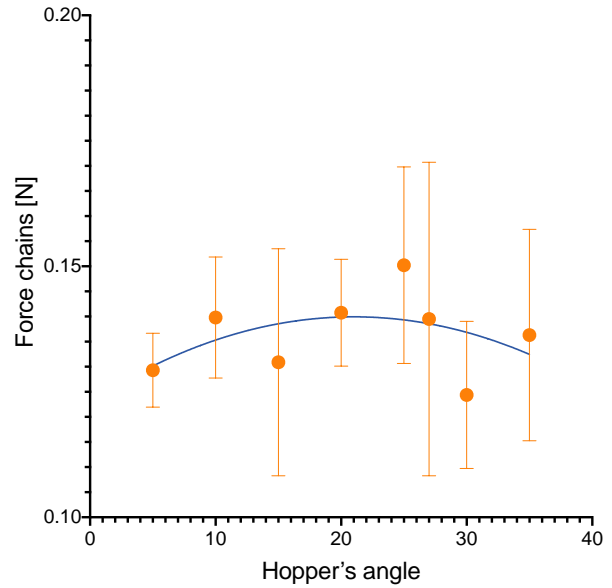


Figure 9. Force chains

### 3.5 Analysis of the results trend

An explanation to describe the results in the shear stress, deformation and force chains of the corn-granular assembly is shown in Figure 10. In this model, three grains of corn in contact were used to describe the influence of the hopper's angle in the granular assembly. After applying the sum of forces in each particle, Equations 8, 9 and 10 describe the contact forces between particles ( $F_n$ ) in terms of the hopper angle ( $\alpha$ ), the friction coefficient ( $\mu$ ), the particle weight ( $W$ ) and elasticity coefficient of the corn ( $k_n$ ).

$$F_{AB}(\sin(30) + \mu \cos(30)) + F_{BC} + \tan(\alpha) N = W \sin(\alpha) \quad (8)$$

$$(F_{AB} - F_{AC})(\mu \cos(30) + \sin(30)) = -W \sin(\alpha) \quad (9)$$

$$\delta = \frac{F_n}{k_n} \quad (10)$$

After replacing the hopper angle ( $\alpha$ ) with values below ( $\alpha < 27^\circ$ ), same ( $\alpha = 27^\circ$ ) and above ( $\alpha > 27^\circ$ ), it was found that the  $\alpha$  directly influences the micromechanical response of the corn-granular assembly. Shear stresses in the silo walls, force chains ( $F_n$ ) and deformation ( $\delta$ ) (Equation 10) trends of the

theoretical model agreed with the numerical results (Sections 3.3 and 3.4). The maximum magnitude of the force chains and deformations were computed when  $\alpha$  corresponds to the repose angle ( $\alpha=27^\circ$ ).

Limitations with this theoretical model included the number of particles studied (only 3 particles), the diameter of the silo was not modified, and this could modify the magnitude of the contact forces among particles, and acceleration of particles was also not included in the model.

governs the micro-mechanical response of the granular flow. The baseline of comparison for each study case was the repose angle of corn ( $27^\circ$ ). A remarkable trend in the shear stress, hydrostatic strain and force chains was that after reaching a maximum value in a silo with a hopper angle equal to the repose angle, their magnitudes registered reduction. For the pressure and main invariant ( $J_2$ ), there is an inverse relation with the chute inclination. In other words, whilst the hopper inclination increases, the pressure and  $J_2$  tended to decrease.

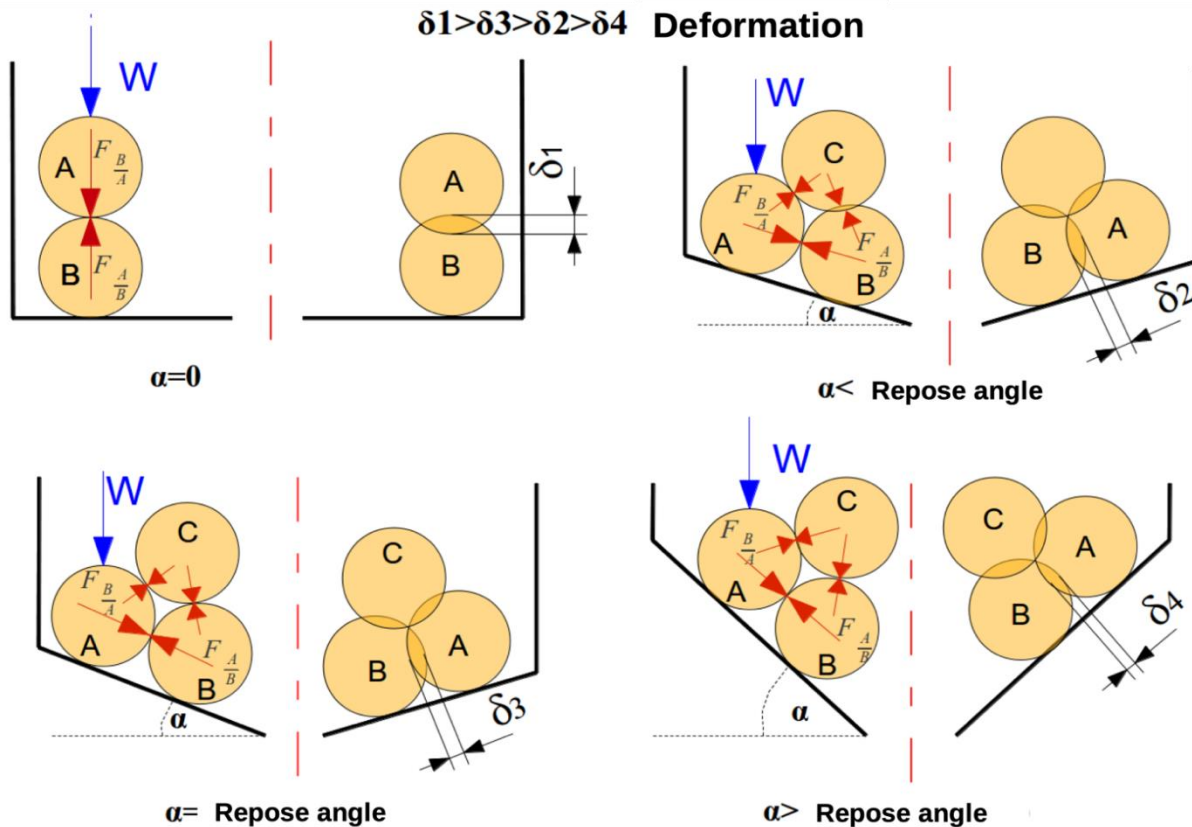


Figure 10. Description of the deformation of the corn-granular assembly based on different repose angles

#### 4. CONCLUSIONS

The discrete element method (DEM) is a powerful modelling alternative to quantify the micro-mechanical effects in granular assemblies. This numerical technique is useful to identify interactions among particles which cannot be assessed by means of continuous formulations. The generated models in this research were useful to distinguish the effects of the silo geometry during its granular discharge.

In terms of the granular flow into the silo, it can be distinguished that the ‘funnel flow’ type appeared in all the studied cases. In order to identify this effect, a control volume in the discharging zone was used to differentiate how the particles are moving. These observations are consistent with the agreement that the coefficient of friction between particles is lower than the coefficient of friction between particles and walls.

It is worth mentioning that the hopper inclination, which design is based on the repose angle of the granular media,

#### REFERENCES

Andrade, J. E., Lim, K.-W., Avila, C. F., & Vlahinić, I. (2012). Granular element method for computational particle mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 241–244, 262–274. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2012.06.012>

Avila, C., & Andrade, J. (2012). Advances in multiscale modeling and characterization of granular matter. *Procedia IUTAM*, 3, 157–171. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2012.03.011>

Baars, S. Van. (1995). *Discrete element modelling of granular materials* [Delft University of Technology]. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A9ccd2776-6cd4-4536-b827-7feb49fda7bb>

Babić, M. (1988). *Discrete Particle Numerical Simulation of Granular Material Behavior* [Clarkson University]. <https://lin-web.clarkson.edu/~hhshen/teaching%20links/DEM%20document.pdf>

- Benyamine, M., Aussillous, P., & Dalloz-Dubrujeaud, B. (2017). Discharge flow of a granular media from a silo: effect of the packing fraction and of the hopper angle. *EPJ Web of Conferences*, 140(January), 03043. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714003043>
- Boac, J. M. (2010). *Quality changes, dust generation, and commingling during grain elevator handling* [Kansas State University]. <https://krex.k-state.edu/bitstream/handle/2097/2373/JosephineBoac2010.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Brown, J. (2007). *Numerical analysis of silo discharge* [LUND University]. <https://www.byggmek.lth.se/fileadmin/byggadmek/ik/publications/tvsm5000/web5151.pdf>
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47–65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- Elaskar, S., & Godoy, L. (2001). Simulación numérica del flujo de materiales granulares usando el concepto de estado crítico. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 17(1), 19–36. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/3382/RR171B.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fernández, D. (2010). *Determinación de parámetros utilizados en las simulaciones d.e.m.* [Universidad Politécnica de Madrid]. [https://oa.upm.es/10514/2/TESIS\\_MASTER\\_DANIEL\\_FERNANDEZ\\_LLANA.pdf](https://oa.upm.es/10514/2/TESIS_MASTER_DANIEL_FERNANDEZ_LLANA.pdf)
- Goodman, M. A., & Cowin, S. C. (1972). A continuum theory for granular materials. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 44(4), 249–266. <https://doi.org/10.1007/BF00284326>
- Gustafsson, G. (2008). *Simulation of iron ore pellets and powder flow using smoothed particle method* [Lulea University of Technology]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990053/FULLTEXT01.pdf>
- Hill, P. (2012). PACT: A Course in Particle and Crystallization Technology. *2012 ASEE Annual Conference & Exposition Proceedings, June*, 25.1020.1-25.1020.8. <https://doi.org/10.18260/1-2--21777>
- Ileleji, K. E., & Zhou, B. (2008). The angle of repose of bulk corn stover particles. *Powder Technology*, 187(2), 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.01.029>
- Ishkov, A. (2016). Energy-Efficient Devices for Transporting and Feeding Bulk Materials in the Construction Industry. *MATEC Web of Conferences*, 73, 02019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167302019>
- Queteschiner, D., & Kloss, C. (2010). *Discrete Element Method*. <http://calliope.dem.uniud.it/SEMINARS/ABSTRACT-SEMINARS/pres-queteschiner.pdf>
- Lira, C., & Pina, P. (2011). Granulometry on classified images of sand grains. *Journal of Coastal Research*, 1(64), 1697–1701. <https://www.jstor.org/stable/26482465>
- Mankoc, C., Janda, A., Arévalo, R., Pastor, J. M., Zuriguel, I., Garcimartín, A., & Maza, D. (2007). The flow rate of granular materials through an orifice. *Granular Matter*, 9(6), 407–414. <https://doi.org/10.1007/s10035-007-0062-2>
- Moya, M., Aguado, P. J., & Ayuga, F. (2013). Mechanical properties of some granular agricultural materials used in silo design. *International Agrophysics*, 27(2), 181–193. <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0084-9>
- O’Sullivan, C. (2011). *Particulate Discrete Element Modelling* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482266498>
- Parafiniuk, P., Molenda, M., & Horabik, J. (2013). Discharge of rapeseeds from a model silo: Physical testing and discrete element method simulations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 97, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.06.008>
- Rotter, J., Holst, J., Ooi, J., & Sanad, A. (1998). Silo pressure predictions using discrete-element and finite-element analyses. *The Royal Society*, 356(1747), 2685–2712. <https://doi.org/10.1098/rsta.1998.0293>
- Savage, S. B. (1979). Gravity flow of cohesionless granular materials in chutes and channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 92(1), 53–96. <https://doi.org/10.1017/S0022112079000525>
- Tan, Y., Xiao, X., Zheng, J., Jiang, S., & Gao, W. (2016). Effect of outlet diameter of cone-in-cone insert on silo flow pattern. 32, 82–87. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.19.011>
- Wang, Y., Lu, Y., & Ooi, J. Y. (2015). A numerical study of wall pressure and granular flow in a flat-bottomed silo. *Powder Technology*, 282, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.078>
- Wieckowski, Z. (2003). Modelling of silo discharge and filling problems by the material point method. *Task Quarterly*, 4(4), 22. <https://journal.mostwiedzy.pl/TASKQuarterly/article/view/2182>
- Zhou, Y., Lagréé, P. Y., Popinet, S., Ruyer, P., & Aussillous, P. (2017). Experiments on, and discrete and continuum simulations of, the discharge of granular media from silos with a lateral orifice. *Journal of Fluid Mechanics*, 829, 459–485. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.543>
- Zuriguel, I., Garcimartín, A., Maza, D., Pugnali, L. A., & Pastor, J. M. (2005). Jamming during the discharge of granular matter from a silo. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 71(5). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.051303>

## BIOGRAPHIES



**Edgar David, Rivera**, is a final year PhD student at the University of Exeter in the biomechanics of the human spine. He graduated with a master’s in biomedical engineering at Newcastle University after completing his dissertation in the numerical analysis of magnetic growing rods to correct the spinal deviation in children with scoliosis.

He has collaborated in various research projects not only in the biomechanics of the musculoskeletal system but also in experimental tests to characterise graphene-based elastomeric materials. Currently, he is a lecturer at Universidad UTE where



he teaches the modules of Linear Algebra and Thermodynamics.



**Alvaro, Ávila**, is a technician in the Department of Science, Engineering and Construction at the Universidad UTE. His research interests are characterising and developing of new construction materials. He collaborated in the development of the laboratory of Thermal Characterisation of the National Institute of Energy

Efficiency in Ecuador. In this project, he worked in the development of carbon-based materials to develop new generation technologies. He obtained his bachelor's degree in mechanical Engineer at Escuela Politécnica Nacional in Ecuador.



**Carlos, Ávila**, is a Professor at the Department of Science, Engineering and Construction at the UTE University in Quito Ecuador. In the past 15 years, his research focus has been on the development of numerical and computational models of materials and structures. His current research projects target the development of

meso-scale models for concrete and granular materials and the study of nanostructured materials in construction. He holds a Master and Doctoral degree from Gunma University-Japan and research positions at Northwestern University and Caltech – USA. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6979-1571>



# Principio de Certeza Máxima ( $\aleph_{max}$ ) Análisis Teórico de un Nuevo Invariante Probabilístico con Aplicaciones en el Estudio de Tormentas en Quito-Ecuador

Beltrán, Franklin<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> IDD.Consultores, Iddresearch.org, Quito, Ecuador

**Resumen:** Se expone una nueva invariante de tipo probabilístico denominada Certeza Máxima ( $\aleph_{max}$ ) maximizando el funcional Certeza ( $\aleph$ ) mediante cálculo variacional, equivalente al principio desarrollado por Euler-Lagrange en el campo determinístico conocido como *Mínima Acción*. Su aparición surge de manera natural al considerar la conservación de la Información que recibe y entrega un sistema probabilístico. El Invariante  $\aleph_{max}$ , asociado a una variable aleatoria continua  $T$ , equilibra la *función de Conocimiento*  $C(t)$ ; propia de cada función de densidad probabilística  $f(t)_{max}$ , y la *función de Información*  $I(t) = -\ln(f(t)_{max})$ . Se inicia demostrando  $\aleph_{max}$  para la función de distribución acumulada exponencial truncada y se amplía como principio para otras familias de distribuciones de probabilidad, tanto continuas como discretas, tanto acotadas como no acotadas. Cuando la variable aleatoria  $t$  tiene unidad de tiempo truncada en  $DT$ , la función de distribución acumulada  $P(t)_{max}$  obtenida es la curva en el tiempo más probable entre todas las posibles. La modelación de patrones de tormentas estocásticas en Quito-Ecuador mediante la Distribución Exponencial Cuadrática Truncada (con parámetro  $g=9,8$ ) se presenta como ejemplo de uso, entre otros.

**Palabras clave:** Certeza Máxima, Distribución Truncada, Invarianza, Mínima Acción, Tormentas en Quito, MIT-Q

## Maximum Certainty Principle ( $\aleph_{max}$ ) Theoretical Analysis of a New Probabilistic Invariant with Applications in the Study of Rainstorms in Quito-Ecuador

**Abstract:** A new probabilistic invariant named Maximum Certainty ( $\aleph_{max}$ ) is exposed finding the extremum of the Functional Certainty ( $\aleph$ ) with variational calculus, equivalent to the principle developed by Euler-Lagrange in the deterministic field known as *Least Action*. Its emergence comes naturally when regard the conservation of the Information received and delivered by a probabilistic system. The invariant  $\aleph_{max}$  associated to a random variable  $T$ , balances the *Knowledge function*  $C(t)$ ; of each probabilistic density function  $f(t)_{max}$ , and *Information function*:  $I(t) = -\ln(f(t)_{max})$ . It starts by proving  $\aleph_{max}$  for the truncated exponential cumulative distribution function and is extended as a principle to other probability distribution families, both continuous and discrete both bounded and unbounded. When the random variable  $T$  has units of time, truncated in  $DT$ , the cumulative distribution function  $P(t)_{max}$  obtained is the most probable time curve among all the possible ones. The modeling of stochastic storm patterns in Quito-Ecuador through the Truncated Quadratic Exponential Distribution (with parameter  $g=9.8$ ) is given as an example of application, among others.

**Keywords:** Maximum Certainty, Truncated Distribution, Invariance, Least action, Storms in Quito, MIT-Q

### 1. INTRODUCCIÓN

Las leyes de conservación como la de energía, la de cantidad de movimiento o la de carga eléctrica, son piedras angulares en la física moderna, son verdaderas “super leyes” que garantizan se conservarán ciertas magnitudes físicas propias del sistema (Lévy-Leblond, 2002). A la luz del paso del

tiempo, la ciencia ha encontrado una manera más profunda y bella de formular leyes fundamentales de la física mediante el uso de principios de mínimo y en especial el principio de mínima acción (Feynman et al., 2010).

Landau y Lifshitz (1994) indican que la formulación más general de la ley del movimiento de los sistemas mecánicos es

\*fabeltran@iddresearch.org  
Recibido: 26/10/2022  
Aceptado: 24/08/2023  
Publicado en línea: 14/11/2023  
10.33333/rp.vol52n2.05  
CC 4.0

el principio de mínima acción (o principio de Hamilton). Según este principio, todo sistema mecánico está caracterizado por una función Lagrangiana  $\mathcal{L}$  dependiente de sus coordenadas y velocidades generalizadas. En los instantes  $t_1$  y  $t_2$ , el sistema se mueve entre dos posiciones dadas de manera que la integral  $\int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt$ , denominada *acción*, toma el menor valor posible. El principio de Hamilton expresa que el verdadero movimiento de una partícula se presenta en un punto estacionario de un *Funcional* dentro de un conjunto de todos los posibles recorridos que inician en un punto al instante  $t_1$  y termina en otro al instante  $t_2$  (Berdichevsky, 2009).

Entre lo observado, no deja de inquietar la falta de un principio subyacente que explique una conducta conservativa de tipo probabilístico de fenómenos naturales a toda escala. ¿Es acaso posible encontrar un principio fundamental de conservación en el campo probabilístico similar al Principio de Mínima Acción (PmA)? La pregunta surge en busca de interpretar el importante ajuste observado en la modelación de patrones temporales de eventos individuales de tormentas de lluvia en Quito-Ecuador. El análisis de registros de tormentas identificó patrones temporales de naturaleza aleatoria que mantienen un orden emergente precoz, donde las máximas intensidades de lluvia se presentan preferentemente en sus primeros episodios. El modelo MIT-Q se construyó para simular la representación espacial y temporal de las lluvias sumando la lámina de precipitación de celdas estocásticas individuales sobre un área de 1600 km<sup>2</sup> (Beltrán, 2021). Los patrones temporales de este fenómeno natural se simularon partiendo de una función exponencial continua y truncada en  $DT$  dividida en  $m$  trozos iguales, a cada trozo se lo trata como un evento probabilístico sin reemplazo donde el orden de presentación en el tiempo obtenido; denominado arreglo, es de tipo exponencial truncado. En el experimento estadístico, la expresión “evento sin reemplazo o sin reingreso” es equivalente a representar una conducta disipativa del fenómeno físico, mediante una sucesión de eventos que una vez presentados no vuelven a repetirse dentro del tiempo de vida  $DT$  (Beltrán, 2017; 2019). Similar conducta se puede observar en otros fenómenos naturales tempranamente intensos o precoces como terremotos (Cosentino et al., 1977) o en deslizamientos (Thingbaijam y Mai, 2016).

En la modelación del fenómeno natural, el conjunto de los arreglos de naturaleza aleatoria contiene un máximo probable entre todos los posibles. Esta característica es semejante a la conducta de un *Funcional* en el campo continuo en cuyo punto estacionario la función asociada es extrema sobre todas las trayectorias posibles. Identificar la preferente precocidad de los eventos más intensos de lluvia dentro de un arreglo motivó la búsqueda intuitiva de un principio superior, que debería ser representado con un Funcional equivalente al PmA del campo determinista, que aplicado al campo probabilístico es más adecuado denominarlo Principio de Certeza Máxima (PCM).

En búsqueda del PCM, un obligado campo de análisis es la teoría de la Entropía y sus partes esenciales a) La Entropía de Shannon y b) El Principio de Máxima Entropía.

Shannon (1948) formuló el concepto de Entropía como una medida de información o incertidumbre. La incertidumbre sobre la ocurrencia de un evento aleatorio está asociada al conjunto de los posibles valores de la variable aleatoria. La información se obtiene experimentando el evento aleatorio. Si un evento es muy recurrente, transmite poca información. Complementariamente, se requiere más información para describir eventos menos probables o más inciertos. La información que emerge como resultado de la ocurrencia de un evento con probabilidad  $p$  es  $-\log(p)$ . Este concepto puede ser extendido a  $N$  eventos ocurriendo con probabilidad  $p_1, p_2, \dots, p_N$ . La información que emerge por la ocurrencia conjunta de los  $N$  eventos es  $\sum_{i=1}^N \log p_i$  y la información promedio, conocida como Entropía de Shannon, es  $H = \sum_{i=1}^N p_i \cdot \log p_i$  (Vijay, 2014).

Seguido, Jaynes (1957) establece el Principio de Máxima Entropía (PME) para tratar problemas que analizan la predicción. Dada una variable aleatoria  $T$ , donde se dispone de algún tipo de información, la distribución de probabilidad escogida debería ser consistente con la información disponible. El PME establece que la distribución de probabilidad debería ser seleccionada de tal manera que maximice la entropía relacionada con la información dada. Intuitivamente las distribuciones de más alta entropía representan más desorden, son menos predecibles y asumen menos (Vijay, 2014). La maximización de la entropía no es una aplicación de una ley de la física, es simplemente un método de razonamiento que asegura que no se han introducido supuestos arbitrarios inconscientes (Jaynes, 1957).

El análisis de estos dos importantes principios; PmA y PME, ha dejado espacio para el planteamiento del PCM. Se inicia examinando el concepto de Funcional y específicamente el Funcional Exponencial Truncado identificado en el estudio de tormentas en Quito.

## 2. FUNCIONAL EXPONENCIAL TRUNCADO

Para llegar al Funcional Exponencial Truncado (FET) utilizado en el estudio de tormentas es necesario observar las cualidades de la distribución exponencial, tanto en el campo continuo como en el discreto.

### 2.1. Función de Distribución Acumulada Exponencial

Se dice que una variable aleatoria continua  $T$  es exponencial si su función de densidad de probabilidad (FDP) es (Ross, 2010):

$$f(t) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

La función de distribución acumulada (FDA) es:

$$F(t) = P\{T \leq t\} = 1 - e^{-\lambda t} \quad t \geq 0, \lambda > 0 \quad (2)$$

La FDP exponencial es una función probabilística que cumple la Ecuación 3:

$$\frac{f(t)'}{f(t)} = -\lambda \quad (3)$$

Lévy-Leblond (2002) expresa que lo específico de este tipo de ecuaciones diferenciales es que enuncian una relación invariable entre cantidades variables y definen lo que cambia en función de lo que no cambia. No puede dejarse sin mencionar la similitud, en su respectivo ámbito, con las leyes de conservación.

## 2.2. Función de Distribución Exponencial Truncada

### 2.2.1. Análisis Continuo

La nueva variable aleatoria  $T$  representa la duración o el tiempo de vida truncada en  $DT$ . El valor de la nueva probabilidad se calcula partiendo de la Ecuación 2. Su resultado corresponde a la función de distribución exponencial truncada en  $DT$ , con  $\lambda > 0$  y  $0 \leq t \leq DT$ .

$$F_{T|DT}(t) = P\{T \leq t | T \leq DT\} = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{1 - e^{-\lambda DT}} \quad (4)$$

En la Ecuación 5 y Figura 1 se presentan la FDP exponencial truncada en  $DT$  obtenida al derivar la Ecuación 4.

$$f_{T|DT}(t) = \begin{cases} \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{1 - e^{-\lambda DT}} & 0 \leq t \leq DT \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (5)$$

El valor de la función de densidad inicial  $f_o$  y final  $f_f$  del periodo  $DT$  son iguales a:

$$f_o = \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda DT}} \quad (6)$$

$$f_f = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda DT}}{1 - e^{-\lambda DT}} \quad (7)$$

### 2.2.2. Análisis Discreto

Una variable aleatoria es discreta si los elementos del conjunto de valores posibles pueden ser enumerados sin repetición en una secuencia indexada de números enteros. En el caso del tiempo, éste se mide de manera continua y es concebible que la variable aleatoria asuma cualquier valor en el intervalo de estudio. Para conseguir que la variable aleatoria sea discreta, se divide  $DT$  en  $m$  intervalos  $\Delta t$  de igual magnitud, donde  $m$  es un número entero:

$$\Delta t = \frac{DT}{m} \quad (8)$$

Y el intervalo de tiempo  $t_n$  expresado de manera discreta como:

$$t_n = n \cdot \frac{DT}{m} \quad (9)$$

La variable aleatoria discreta  $I$  representa la jerarquía de la propiedad física dentro del arreglo, por ejemplo: La más intensa, el más fuerte, el más veloz, el más probable ( $I = 1$ ).

La Ecuación 9 se reemplaza en la Ecuación 4 y se obtiene:

$$P(I \leq n | I \leq m) = \frac{1 - e^{-\frac{\lambda DT n}{m}}}{1 - e^{-\lambda DT}} \quad (10)$$

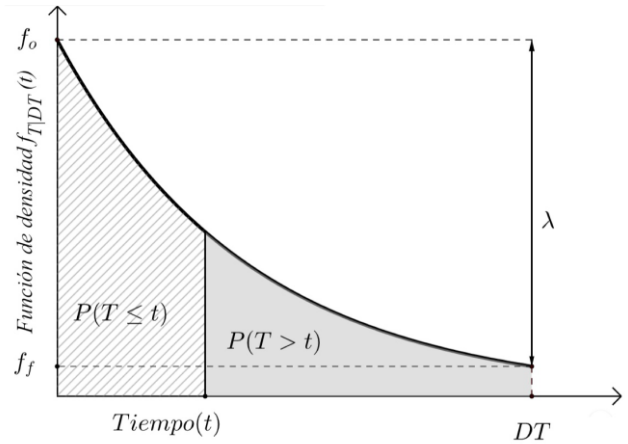


Figura 1. Función de densidad exponencial truncada

Sea: 
$$K = e^{-\frac{\lambda DT}{m}} \quad (10)$$

$$P(I \leq n | I \leq m) = \frac{1 - K^n}{1 - K^m} = \frac{K^1 + K^2 + \dots + K^n}{K^1 + K^2 + \dots + K^m}$$

Al denominador se lo nombra  $K_a$ :

$$K_a = \sum_{i=1}^m K^i \quad (11)$$

$$P(I \leq n | I \leq m) = \frac{K^1}{K_a} + \frac{K^2}{K_a} + \dots + \frac{K^n}{K_a} \quad (12)$$

Para calcular la probabilidad del  $n$ -ésimo evento, se resta la probabilidad del evento con orden menor o igual a  $n$ , de la probabilidad del evento con orden menor o igual a  $n-1$ .

$$P_n = P(I = n | I \leq m) = P(I \leq n | I \leq m) - P(I \leq n-1 | I \leq m)$$

$$P_n = \left( \frac{K^1}{K_a} + \frac{K^2}{K_a} + \dots + \frac{K^n}{K_a} \right) - \left( \frac{K^1}{K_a} + \frac{K^2}{K_a} + \dots + \frac{K^{n-1}}{K_a} \right)$$

$$P_n = \frac{e^{-\lambda DT \cdot \frac{n}{m}}}{\sum_{n=1}^m e^{-\lambda DT \cdot \frac{n}{m}}} \quad (13)$$

$P_n$  es la probabilidad que el  $n$ -ésimo evento más intenso o el más fuerte o de mayor jerarquía sea el primero

### 2.3. Funcional Exponencial Truncado Discreto

Los eventos siguen una línea en el tiempo, el orden de presentación de la variable aleatoria exponencial  $I$  variará según su jerarquía. En caso de dos eventos seguidos, se puede presentar el arreglo (1,2) o el arreglo (2,1). En el primer caso, el evento de mayor probabilidad aparece al inicio dejando al evento menos probable al final. En el segundo caso, al inicio se presenta el evento con menor probabilidad y al final el de mayor probabilidad. No se admite el arreglo (1,1) por tratarse de eventos sin reemplazo. De la presentación preferente en el tiempo de los posibles arreglos surgen los denominados "Patrones Temporales".

Los fenómenos naturales que se pueden simular con esta conducta son aquellos donde se disipa alguna propiedad como la energía, la temperatura o la información.

La probabilidad conjunta de un arreglo de  $m$  valores se puede calcular a partir de la probabilidad a priori  $P_n$  asignada al inicio a cada uno de los eventos  $y$ , simular la manifestación de los eventos uno tras otro en el tiempo. La probabilidad a posteriori para el segundo evento aumenta según el siguiente procedimiento:

$$P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_m = 1$$

Después de presentarse el evento  $n = 1$  con probabilidad  $P_1$ , la probabilidad remanente es  $1 - P_1$ .

$$P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_m = 1 - P_1$$

La nueva probabilidad del evento  $n = 2$  se puede calcular con:

$$\frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_m}{1 - P_1} = 1$$

$$\frac{P_2}{1 - P_1} + \frac{P_3}{1 - P_1} + \frac{P_4}{1 - P_1} + \dots + \frac{P_m}{1 - P_1} = 1$$

El primer elemento  $\frac{P_2}{1 - P_1}$  representa la probabilidad condicional que se presente el evento  $I = 2$  conociendo de antemano que se ha presentado el evento  $I = 1$ .

Para un tercer evento en el tiempo, la expresión:

$$\frac{P_3}{1 - P_1 - P_2}$$

Representa la probabilidad del evento  $I = 3$  conociendo de antemano que se ha presentado el evento  $I = 1$  e  $I = 2$ .

La aparición de un evento aumenta la probabilidad de los eventos restantes o, en otras palabras, la probabilidad a posteriori de los eventos restantes aumenta con el tiempo.

Una vez terminados los  $m$  eventos, la probabilidad del arreglo final dependerá de su ordenamiento. Dentro de las leyes de probabilidad se utiliza la regla de la multiplicación  $P[A_1 \cap A_2] = P[A_1] \cdot P[A_2|A_1]$  aplicable a eventos independientes o dependientes (Milton, 2005). La probabilidad del arreglo total será igual a la multiplicación de la probabilidad a posteriori de cada evento.

$$P_T = P_1 \cdot \frac{P_2}{1 - P_1} \cdot \frac{P_3}{1 - P_1 - P_2} \dots \frac{P_m}{1 - \sum_{i=1}^{m-1} P_i} \quad (14)$$

En arreglos aleatorios discretos truncados para conocer: ¿Qué puede presentarse en el futuro? se debe registrar, con algún tipo de memoria, lo presentado en el pasado.

Ejemplo 1:

En una tormenta de duración  $DT = 1,0 h$  y  $\lambda = 2,08$  compuesto por 4 eventos de lluvia. Determinar la probabilidad conjunta del patrón temporal, suponiendo que el evento más intenso se presenta en a)  $n = 1$  b)  $n = 2$  c)  $n = 3$  y d)  $n = 4$ .

Tabla 1. Probabilidad de Arreglo Temporal

N	I				P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	Prob.
						1 - P <sub>1</sub>	1 - P <sub>1</sub> - P <sub>2</sub>	
1	1	2	3	4	0,463	0,513	0,627	0,1491
2	1	2	4	3	0,463	0,513	0,373	0,0887
3	1	3	2	4	0,463	0,305	0,739	0,1045
4	1	3	4	2	0,463	0,305	0,261	0,0369
5	1	4	2	3	0,463	0,181	0,627	0,0527
6	1	4	3	2	0,463	0,181	0,373	0,0314
7	2	1	3	4	0,275	0,639	0,627	0,1105
8	2	1	4	3	0,275	0,639	0,373	0,0657
9	2	3	1	4	0,275	0,226	0,826	0,0515
10	2	3	4	1	0,275	0,226	0,174	0,0108
11	2	4	1	3	0,275	0,134	0,739	0,0274
12	2	4	3	1	0,275	0,134	0,261	0,0097
13	3	1	2	4	0,164	0,554	0,739	0,0671
14	3	1	4	2	0,164	0,554	0,261	0,0237
15	3	2	1	4	0,164	0,329	0,826	0,0446
16	3	2	4	1	0,164	0,329	0,174	0,0094
17	3	4	1	2	0,164	0,116	0,627	0,0120
18	3	4	2	1	0,164	0,116	0,373	0,0071
19	4	1	2	3	0,097	0,513	0,627	0,0314
20	4	1	3	2	0,097	0,513	0,373	0,0186
21	4	2	1	3	0,097	0,305	0,739	0,0220
22	4	2	3	1	0,097	0,305	0,261	0,0078
23	4	3	1	2	0,097	0,181	0,627	0,0111
24	4	3	2	1	0,097	0,181	0,373	0,0066
Total. -								1,0000

El espacio muestral de los posibles arreglos conformados por 4 eventos tiene 24 elementos ( $m=4!$ ). De la Ecuación 10 y la Ecuación 11:

$$K = e^{-\lambda \frac{DT}{m}} = e^{-0,208 \frac{10}{4}} = 0,595$$

$$K_a = \frac{1 - K^m}{1 - K} \cdot K = \frac{1 - 0,595^4}{1 - 0,595} \cdot 0,595 = 1,284$$

La probabilidad a priori  $P_n$  se obtiene con la Ecuación 13:

$$P_1 = \frac{K^1}{K_a} = 0,463 \quad P_2 = \frac{K^2}{K_a} = 0,275$$

$$P_3 = \frac{K^3}{K_a} = 0,164 \quad P_4 = \frac{K^4}{K_a} = 0,097$$

La probabilidad de cada arreglo calculada con la Ecuación 14 se indica en la Tabla 1. El más probable con 14,91% es el arreglo (1,2,3,4), seguido el arreglo (2,1,3,4) con 11,05%, en tercer lugar, con 10,45% el arreglo (1,3,2,4) etc. El menos probable es el arreglo (4,3,2,1) con 0,66%. Este último es 22,6 veces menos probable que el arreglo más probable (1,2,3,4). La probabilidad de todos los arreglos suma uno.

Cabe una reflexión al borde del campo determinista. En el Ejemplo 1, si  $\lambda = 32$ , la probabilidad del arreglo (1,2,3,4) es 99,9% y a la vez 7,02E+20 veces más probable que el arreglo (4,3,2,1). Esto asemeja los resultados de una medición de una variable física en un experimento determinista, donde sus mediciones siempre reflejan un error marginal entre el valor medido y el valor medio. En este escenario pseudo-determinista el arreglo (1,2,3,4) es la norma invariante, el arreglo (4,3,2,1) es válido, pero tendría una probabilidad prácticamente nula (1,42E-21), que de presentarse se consideraría como una eventualidad poco probable, pero ciertamente posible. Complementariamente, si  $\lambda = 0$  la

probabilidad de cada uno de los 24 arreglos es igual a  $1/24$  expresando una conducta totalmente aleatoria e indeterminada.

La Figura 2 indica los patrones temporales. En cada caso se incluye la probabilidad acumulada del conjunto de los arreglos. Los arreglos cuyo primer elemento es el evento con mayor jerarquía o más intenso ( $I = 1$ ) son los más probables con 46,3% (Figura 2a). El 31,7% de probabilidad corresponde a los arreglos cuyo evento más intenso está en segundo lugar ( $I = 2$ ) (Figura 2b). El 16,8% corresponde a los arreglos donde el evento más intenso aparece en tercer lugar (Figura 2c) y, finalmente un marginal 5,1% corresponden a los arreglos donde el evento más probable aparece al final de la duración de vida DT ( $I = 4$ ) (Figura 2d).

Cada arreglo o recorrido en el tiempo tiene su propia probabilidad de presentarse. Los recorridos con tendencia hacia el límite superior son mucho más probables que aquellos con tendencia al límite inferior. El espacio muestral de los arreglos temporales indicado en la Figura 2 está conformado por todos los caminos posibles que están acotados superiormente por la FDP de la Ecuación 4 con  $\lambda$  positivo e inferiormente con  $\lambda$  negativo. La envolvente continua superior es *óptima*, por *óptima* se entiende como aquella función continua a trozos más probable entre todas las posibles. Lo contrario sucede con la envolvente inferior que será la menos probable entre todas las posibles. Esta es una forma gráfica de representar los patrones temporales preferentes, que pueden representar fenómenos naturales donde se presenta disipación de una cantidad física caracterizados por ser tempranamente intensos o precoces. Los fenómenos naturales intensos por modelar tendrán como valor característico  $\lambda$ , mientras más bajo más aleatorio y difícil de predecir, en tanto, mientras más alto más fácil será expresar su conducta con alguna función determinista, debido a que su conducta será recurrente o la más probable entre todas las posibles. De ahí que lo observado se adapta al conocido PmA.

El Funcional Exponencial Truncado (FET) representa, no uno sino todos los  $m$  arreglos permutados (continuos a trozos) de la función exponenciales truncada continua. Para averiguar su naturaleza, se debe iniciar por el concepto de *Funcional*.

Una Funcional asigna funciones  $y(x)$  a escalares. Si a toda función  $y(x)$  de una cierta clase  $M$  le corresponde, según una regla, un número determinado  $S$  se dice que en la clase  $M$  está definida la funcional  $S$  y se escribe  $S = S(y(x))$  (Krasnov et al., 1992).

Se probará que la distribución probabilística exponencial de la Ecuación 4, emerge al maximizar un *Funcional* de la forma:

$$S(P(t)) = \int_0^{DT} \mathcal{L}(t, P(t), P(t)') dt \quad (15)$$

Donde el dominio de  $S$  es un espacio de funciones  $P(t)$ , siendo  $f(t) = P(t)'$  una función de densidad y  $0 \leq t \leq DT$ . Por razones de economía se utilizará el símbolo  $P(t)$  para representar la probabilidad  $P(T \leq t | T \leq DT)$ . A la función  $\mathcal{L}$  se le conoce como *Lagrangiano*.

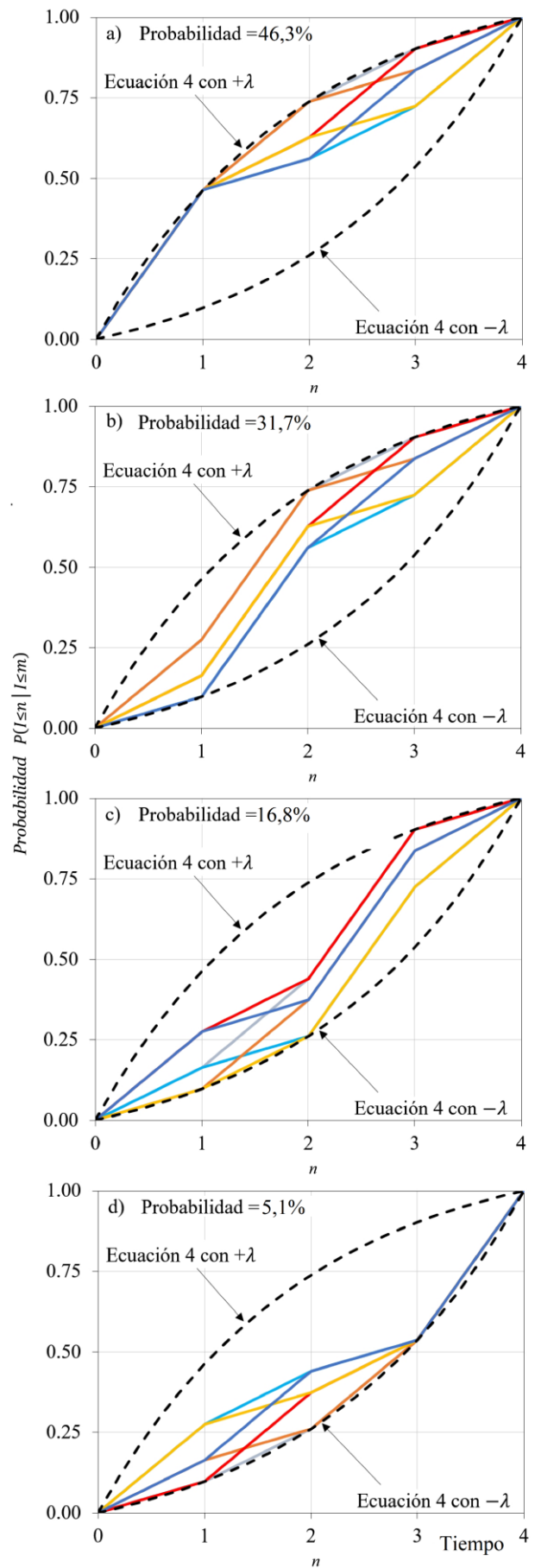


Figura 2. Patrón temporal más intenso en a)  $n=1$  b)  $n=2$  c)  $n=3$  d)  $n=4$

Euler en el año 1744, publicó su libro “Método para encontrar curvas con propiedades máximas y mínimas” donde establece la condición necesaria para que el funcional de la clase indicada en la Ecuación 15 alcance su valor extremo. Entre 1760 y 1761 Lagrange profundizó “Un nuevo método para determinar los máximos y los mínimos de fórmulas integrales” (Kreyszig, 1994), y llegó a la misma conclusión que Euler con coordenadas generalizadas. Por este motivo la Ecuación 16 es conocida como la ecuación Euler-Lagrange (Anzaldo et al., 2007).

$$\frac{\partial L}{\partial P(t)} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial P(t)'} \right) = 0 \quad \forall t \in [0, DT] \quad (16)$$

En el campo determinista de la mecánica de partículas, el principio de *Acción Mínima* o Principio de Hamilton asocia un funcional específico  $S$  con las posibles trayectorias de la partícula. Enunciar la ley del movimiento de una partícula significa *extremalizar* el funcional  $S$  (Anzaldo et al., 2007). Las leyes de movimiento de las partículas, entre todas las trayectorias posibles escogen aquellas donde la Acción o Integral de Acción es la mínima posible.

Para el caso de una variable aleatoria exponencial truncada, la acción identificada, denominada *Certeza*  $\aleph$  es:

$$\aleph(P(t)) = \int_0^{DT} f(t) \{-\lambda t - \ln f(t)\} dt \quad (17)$$

Donde  $\lambda$  y  $DT$  son  $> 0$  y  $f(t)$  es una función de densidad probabilística:

$$\int_0^{DT} f(t) dt = 1 \quad (18)$$

### 2.3.1 Demostración por Ecuación de Euler-Lagrange

El Lagrangiano de la Ecuación 17 es:

$$L(t, P(t), f(t)) = f(t) \{-\lambda t - \ln f(t)\} \quad (19)$$

Siendo el Lagrangiano explícitamente independiente de  $P(t)$ , la ecuación de Euler-Lagrange se reduce a:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial f(t)} \right) = 0 \quad (20)$$

Aplicado al Lagrangiano de la Ecuación 19:

$$\frac{\partial L}{\partial f(t)} = -\lambda t - 1 - \ln f(t) \quad (21)$$

Debido a que la derivada de  $\frac{\partial L}{\partial f(t)}$  respecto al tiempo es igual a cero, la  $\frac{\partial L}{\partial f(t)}$  es una constante. Por lo que, de la Ecuación 21 se concluye:

$$-\lambda t - \ln f(t)_{max} = Constante \quad (22)$$

La Certeza Máxima de la Ecuación 17 es:

$$\aleph_{max} = \int_0^{DT} f(t)_{max} \{-\lambda t - \ln f(t)_{max}\} dt$$

Debido a que la cantidad en corchetes es independiente del tiempo y por la Ecuación 22:

$$\aleph_{max} = \{-\lambda t - \ln f(t)_{max}\} \int_0^{DT} f(t)_{max} dt$$

Por la Ecuación 18:

$$\aleph_{max} = -\lambda t - \ln f(t)_{max} \quad (23)$$

La Certeza Máxima de la Ecuación 23 es la suma de dos cantidades que pese a variar en el tiempo, suman una constante. En otras palabras  $\aleph_{max}$  es un invariante temporal.

Para obtener la FDP que maximiza la Certeza basta con despejar  $f(t)_{max}$  de la Ecuación 23:

$$f(t)_{max} = e^{-\aleph_{max}} \cdot e^{-\lambda t} \quad (24)$$

Para obtener el valor  $\aleph_{max}$  se reemplaza la Ecuación 24 en la restricción de la Ecuación 18.

$$\int_0^{DT} e^{-\aleph_{max}} \cdot e^{-\lambda t} dt = 1$$

$$\aleph_{max} = -\ln \left( \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda DT}} \right) \quad (25)$$

Por la Ecuación 6:

$$\aleph_{max} = -\ln(f_o)$$

Al reemplazar la Ecuación 25 en la Ecuación 24 se obtiene finalmente la función de densidad exponencial truncada en el campo continuo que maximiza la Certeza.

$$f(t)_{max} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{1 - e^{-\lambda DT}} \quad (26)$$

Y su correspondiente función de probabilidad:

$$P(t)_{max} = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{1 - e^{-\lambda DT}} \quad (27)$$

La función  $P(t)_{max}$  obtenida es la distribución de probabilística exponencial truncada de la Ecuación 4.

Por otro lado, la función que minimiza la Certeza se obtiene a partir de la Ecuación 23 aceptando que el tiempo avanza desde el futuro hacia el presente, que se consigue al cambiar la variable truncada  $t$  por  $DT - t$ :

$$\aleph_{min} = -\lambda(DT - t) - \ln f(t)_{min} \quad (28)$$

Que cumple con:

$$\aleph_{min} = \aleph_{max} \quad (29)$$

Para obtener  $f(t)_{min}$  se utiliza un procedimiento similar al seguido para obtener  $f(t)_{max}$ :

$$f(t)_{min} = \frac{-\lambda e^{\lambda t}}{1 - e^{\lambda DT}} \quad (30)$$

Y su correspondiente función de probabilidad:

$$P(t)_{min} = \frac{1 - e^{\lambda t}}{1 - e^{\lambda DT}} \quad (31)$$



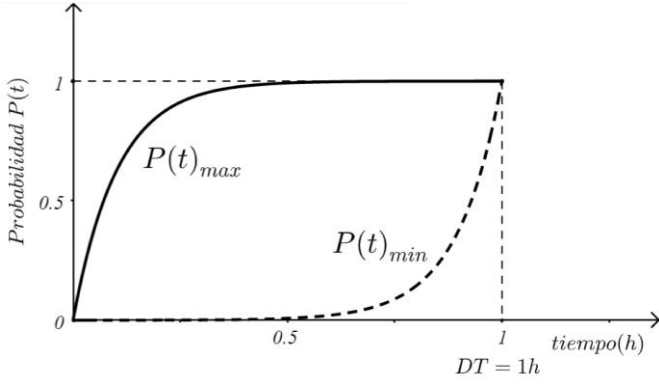


Figura 3. FDA exponencial ( $DT = 1\text{ h}$ ,  $\lambda = 9,8$ )

La Figura 3 presenta las FDA exponencial truncada  $P(t)_{max}$  y  $P(t)_{min}$  con máxima y mínima certeza, respectivamente.

El principio de *Mínima Acción* aplicado al campo probabilístico entrega una distribución de probabilidad  $P(t)_{max}$  que tiene la certeza máxima para el conocimiento disponible.

### 3. EQUILIBRIO PROBABILÍSTICO

Aunque se ha determinado el origen de las conductas probabilísticas exponenciales, conocer la acción de la Ecuación 17 no es suficiente para entender el origen último de este tipo de conductas, se propone de aquí en adelante una metodología nueva, que permite dar una interpretación física más adecuada no solo para la distribución exponencial truncada sino también para otras, como la distribución Uniforme, Normal, Weibull, Gamma y otras más.

Se realiza una analogía con el equilibrio en un cuerpo libre, algo que es muy común en el estudio de estática en ingeniería, donde la sumatoria de las fuerzas en estado de equilibrio es igual a cero. En el presente caso, la sumatoria de la información será igual a cero y se utilizará conceptos análogos tales como: Certeza o certidumbre, sorpresa, conocimiento e información, muy comunes a la vida cotidiana para expresar la conducta matemática.

El procedimiento realizado para encontrar la función de densidad de probabilidad exponencial truncada puede generalizarse para otras densidades de probabilidad. Para obtenerlo se propone las siguientes definiciones necesarias, que incluye el enunciado formal de la definición de Información.

1. Al presentarse un evento aleatorio en un tiempo continuo, la *Información* recibida o ganada es  $-\ln f(t)$ .

La definición formal de Información en el campo discreto expresa que siendo  $T$  un suceso que puede presentarse con probabilidad  $P(T)$ , cuando  $T$  tiene lugar, se ha recibido o ganado  $I(T) = -\log P(T)$  unidades de información (Abramson, 1981). Para el presente estudio en variables continuas, de manera análoga, se utiliza el valor  $-\ln f(t)$ , el signo negativo expresa que la información ingresa al sistema.  $f(t)$  es la función de densidad probabilística.

2. En todo instante truncado  $0 \leq t \leq DT$  existe una información previa relativa al mismo conjunto de información, a la que se denomina *Conocimiento*  $C(t)$ .  $C(t)$  es una cantidad que suma dos funciones monótonas; la Experiencia  $E(t)$  y la Creencia  $Cr(t)$ . La Experiencia se acumula con el tiempo y se caracteriza por  $E(0) = 0$ , en tanto,  $Cr(0)$  puede tomar cualquier valor de  $\{-\infty, \infty\}$ . En la distribución exponencial  $E(t) = -\lambda \cdot t$  y  $Cr(t) = 0$ .

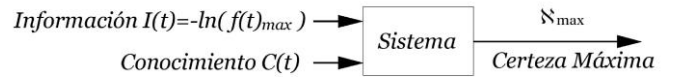
$$\text{Conocimiento } C(t) = E(t) + Cr(t)$$

3. Al presentarse un evento aleatorio, la información resultante está en equilibrio cuando la suma de la información que el sistema recibe y la que entrega es igual a cero. Se entiende que el sistema no es aislado y puede intercambiar información con el exterior.

$$\sum_{\forall t} \text{Información} = 0 \quad (32)$$

La Certeza Máxima  $\aleph_{max}$  es una medida de información, invariante en el tiempo, suma la *Información* recibida por el sistema al presentarse el evento y la información acumulada en el pasado, denominada *Conocimiento*. El sistema recibe información temporal variante y entrega información invariante. Ver Figura 4a y 4b.

a)

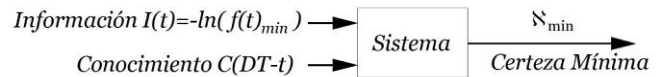


$$\aleph_{max} - C(t) - I(t) = 0$$

$$\aleph_{max} = C(t) + I(t)$$

$$\aleph_{max} = C(t) - \ln(f(t)_{max}) \quad (33)$$

b)



$$\aleph_{min} - C(DT - t) - I(t) = 0$$

$$\aleph_{min} = C(DT - t) + I(t)$$

$$\aleph_{min} = C(DT - t) - \ln(f(t)_{min}) \quad (34)$$

Figura 4. a) Certeza Máxima b) Certeza Mínima

Se define a la *Sorpresa* como la diferencia entre el Conocimiento y la Información.

$$\text{Sor}(t) = C(t) - I(t) \quad (35)$$

En  $t$  igual a cero, la Sorpresa recibida al presentarse el evento aleatorio es la más alta. La Sorpresa disminuye conforme el tiempo transcurre. Es análogo a un niño que al recibir una información su sorpresa es alta, en caso de una persona experimentada la misma información crea poca sorpresa.

Al despejar  $f(t)_{max}$  de la Ecuación 33 se obtiene:

$$f(t)_{max} = e^{\aleph_{max} - C(t)}$$

Finalmente, con la restricción de la Ecuación 18 se puede demostrar:

$$f(t)_{max} = \frac{e^{C(t)}}{\int_0^{DT} e^{C(t)} dt} \quad (36)$$

$$P(t)_{max} = \frac{\int_0^t e^{C(t)} dt}{\int_0^{DT} e^{C(t)} dt} \quad (37)$$

La Ecuación 36 y la Ecuación 37 son únicamente dependientes de la función Conocimiento y del intervalo de integración.

El Conocimiento  $C(t) = -\lambda \cdot t$  y la Información  $I(t)$  de la FDP exponencial truncada de la Ecuación 36 se indica en la Figura 5.

Por otro lado, para obtener la FDP con certeza mínima, se despeja  $f(t)_{min}$  de la Ecuación 34:

$$f(t)_{min} = e^{-\kappa_{min} + C(DT-t)}$$

Y por lo tanto con la restricción de la Ecuación 18 se obtiene:

$$f(t)_{min} = \frac{e^{C(DT-t)}}{\int_0^{DT} e^{C(DT-t)} dt} \quad (38)$$

La FDA que produce la mínima certeza es:

$$P(t)_{min} = \frac{\int_0^t e^{C(DT-t)} dt}{\int_0^{DT} e^{C(DT-t)} dt} \quad (39)$$

#### 4. APLICACIONES DEL PCM

##### 4.1. Distribuciones Probabilísticas Continuas

La Tabla 2 recopila la función Conocimiento relacionada con funciones de densidad de tipo exponencial de la estadística inferencial, además se incluye el valor de la Certeza Máxima.

La *Distribución Exponencial Truncada Cuadrática* (Ecuación 40 y Ecuación 41) se utilizó en el estudio espacio-temporal de tormentas en Quito-Ecuador (Beltrán, 2019).

$$f(t)_{max} = \frac{2\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})}{(1 - e^{-\lambda DT})^2} \quad (40)$$

$$P(t)_{max} = \left( \frac{1 - e^{-\lambda t}}{1 - e^{-\lambda DT}} \right)^2 \quad (41)$$

En la distribución Erlang  $n$  es elemento de los números naturales positivos ( $\mathbb{Z}^+$ ). Se observó que la Distribución Quito-Truncada (Ecuación 42 y Ecuación 43), equivalente a una distribución Erlang truncada con  $n = 2$ , se puede utilizar como alternativa en la modelación de tormentas.

$$f(t)_{max} = \frac{\lambda^2 t e^{-\lambda t}}{1 - (\lambda \cdot DT + 1) e^{-\lambda DT}} \quad (42)$$

$$P(t)_{max} = \frac{1 - (\lambda \cdot t + 1) e^{-\lambda t}}{1 - (\lambda \cdot DT + 1) e^{-\lambda DT}} \quad (43)$$

Para la distribución Gamma, la conocida función *Gamma*  $\Gamma(\alpha)$  para  $\alpha > 0$  es:  $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt = (\alpha - 1)!$

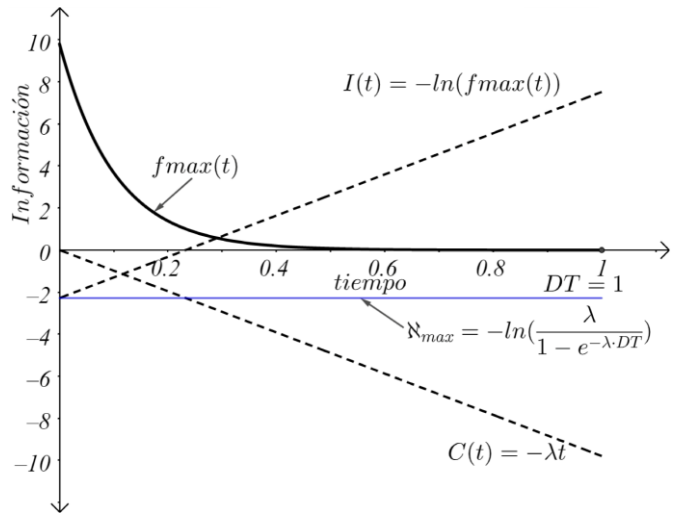


Figura 5. FDP Exponencial truncada obtenido con PCM ( $DT = 1, \lambda = 9,8$ )

Tabla 2. Conocimiento  $C(t) = E(t) + Cr(t)$

Distribución	$E(t)$	$Cr(t)$	Certeza Máxima
Uniforme	0	0	$-\ln\left(\frac{1}{b-a}\right)$
Exponencial	$-\lambda t$	0	$-\ln(\lambda)$
Exponencial Truncada	$-\lambda t$	0	$-\ln\left(\frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda \cdot DT}}\right)$
Exponencial Truncada Cuadrática	$-\lambda t$	$\ln(1 - e^{-\lambda t})$	$-\ln\left(\frac{2\lambda}{(1 - e^{-\lambda \cdot DT})^2}\right)$
Quito Truncada	$-\lambda t$	$\ln(t)$	$-\ln\left(\frac{\lambda^2}{(1 - (\lambda DT + 1) e^{-\lambda DT}}\right)$
Normal	$-\frac{1}{2} \left(\frac{t-u}{\sigma}\right)^2$	0	$-\ln\left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right)$
Erlang	$-\lambda t$	$(n-1) \ln(t)$	$-\ln\left(\frac{\lambda^n}{(n-1)!}\right)$
Weibull	$-(\lambda t)^\alpha$	$(\alpha-1) \ln(t)$	$-\ln(\alpha \lambda^\alpha)$
Raileigh	$-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{\sigma}\right)^2$	$\ln(t)$	$-\ln\left(\frac{1}{\sigma^2}\right)$
Gamma	$-\lambda t$	$(\alpha-1) \ln(t)$	$-\ln\left(\frac{\lambda^\alpha}{(\alpha-1)!}\right)$

En la distribución Normal,  $\mu$  es la media ( $-\infty < \mu < \infty$ ),  $\sigma$  es la desviación estándar ( $\sigma > 0$ ) y  $t$  es el tiempo con límite de integración de  $-\infty$  a  $\infty$ .

Ejemplo 2:

Utilizar el PCM y obtener la distribución probabilística con Conocimiento nulo en el intervalo truncado  $(0, DT)$

El Conocimiento de la distribución uniforme de la Tabla 2 es  $C(t) = 0$  y con la Ecuación 36 y Ecuación 37 se obtiene:

$$f(t)_{max} = \frac{e^0}{\int_0^{DT} e^0 dt} = \frac{1}{\int_0^{DT} dt} = \frac{1}{DT}$$

$$P(t)_{max} = \frac{\int_0^t e^{C(t)} dt}{\int_0^{DT} e^{C(t)} dt} = \frac{\int_0^t e^0 dt}{\int_0^{DT} e^0 dt} = \frac{\int_0^t dt}{\int_0^{DT} dt} = \frac{t}{DT}$$

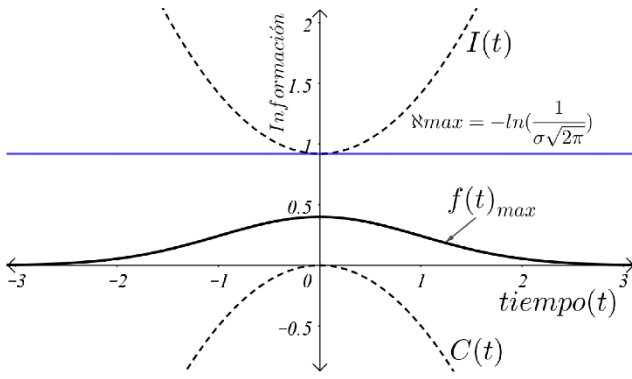


Figura 6. Certeza Máxima - Distribución Normal ( $\mu = 0, \sigma = 1$ )

Ejemplo 3:

Utilizar el PCM y obtener la distribución probabilística normal truncada en un intervalo  $(u - DT, u + DT)$ .

El Conocimiento de la Tabla 2 para la distribución Normal Truncada es  $C(t) = -\frac{1}{2}\left(\frac{t-u}{\sigma}\right)^2$ . Con la Ecuación 36 se tiene.

$$f(t)_{max} = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-u}{\sigma}\right)^2}}{\int_{u-DT}^{u+DT} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-u}{\sigma}\right)^2} dt}$$

$$f(t)_{max} = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-u}{\sigma}\right)^2}}{\sigma\sqrt{2\pi} \cdot \text{erf}\left(\frac{DT}{\sigma\sqrt{2}}\right)}$$

Donde  $\text{erf}$  es la función de error de Gauss:

$$\text{erf}\left(\frac{DT}{\sigma\sqrt{2}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{DT}{\sigma\sqrt{2}}} e^{-t^2} dt$$

La  $\aleph_{max}$  de la distribución Normal truncada es:

$$\aleph_{max} = -\ln\left\{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi} \cdot \text{erf}\left(\frac{DT}{\sigma\sqrt{2}}\right)}\right\}$$

Para una distribución Normal no truncada con  $DT = \infty$ , la función de error es:

$$\text{erf}\left(\frac{DT}{\sigma\sqrt{2}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} e^{-t^2} dt = 1$$

Y la función de densidad normal no truncada obtenida es:

$$f(t)_{max} = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-u}{\sigma}\right)^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

La  $\aleph_{max}$  de la distribución Normal sin truncamiento es:

$$\aleph_{max} = -\ln\left\{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right\}$$

La Figura 6 presenta el Conocimiento  $C(t)$  y la Información  $I(t)$  de la FDP Normal.

La atemporalidad de la Certeza Máxima es un atributo de las distribuciones probabilísticas que se presenta en todo tiempo

$t$ , es una ley a la que se rigen las variables aleatorias con un Conocimiento  $C(t)$  mandatorio.

#### 4.2. Distribuciones Probabilísticas Discretas

Para una variable aleatoria discreta uniformemente espaciada  $f(n) = P_n$  y  $t = n \cdot \frac{DT}{m}$ , la Certeza discreta  $\aleph$  se obtiene de la Ecuación 17:

$$\aleph(P_n) = \sum_{n=1}^m P_n \left(-\lambda \cdot DT \cdot \frac{n}{m} - \ln P_n\right) \quad (44)$$

$$\aleph(P_n) = \sum_{n=1}^m -\lambda \cdot DT \cdot \frac{n}{m} \cdot P_n - \sum_{n=1}^m P_n \cdot \ln P_n \quad (45)$$

Con restricción:

$$\sum_{n=1}^m P_n = 1 \quad (46)$$

El término de la derecha en la Ecuación 45 es la conocida Entropía de Shannon  $H$  en el campo discreto.

a) Por el PCM para una distribución uniforme discreta:

$$\aleph_{max} = 0 - \ln P_n$$

$$P_n = e^{\aleph_{max}} \quad (47)$$

Se reemplaza la Ecuación 47 en la Ecuación 46.

$$\sum_1^m e^{\aleph_{max}} = 1$$

$$e^{\aleph_{max}} = \frac{1}{m}$$

$$P_n = \frac{1}{m} \quad (48)$$

Donde no hay Conocimiento disponible los eventos son equiprobables y no es posible distinguirlos uno de otro.

b) Por el PCM, para una distribución exponencial discreta

$$\aleph_{max} = -\lambda \cdot DT \cdot \frac{n}{m} - \ln P_n \quad (49)$$

$P_n$  se despeja de la Ecuación 49.

$$P_n = e^{-\aleph_{max}} \cdot e^{-\lambda \cdot DT \cdot \frac{n}{m}} \quad (50)$$

Para obtener  $\aleph_{max}$  se reemplaza la Ecuación 50 en la Ecuación 46:

$$\aleph_{max} = -\ln\left(\frac{1}{\sum_{n=1}^m e^{-\lambda \cdot DT \cdot \frac{n}{m}}}\right)$$

$\aleph_{max}$  se reemplaza en la Ecuación 50 y se obtiene la conocida probabilidad truncada discreta de la Ecuación 13:

$$P_n = \frac{e^{-\lambda \cdot DT \cdot \frac{n}{m}}}{\sum_{n=1}^m e^{-\lambda \cdot DT \cdot \frac{n}{m}}}$$

### 4.3. Máxima Verosimilitud

En estadística inferencial la estimación de los parámetros de una FDP puede hacerse por el método de máxima verosimilitud. El objetivo en la inferencia es obtener información sobre la población a partir de la muestra. Para una muestra aleatoria de tamaño  $n$  de una variable aleatoria  $T$ . La función de verosimilitud es la función de densidad conjunta de la muestra  $L(\theta, t_i) = \prod_{i=1}^n f(t_i|\theta)$  (Bande et al., 2008). Se demuestra que la función de verosimilitud surge del PMC.

La sumatoria para cada valor  $t_i$  de la Ecuación 33 de una muestra estadística es:

$$\sum_{i=1}^n \aleph_{max} = \sum_{i=1}^n C(t_i) - \sum_{i=1}^n \ln(f(t_i)_{max})$$

Donde  $f(t_i)_{max}$  depende de los parámetros estadísticos que describen los datos.

$$\begin{aligned} n \cdot \aleph_{max} &= \sum_{i=1}^n C(t_i) - \ln \prod_{i=1}^n f(t_i)_{max} \\ \ln \prod_{i=1}^n f(t_i)_{max} &= \sum_{i=1}^n C(t_i) - n \cdot \aleph_{max} \end{aligned} \quad (51)$$

La parte izquierda de la Ecuación 51 es el logaritmo de la función de verosimilitud  $L(\theta, t_i)$ .

Para la distribución exponencial el Conocimiento de los datos muestrales es  $C(t_i) = -\lambda \cdot t_i$  y  $\aleph_{max} = -\ln(\lambda)$  de la Tabla 2.

$$\ln \prod_{i=1}^n f(t_i)_{max} = \ln(L(\lambda, t_i)) = -\lambda \sum_{i=1}^n t_i + n \cdot \ln(\lambda) \quad (52)$$

El estimador de máxima verosimilitud de  $\lambda$  es el valor de  $\lambda$  que maximiza la función de verosimilitud  $L(\lambda, t_i)$  y, a la vez, maximiza su logaritmo  $\ln(L(\lambda, t_i))$  (Montgomery, 2003).

$$\frac{\partial \ln(L(\lambda, t_i))}{\partial \lambda} = 0 \quad (53)$$

$$\begin{aligned} -\sum_{i=1}^n t_i + \frac{n}{\lambda} &= 0 \rightarrow \lambda = \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}} \\ \lambda &= \frac{1}{\bar{t}} \end{aligned} \quad (54)$$

Lo que confirma que en una muestra aleatoria exponencial la mejor estimación del parámetro  $\lambda$  es el inverso de la media muestral.

### 4.4. Modelación de fenómenos naturales, caso tormentas de lluvia en Quito

En general, el parámetro  $\lambda$  para la distribución exponencial se considera constante, sin embargo, para la modelación de la conducta temporal de tormentas intensas, este parámetro se convierte en una variable relacionada con la duración del evento, expresado por la Ecuación 55.

$$\alpha = \lambda \cdot DT \quad (55)$$

Los fenómenos que pueden ser modelados con la Ecuación 55, tienen episodios de altas intensidades de disipación en sus

etapas tempranas lo que influencia su tiempo de vida. Mientras más intenso un fenómeno su tiempo de vida es más corto.

El modelo MIT-Q se construyó para simular la representación espacial y temporal de las lluvias sobre un área de 1600 km<sup>2</sup> sumando la lámina de precipitación de celdas estocásticas individuales. La precipitación máxima  $P$ (mm) y su tiempo de vida  $DT$ (h) de cada evento, es un par probabilístico de borde del Funcional Exponencial Truncado Cuadrático.

De una simulación estocástica de 200 años se extrajo las máximas intensidades de lluvia(mm/h) para duraciones entre 10 minutos a 6 horas y se comparó, con un criterio de error, con las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) oficiales de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS), proceso que permitió calibrar los parámetros del modelo. Los patrones temporales de eventos individuales presentaron una conducta exponencial truncada en  $DT$  con parámetro  $\alpha = \lambda \cdot DT$ , donde el parámetro  $\alpha$  se ha calibrado en 9,8 con datos de la centenaria estación meteorológica M-054 Quito-Observatorio (9 976 222N 777 988E). Seguido, se comparó las intensidades simuladas en otras estaciones: M-003 Izobamba (9 959 896N 772 547E), M-024 Ñaquito (9 980 311N 779 641E) y M-002 Tola (9 974 245N 792 888E), P10 DAC-Aeropuerto (9983925N 779725E) para validar el MIT-Q. El ajuste del modelo en la etapa de calibración se indica en la Figura 7a, en tanto, la validación con las cuatro estaciones meteorológicas adicionales se indica en las Figuras 7b, 7c, 7d y 7e. El reporte gráfico del modelo MIT-Q de las intensidades de lluvias centenarias de 1 hora de duración se indica en la Figura 8.

Discusión:

Cuando no se pueden ignorar las fuerzas gravitatorias en la conformación de las grandes nubes cargadas de gotas de precipitación que las obliga a caer, la gravedad se convierte en un factor clave en el arreglo temporal de una tormenta. Y se convierte en creadora de información. El funcional extremo de tormenta en Quito es:

$$P(t)_{max} = \left( \frac{1 - e^{-g \cdot \frac{t}{DT}}}{1 - e^{-g}} \right)^2 \quad (56)$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad.

La precipitación en el tiempo se simula con un funcional de precipitación:

$$Pre(t) = PRE \cdot \left( \frac{1 - e^{-g \cdot \frac{t}{DT}}}{1 - e^{-g}} \right)^2 \quad (57)$$

Donde, la precipitación máxima  $PRE$  (mm) se consigue con una distribución exponencial de Weibull y la Duración  $DT$  (horas) con una distribución exponencial truncada.

Los resultados de la modelación se comparan con las curvas IDF oficiales de la EPMAPS (Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable [EMAAP-Q], 2009) de la estación Quito Observatorio y Tola. En tanto las estaciones meteorológicas Izobamba, Aeropuerto e Ñaquito se comparan con el estudio de Palacios et al (2015).

## 6. CONCLUSIONES

El principio fundamental *Mínima Acción* del campo determinístico es denominado *Certeza Máxima*  $\aleph_{max}$  en el campo probabilístico. Surge del equilibrio en la información que entra y sale de un sistema probabilístico.  $\aleph_{max}$  es un invariante que para el conocimiento y la información recibida se conserva en todo tiempo, incluso al instante  $t = 0$ . Si bien se inició aplicando  $\aleph_{max}$  a la distribución exponencial, la extensión a otras FDas, continuas o discretas, acotadas o no acotadas, es natural. Varias FDas de la estadística inferencial se pueden emparejar a un invariante particular  $\aleph_{max}$ .

El Conocimiento  $C(t)$  asociado a una distribución probabilística, se junta con otra cantidad conocida como Información  $I(t)$  en permanente equilibrio. El equilibrio se consigue con una función de densidad de probabilidad  $f(t)$  que puede ser máxima o mínima. La máxima  $P(t)_{max}$ , asociada a la  $\aleph_{max}$ , es el recorrido más más probable entre los posibles. Es factible adicionar al Conocimiento  $C(t)$  una función de Experiencia como  $E(t) = sen(t)$  o una de Creencia  $Cr(t) = cos(t)$  y obtener FDas multimodales.

Con el PCM se evidencia el Conocimiento subyacente de varias FDPs truncadas como la Exponencial, Exponencial Cuadrática o la denominada *Quito Truncada*. La extensión a FDPs no truncadas se consigue ampliando el dominio de integración a infinito. La Tabla 2 ayuda a clasificar el origen subyacente de las FDPs.

En el campo determinístico, maximizar un funcional específico permite obtener una ley física que rige la conducta real de los fenómenos en la naturaleza. En el campo probabilístico en cambio, obtiene el arreglo temporal más probable entre todos los posibles.

La invariabilidad es una característica que distingue a la  $\aleph_{max}$  de la Máxima Entropía. Para obtener el PCM no es necesario el preconcepto Entropía, la  $\aleph_{max}$  surge a un nivel subyacente.

Un patrón aleatorio o arreglo está compuesto por eventos. El orden azaroso de los eventos es irrepitable, físicamente se interpreta como adaptable a fenómenos disipativos de una cantidad física. El patrón temporal exponencial truncada cuadrático puede asociarse con fenómenos naturales muy intensos desencadenados por una inestabilidad que buscan recuperar el equilibrio. Si  $\lambda$  es alto la conducta aleatoria tenderá a ser determinista y por tanto susceptible de observar patrones en el tiempo, si  $\lambda = 0$  la conducta será totalmente aleatoria, los eventos equiprobables y no habrá forma de organizar u ordenar algo en el tiempo.

En fenómenos disipativos como las tormentas, la naturaleza prefiere patrones temporales precoces representados por la distribución exponencial truncada cuadrática con parámetro  $\alpha$  igual a la gravedad ( $9.8m/s^2$ ) para Quito-Ecuador.

La aplicación del PCM a muestras estadísticas obtiene y justifica la base del conocido método de Máxima Verosimilitud para la estimación de parámetros de una FDP.

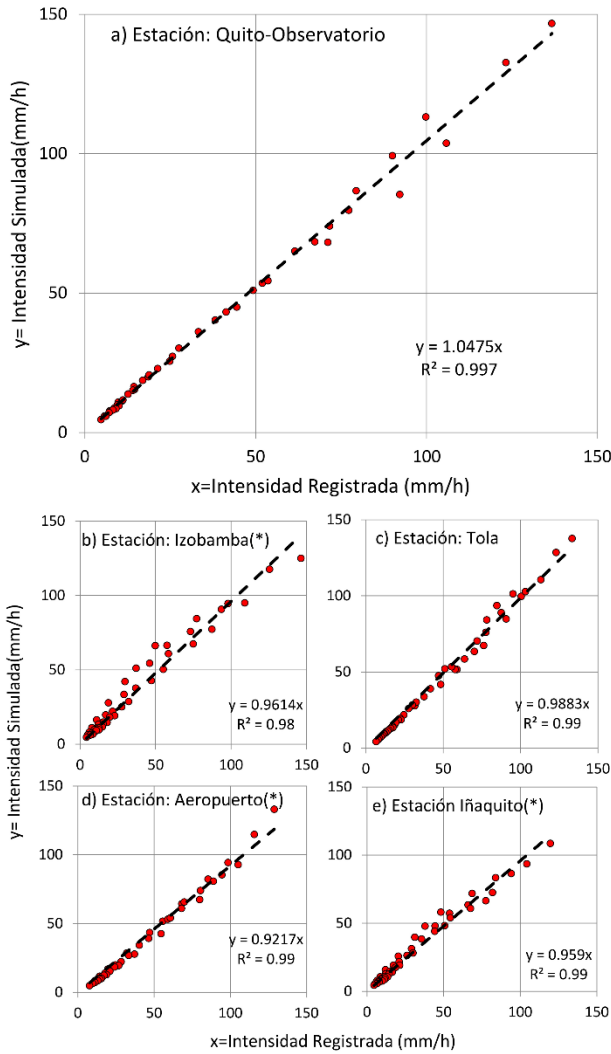


Figura 7. a) Calibración 200 años de simulación comparado con datos de estación Quito-observatorio b) Validación con datos de curvas IDF de estación meteorológica Izobamba c) Estación Tola d) Estación Aeropuerto e) Estación Iñaquito

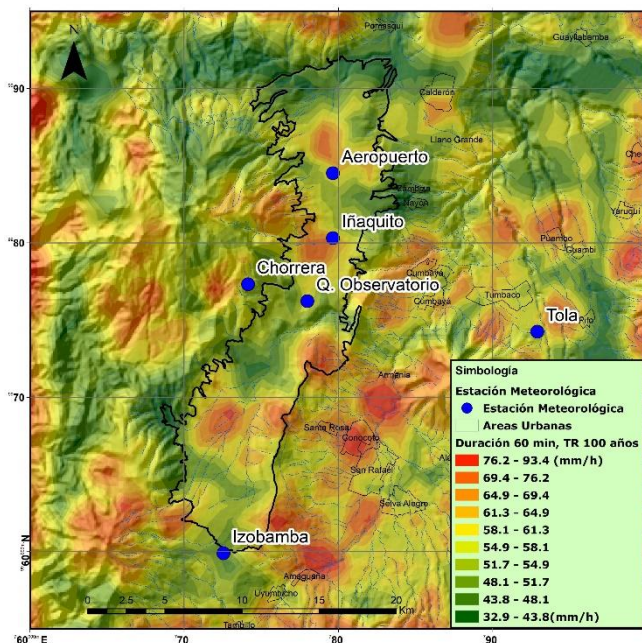


Figura 8. Intensidad de lluvia en Quito, Tr=100 años, Duración 1 hora

## REFERENCIAS

- Abramson, N. (1981). *Teoría de la información y codificación* (J. Menoyo, Trad.; 5.ª ed.). Paraninfo. (Original work published 1963).  
<https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apunt es/Teoria de la Informacion y codificacion- Norman Abramson ebook-spanish .pdf>
- Anzaldo, A., Delgado, J., y Monroy, F. (Eds.). (2007). *El legado matemático de Leonhard Euler a trescientos años de su nacimiento*. Innovación Editorial Lagares de México.  
<https://www.researchgate.net/publication/336015401-El Legado Matematico de Leonhard Euler>
- Bande, M., Galeano P., González J., y Pateiro B. (2008). *Estadística Ingeniería Técnica en Informática de Sistemas*. Departamento de Estadística e Investigación Operativa Universidad de Santiago de Compostela.  
<http://eio.usc.es/pub/julio/papers/pubdocenteteoriaesta distica.pdf>
- Beltrán, F. (2017). *Lo que esconden las tormentas: Modelación espacio temporal de lluvias en el Ecuador* (1ª. Ed.). Autoedición. <https://www.amazon.com/-/es/Franklin-Aparicio-Beltran/dp/9942284133>
- Beltrán, F. (2019, del 22 al 23 de noviembre). Lo que esconden las tormentas: Modelo calibrado de lluvias intensas en el Distrito Metropolitano de Quito y su proyección al Ecuador [conferencia]. *III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador*.  
<https://www.researchgate.net/publication/340818551>
- Beltrán, F. (2021, 17 de septiembre). Modelo de información de tormentas en Quito (MIT-Q) [conferencia]. *Congreso Anual de Meteorología y Calidad del Aire CAMCA-2021, Quito, Ecuador*.  
<https://www.usfq.edu.ec/sites/default/files/2021-08/libro-abstracts-camca-2021.pdf>
- Berdichevsky, V. (2009). *Variational Principles of Continuum Mechanics*. Springer.  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-88467-5>
- Cosentino, P., Ficarra, V., y Luzio, D. (1977). Truncated exponential frequency - magnitude relationship in earthquake statistics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 67(6), 1615-1623.  
<https://www.researchgate.net/publication/279463293>
- EMAAP-Q, (2009). *Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado para la EPMAAP-Q*, EPMAPS.  
[https://www.aguaquito.gob.ec/Alojamientos/PROYECTO%20LA%20MERCED/ANEXO%20%20NORMAS\\_ALCANTARILLADO\\_EMAAP.pdf](https://www.aguaquito.gob.ec/Alojamientos/PROYECTO%20LA%20MERCED/ANEXO%20%20NORMAS_ALCANTARILLADO_EMAAP.pdf)
- Feynman, R., Leighton R., y Sands, M. (2010). The Principle of Least Action. En M. Gottlieb y R Pfeiffer (Eds.), *Lectures on Physics The New Millennium Edition (Volume II)* (pp. 19-1,19-14). Basic Books.  
[https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II\\_19.html](https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_19.html)
- Jaynes, E. (1957). Information Theory and Statistical Mechanics. *American Physical Society*, 106(4), 620-630. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.106.620>
- Krasnov, M., Macarenko, G., y Kiseliiov, A. (1992). *Cálculo Variacional* (C. Vega, Trad.). MIR. (Original work published 1974).
- Kreyszig, E. (1994). On the Calculus of Variations and Its Major Influences on the Mathematics of the First Half of Our Century: Part I (A. Shenitzer. Ed.). *The American Mathematical Monthly*, 101(7), 674-678.  
<https://www.math.unm.edu/~vageli/courses/Ma579/cvar1.pdf>
- Landau, L., y Lifshitz E. (1994). *Mecánica* (Volumen 1). Editorial REVERTÉ.  
[https://www.academia.edu/43581613/MECANICA\\_LA\\_NDAU\\_y\\_LIFSHITZ](https://www.academia.edu/43581613/MECANICA_LA_NDAU_y_LIFSHITZ)
- Lévy-Leblond, J. (2002). *Conceptos contrarios o el oficio de científico* (J. Chabás, Trad.). Tusquets Editores.
- Milton, J., y Arnold, J. (2005). *Probabilidad y Estadística con Aplicaciones para Ingeniería y Ciencias Computacionales*. McGrawHill.
- Montgomery, D., y Runger G. (2003). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. (2ª. Ed.). Editorial Limusa.
- Palacios, W., Zambrano M. y Escobar D. (2015). *Análisis temporal de las lluvias extremas en el DMQ y cálculo de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia*. EPMAPS.  
[https://www.aguaquito.gob.ec/Alojamientos/PALUGUI\\_LLO%20BELLAVISTA%20TRAMO%202/An%C3%A1lisis%20temporal%20de%20las%20lluvias%20extremas%20en%20el%20DMQ.pdf](https://www.aguaquito.gob.ec/Alojamientos/PALUGUI_LLO%20BELLAVISTA%20TRAMO%202/An%C3%A1lisis%20temporal%20de%20las%20lluvias%20extremas%20en%20el%20DMQ.pdf)
- Rose, S. (2010). *A First Course in Probability* (8ª. Ed.). Pearson Prentice Hall.
- Shannon, C. (1948). *A Mathematical Theory of Communication*. The Bell System Technical Journal, 27(3), [https://ia803209.us.archive.org/27/items/bstj27-3-379/bstj27-3-379\\_text.pdf](https://ia803209.us.archive.org/27/items/bstj27-3-379/bstj27-3-379_text.pdf)
- Thingbaijam, K., y Mai, M. (2016). Evidence for Truncated Exponential Probability Distribution of Earthquake Slip. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(4), 1808-1809. <https://doi.org/10.1785/0120150291>
- Vijay, P. (2014). *Entropy Theory in Hydraulic Engineering An Introduction*. American Society of Civil Engineers.  
<https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784412725>

## BIOGRAFÍA



**Franklin Aparicio Beltrán Vega**, Ingeniero Hidráulico con Maestría en Recursos Hídricos de la Escuela Politécnica Nacional de Quito-Ecuador (2004). Investigador calificado en la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT). Ha participado en el diseño y construcción de proyectos hidroeléctricos en Ecuador. Ha dictado cursos de Estructuras Hidráulicas a nivel de Posgrado. Conferencista en talleres y congresos en Universidades y Colegios de Profesionales. Desde 2007 dirige IDD. Consultores, empresa especializada en investigación de recursos hídricos y geociencias.

# Sistema de Supervisión y Control de Rehervidores de Deshidratación de Gas: Caso Trenes A y B del Complejo Muscar

Roncero, Cristhian<sup>1\*</sup> ; Martínez, Yuselys<sup>2</sup> ; Vegas, Ruben<sup>3</sup> ; Rodríguez, Yenibeth<sup>4</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ica, Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración, Chíncha, Perú

<sup>2</sup>Petroleos de Venezuela S.A, Gerencia Compresión Gas Oriente, Maturín, Venezuela

<sup>3</sup>Universidad de Oriente. Núcleo Monagas. Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Maturín, Venezuela

<sup>4</sup>AI Inversiones Palo Alto II S.A.C., Lima, Perú

**Resumen:** El monitoreo y control del proceso de deshidratación de gas natural a través de los sistemas de supervisión y control de los rehervidores de deshidratación de gas son de gran importancia ya que facilita la eliminación de la humedad y otros contaminantes del gas para hacerlo apto para su uso. En este sentido, la presente propuesta proporciona un sistema de supervisión y control de deshidratación para los rehervidores de deshidratación de gas de la Planta Muscar de Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) que incluye la selección del controlador, el sistema de control, chasis y la integración de los diferentes componentes que la conforman. La automatización del proceso permite optimizar las condiciones del proceso de deshidratación, incluyendo la temperatura, la presión, el flujo de gas, el caudal de agua y los niveles de líquidos. Se desarrollaron las fases: visualizar, conceptualización y definir de la Guía de Gerencia de Proyectos de Inversión de Capital. La propuesta de la nueva arquitectura del sistema de supervisión y control de rehervidores de deshidratación de gas permite el monitoreo continuo de las condiciones del proceso de deshidratación, incluyendo la temperatura, la presión, el flujo de gas, el caudal de agua y los niveles de líquidos, así como también el incremento de los niveles de confiabilidad, minimización los accidentes inesperados y costo de mantenimientos correctivos.

**Palabras clave:** deshidratación de gas, sistema de control, rehervidores, optimización

## Supervision and Control System of Gas Dehydration Reboilers: Case of Trains A and B of the Muscar Complex

**Abstract:** The monitoring and control of the natural gas dehydration process through the supervision and control systems of the gas dehydration reboilers are of great importance since it facilitates the removal of moisture and other contaminants from the gas to make it suitable for its use. In this sense, the present proposal provides a dehydration supervision and control system for the gas dehydration reboilers of the Muscar Plant of Petroleums of Venezuela S.A. (PDVSA) that includes: the selection of the controller, the control system, chassis and the integration of the different components that make it up. The automation of the process allows optimizing the conditions of the dehydration process, including temperature, pressure, gas flow, water flow and liquid levels. The visualize, conceptualize and define phases of the Capital Project Management Guide were developed. The proposed new architecture of the gas dehydration reboiler supervision and control system allows continuous monitoring of the dehydration process conditions, including temperature, pressure, gas flow, water flow and liquid levels, as well as increasing reliability levels, minimizing unexpected accidents and corrective maintenance costs.

**Keywords:** gas dehydration, control system, reboilers, optimization

### 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los procesos industriales y el intercambio de información ocupan un alto porcentaje de los diseños y aplicaciones, lo que lo convierte globalmente en un factor

clave para el éxito de las empresas (Melgarejo-Jara et al., 2023). La búsqueda de métodos y tecnologías que permitan optimizar el desempeño en esta área ocupa una parte importante de los esfuerzos de las empresas y organizaciones (Parra-Camacho et al., 2023). La tendencia de automatizar numerosas tareas y procedimientos para aumentar la

\*croncerosm@gmail.com

Recibido: 05/07/2023

Aceptado: 04/10/2023

Publicado en línea: 14/11/2023

10.33333/rp.vol52n2.06

CC 4.0

productividad y la eficiencia mientras se reducen los costos operativos se encuentra presente en las organizaciones (Díaz, 2019; Tavara, 2016). La tecnología abre un gran abanico de posibilidades en este campo, ya que existen multitud de herramientas y sistemas diferentes para llevar a cabo este tipo de acciones.

En este sentido, la automatización como proceso ha sido uno de los mayores inventos del hombre porque ha permitido una gran reducción de las fallas de tipo humano, haciendo que los procesos industriales sean más rápidos y más eficientes, y a su vez mejora la calidad de vida del trabajador evitando accidentes al ejecutar ciertas actividades manualmente. (Ronceros y Pomblas, 2023; Ronceros, 2022). Bajo este contexto, el desarrollo exponencial de la tecnología en los últimos años ha traído consigo un considerable aumento en el uso de la automatización como opción principal para controlar y supervisar los procesos en las empresas. (Tidrea et al., 2023; Lashin, 2014). Esto ha generado un incremento de la productividad, una mejora de la competitividad y una significativa reducción de costos, lo que sin duda genera múltiples beneficios a las compañías. (Tomar et al., 2022).

En la actualidad predomina la era de las tecnologías de la información (TI), las cuales surgen como las principales aliadas para apoyar en diferentes aspectos a las grandes empresas en el mundo que incorporan la tecnología y la automatización de los procesos en sus actividades cotidianas, como lo son la Industria Petrolera, Química, Gasífera, Manufacturera, Pesquera, de Mina, Carbonífera, de Telecomunicaciones, Eléctrica, Siderúrgica, entre otras. (Ronceros et al, 2023; García et al, 2018; Bortolini et al, 2018; Maganha et al, 2018).

En el sector industrial la automatización se ha convertido en una fuerza impulsora de todo el sector químico, petrolero, gasífero y biotecnológico entre otros sectores importantes. (Corvo, 2018). Actualmente existen sistemas de instrumentación innovadores que controlan procesos complejos, garantizan la fiabilidad y seguridad de los procesos (Tomar et al., 2023; Tomar and Kumar, 2020) y son la base para el desarrollo de estrategias que servirán para mejorar el control de todas las operaciones a nivel de planta. Una de las industrias en la cual la automatización ha jugado un papel muy importante es la industria petrolera, debido a la complejidad y su gran cantidad de procesos llevados a cabo dentro de ella es importante tener un monitoreo constante de todas las actividades efectuadas dentro de la empresa. (Cotrina, 2019; Estrada et al, 2017 y Velásquez, 2015).

Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA) es una de las grandes empresas petroleras del mundo que tiene como filosofía de procesos la implementación de sistemas automatizados, a fin de estar a la par con los avances tecnológicos y aportar soluciones optimizadas que contribuyan con la toma de decisiones acertadas. Dicha empresa se encarga de la exploración, producción, manufactura, transporte y mercadeo de los hidrocarburos.

El complejo Operativo Muscar, la cual pertenece a la unidad de plantas, PDVSA Dirección Ejecutiva Producción Oriente

(DEPO). Dichas instalaciones son la base de todas las actividades de manejos de gas desarrolladas en el Distrito Punta de Mata, donde la recolección y acopio de gas es su actividad principal. Su ámbito de impacto incluye el tratamiento y acondicionamiento de gas asociado al crudo de todas las unidades de explotación del distrito, así como la óptima segregación de gas para la planta de extracción de líquidos. Dicho gas es llevado a través de tuberías que lo transportan y distribuyen hasta los centros de consumo, además puede ser usado en el levantamiento artificial en pozos de petróleo, o simplemente ser reinyectado al subsuelo para la recuperación secundaria de crudo. Es muy importante remover el agua del gas para así evitar corrosión en las tuberías, formación de hidratos que puedan restringir o bloquear las tuberías y evitar el funcionamiento errático de los quemadores de gas.

El área de rehervidores de deshidratación de alta presión del Complejo Muscar comprende dos trenes (A y B), los cuales tienen la capacidad de manejar 1000 MMPCND (miles de millones de pies cúbicos estándar por día), 500 MMPCND cada uno. Esta planta cumple la función de deshidratar el gas natural provenientes de las fuentes del Complejo Operativo Amana (COA) y Complejo Operativo Tejero (COT) las mismas son estaciones encargadas de la producción de crudo y manejo del gas, unidas a estas se encuentra la estación Santa Bárbara Pirital la cual es la encargada solo de la producción de crudo, con el fin de obtener un gas totalmente seco, de 0 a 5 Lib/pulg de agua para enviarlo a compresión de planta de inyección de alta presión PIGAP 1.

Esta planta está dividida en los procesos de deshidratar el gas natural y regenerar el glicol. En el proceso de regeneración del Glicol es donde intervienen los rehervidores, el cual es un equipo que le proporciona el calor necesario para regenerar el glicol en la torre destiladora. La separación se produce gracias a la diferencia en los puntos de ebullición entre el agua 215°F y el glicol 410°F. El calor es producido por el gas combustible que es quemado en los tubos calentadores que tiene cada horno y así el glicol cumple la última etapa de regeneración. La temperatura de operación de estos hornos es de 380°F, no debe sobrepasar los 400 °F, ya que a temperaturas mayores se produce la degradación del glicol lo que traería problemas al proceso. Para controlar la temperatura de estos rehervidores es necesario un sistema de control que ayude a supervisar dicha temperatura, de modo que se reduzcan las probabilidades de fallos y se obtengan los resultados buscados, la finalidad de garantizar una mayor eficiencia del proceso, al igual que permitiría una mejor facilidad de operación y seguridad del personal.

## 2. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló siguiendo una metodología propuesta por PDVSA, denominada Guía de Generación de Proyectos de Inversión de Capital (GGPIC), Esta metodología se compone de 5 fases: visualizar, conceptualizar, definir, implantar y operar (GGPIC, 1999). La investigación solo abarcó las primeras 3 fases, ya que es una propuesta de automatización, por lo que las actividades finales de la fase de implementar y operar quedan fuera del alcance de la presente



investigación. A continuación, se describe cada una de las fases que se ejecutaron:

#### Fase 1: Visualizar

En esta fase, se procedió con el levantamiento de la información concerniente al proceso de deshidratación del gas y por ende a los rehervidores de la planta. Las actividades relacionadas con esta fase son:

1. Identificación de la filosofía de operación de los rehervidores.
2. Identificación de la filosofía de control de los rehervidores.
3. Descripción de la arquitectura tecnológica.
4. Levantamiento de la información de los gabinetes instalados en campo.

#### Fase 2: Conceptualizar

En esta fase se realizaron las siguientes actividades:

1. Identificación de equipos tecnológicos disponibles para el sistema de control en los rehervidores.
2. Evaluación técnica de los equipos disponibles en el mercado.
3. Selección de las tecnologías a proponer.

#### Fase 3: Definir

Las actividades asociadas con esta fase se mencionan a continuación:

1. Creación de la base de datos de la arquitectura de control propuesta.
2. Diseño de la arquitectura tecnológica a proponer.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Fase I. Visualizar

##### 3.1.1 Filosofía de Operación de los rehervidores

El gas proveniente de los separadores a 1100 PSIG y a 112 ° F entra a la torre contactora por el fondo y fluye hacia arriba a través de ocho platos de válvulas de presión, en los cuales tiene contacto directo con el trietilenglicol (TEG) pobre que es introducido por el tope de la contactora a una presión de 1179 PSIG y 127 °F aproximadamente, a un flujo de 50 GPM (galones por minuto) y a una concentración de 99.8% en peso. El TEG desciende a través de la contactora y absorbe agua del gas de entrada deshidratándolo hasta un contenido de humedad comprendido entre 5 y de 7 Lb H<sub>2</sub>O/ MMPCN (libras de agua por miles de millones de pies cúbicos normales).

El gas seco originado de la contactora fluye por una línea de 20" de diámetro hacia el cabezal de 30" de diámetro común a ambos trenes de deshidratación; desde este cabezal el gas es enviado a la planta de deshidratación PIGAP 1. mientras que el TEG rico en agua fluye desde el fondo de la contactora bajo control de nivel, a través de una válvula y un orificio de restricción en el cual se disminuye la presión del líquido a 60 PSIG, a estas condiciones el TEG rico en agua es enviado al desasfaltenizador de TEG rico. Actualmente, se encuentra operando en buenas condiciones el del tren B, mientras que el del tren A presenta excesiva carga de líquidos, debido a que el desasfaltenizador de ese tren está fuera de servicio.

Luego el TEG entra a la torre regeneradora para posteriormente pasar a los intercambiadores de calor glicol/glicol, una vez que el TEG obtenga la temperatura adecuada entra al separador trifásico donde se separan las fases de glicol rico, líquidos condensados y gases que no fueron removidos en el desasfaltenizador. Seguidamente, pasa por los filtros con el fin de remover los sólidos suspendidos que estén en la corriente de glicol; luego el TEG pasa por el intercambiador de calor glicol/glicol para entrar a los rehervidores. Una vez regenerado el glicol, pasa nuevamente por los dos intercambiadores de calor y finalmente al acumulador de glicol.

##### 3.1.2 Filosofía de Control de los Rehervidores

El área de rehervidores del sistema de deshidratación de Muscar actualmente cuenta con un sistema BMS (Burner Management System) compuesto por un PLC Allen Bradley SLC500 Processor Unit modelo 1747-L20B para el control y supervisión de las variables que maneja el mismo, es importante mencionar que el control de dicho SLC es local, y que de las treinta señales asociadas a esta área, solo cuatro llegan al sistema de supervisión EXPERION, estas cuatro (4) señales salen directamente desde el instrumento en paralelo hacia el BMS local y hasta un controlador ubicado en sala de ingeniería para luego ser visualizadas en el Experion.

El sistema de control cuenta con tres secciones de control, una de tipo convencional basada en controladores y detectores de llama, otra compuesta propiamente por el controlador programable y la tercera la constituye la interfaz local hombre-máquina. Estas tres secciones están contenidas en el gabinete NEMA 4X y 3R. A continuación, en la Figura 1 se muestra el proceso de deshidratación del gas.

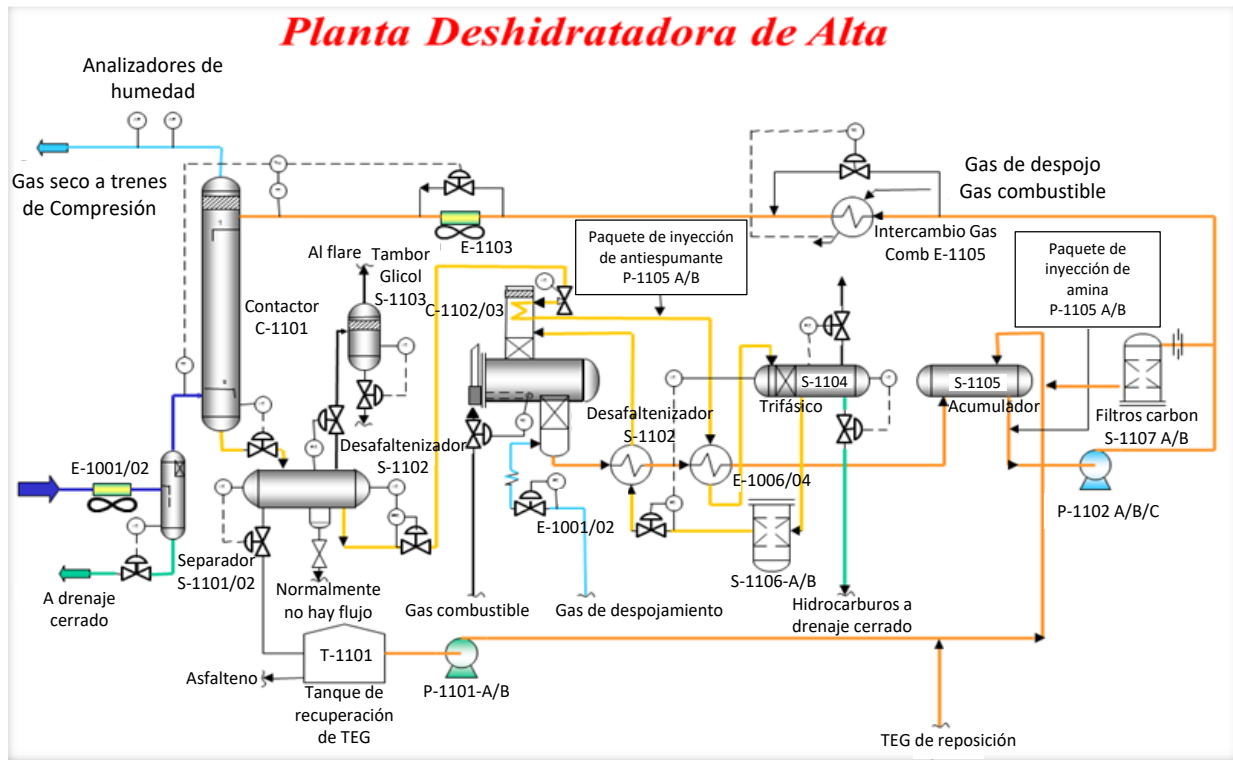


Figura 1. Proceso de deshidratación del gas

3.1.3 Descripción de la arquitectura tecnológica

La arquitectura tecnológica de los rehervidores está dividida en tres niveles totalmente interrelacionados, el primer nivel está conformado por los equipos de instrumentación instalados en campo, tales como transmisores de presión, indicadores de temperatura, válvulas de control, entre otros; el segundo está

compuesto por el sistema de control (SLC 500 del fabricante Allen Bradley). Y el último nivel está representado por el sistema de supervisión EXPERION PKS, las consolas de supervisión e ingeniería y los servidores maestros, incluyendo además los switches de procesos, y todos los equipos de telecomunicaciones que hacen vida en la red, tal y como se muestra en la Figura 2:

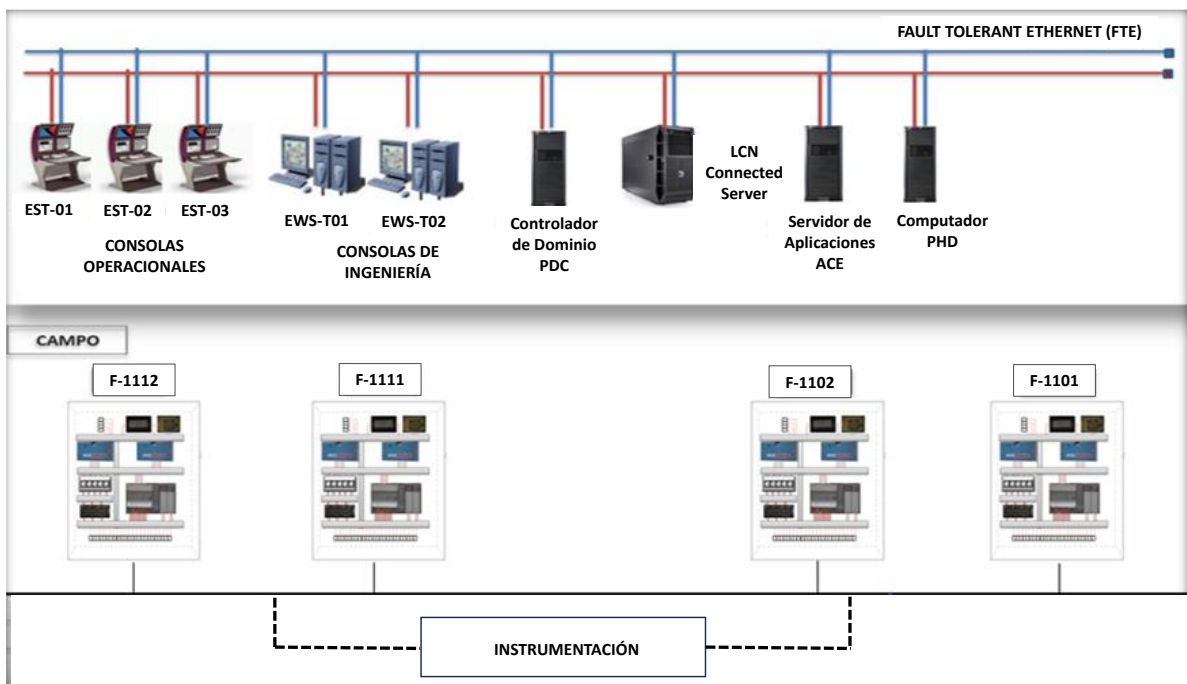


Figura 2. Arquitectura tecnológica actual de los rehervidores

A continuación, se detalla la arquitectura por cada nivel:

#### Nivel 1: Instrumentación.

En los rehervidores, existen instrumentos analógicos que tienen una alimentación de lazo y envían señales de 4-20 mA, instrumentos digitales que transmiten la señal con dos tensiones de línea. Cabe agregar, que los instrumentos envían sus datos a un BMS compuesto por un SLC 500, que se encuentra en el área de rehervidores, que se encarga del control de las señales asociadas a esta área.

#### Nivel 2: Sistema de control

El sistema de control existente en los rehervidores, cuenta con un sistema de control local denominado BMS (System Burner Management) compuesto por un SLC 500, el cual se encarga del control y supervisión de todas las señales asociadas a los rehervidores, cabe acotar que sólo cuatro de esas señales salen directamente del instrumento hasta la sala de control viajando a través de un cable de comunicación 485 hasta un controlador C300 de honeywell, el cual proporciona el control de procesos potente y robusto para la plataforma Experion, de allí pasan a los switches de procesos para conectarse a la red FTE (FaultTolerant Ethernet) del sistema EXPERION.

#### Nivel 3: Sistema de supervisión

Este nivel lo conforman los equipos de telecomunicaciones entre los cuales se encuentran las consolas de visualización del Experion, los servidores, los swiches, entre otros; estos equipos enviarán información al Sistema Experion PKS R311 por medio de los Servidores Redundantes, quienes están en capacidad de manejar información de la red FTE de Experion, el cual ayuda a los fabricantes industriales a aumentar su rentabilidad y productividad. Experion PKS transforma el control del proceso más allá del sistema tradicional de control distribuido (DCS) con la funcionalidad de una solución de automatización avanzada plataforma e integración de aplicaciones innovadoras para mejorar el rendimiento del negocio.

#### 3.1.4 Levantamiento de la información de los gabinetes instalados en campo

Una vez que se realizó el levantamiento de información para la identificación de todas las señales analógicas de entrada (AI), analógicas de salida (AO), digitales de entrada (DI) digitales de salida (DO) y hart de los rehervidores se elaboró una tabla resumen (ver Tabla 1) que contiene la cantidad de señales existentes de cada gabinete, dicha tabla representa un pilar fundamental para la selección de los equipos de adquisición de datos remotos, el tipo de red de comunicaciones e incluso del sistema de control necesario para satisfacer dichos requerimientos de entrada y salida.

**Tabla 1.** Resumen de señales existentes en los rehervidores

	TREN A		TREN B	
	REH.1	REH.2	REH.1	REH.2
DI	21	21	21	21
DO	8	8	8	8
AI	0	0	0	0
AO	0	0	0	0
HART	0	0	0	0
TOTAL	29	29	29	29

En la tabla anterior se puede observar que cada gabinete maneja 29 señales siendo todas estas discretas, dando un total de 116 señales.

### 3.2. Fase II. Conceptualizar

Se evaluó los requerimientos que debe poseer el sistema de control propuesto sin que afecte la homogeneidad de la plataforma existente en las diferentes instalaciones de PDVSA.

#### 3.2.1 Equipos tecnológicos disponibles para el sistema de control en los rehervidores

Se tomaron en cuenta los sistemas de control que se utilizan actualmente en la plataforma de PDVSA para garantizar mantener la homogeneidad de la plataforma tecnológica.

*Sistema de Control 1:* es ideal para procesos complejos, tiene un procesador potente, posee la capacidad de proveer integración en la comunicación, lo cual permite que se integren cada vez más funciones como el diagnóstico, la flexibilidad de memoria y el almacenamiento de datos. Posee un sistema de seguridad certificado TUV Rheinland, fácil de usar. Proporciona un CPU bien equilibrado, capaz de brindar un rendimiento apto para el manejo de instrucciones que van desde Booleanas hasta instrucciones en punto flotante. Es ideal para control de procesos complejos y posee las siguientes características:

- Para la programación del sistema se puede emplear cualquiera de los 4 lenguajes IEC 1131-3, en un ambiente de Windows (Unity, Concept).
- Sistema Multitarea (Multitasking) de alto nivel.
- Capacidad de Memoria de hasta 7MB.
- Seguridad de los Procesadores y módulos I/O.
- Plug & Play de alto rendimiento en caliente.
- Numerosos puertos integrados (Ethernet TCP/IP con el puerto del servidor web, Modbus plus y al menos un puerto serie Modbus) en el panel frontal.

*Sistema de Control 2:* es un sistema único e integrado que se puede utilizar en todas las aplicaciones de producción en todos los sectores comerciales. Esta propuesta es fundamental para elevar el nivel de automatización de procesos o soluciones para tareas relacionadas con la producción.

Características:

- Puerto estándar RS-485 con velocidad de transferencia de datos comprendida entre 1,2 y 187,5 Kbits/s.
- Conexión a Ethernet vía módulo dedicado.
- Estándar Windows.

*Sistema de Control 3:* Este es modular, es una plataforma de control de alto rendimiento, adecuada para el proceso secuencial y el control de movimiento. Este sistema se puede conectar a la arquitectura de redes abiertas Net Linx y ofrece una amplia gama de módulos digitales, analógicos y especialmente módulos I/O. Todos los controladores operan

con multitarea, multiprocesamiento y sistemas operativos que admiten el mismo conjunto de instrucciones en múltiples lenguajes de programación. A continuación, sus características:

- Multitarea (Multitasking).
- Multilenguaje de programación.
- Un modelo de red productor-consumidor.
- Control de movimiento altamente integrado.
- Mejoras en flash para actualizaciones del sistema en sitio.

3.2.2 Evaluación técnica de los equipos disponibles en el mercado.

Los requerimientos mínimos que debe poseer el sistema de control a proponer son los siguientes:

- Integrabilidad
- Seguridad
- Diseño modular
- Programación
- Control de proceso escalable
- Soporte técnico
- Destrezas técnicas del personal

- Costos

Una vez conocidos los sistemas que cumplen con los requerimientos mínimos, se realizó una matriz comparativa de tecnologías. Los pasos para la realización de la misma fueron los siguientes:

- Cada criterio se asoció con una letra correspondiente, es decir, la fila A representa el criterio A, la fila B corresponde al criterio B, y así sucesivamente.
- Posteriormente, se asignó un peso a cada criterio, seleccionando el grado de importancia del criterio (1: ninguna; 2: baja; 3: media; 4: alta), el cual se coloca en la casilla respectiva del valor de comparación.
- Después de vaciar la matriz de todas las comparaciones, se sumaron los puntos de cada criterio y se ponderó cada uno de ellos, teniendo cada uno un peso de 1 a 10, donde 1 es el mínimo y 10 el máximo.
- En la parte inferior de la matriz, cada una de las opciones estudiadas se colocó con un rango de números del 1 al 5 para indicar si la tecnología es adecuada para cumplir con los criterios de evaluación, como se muestra en la Figura 3.

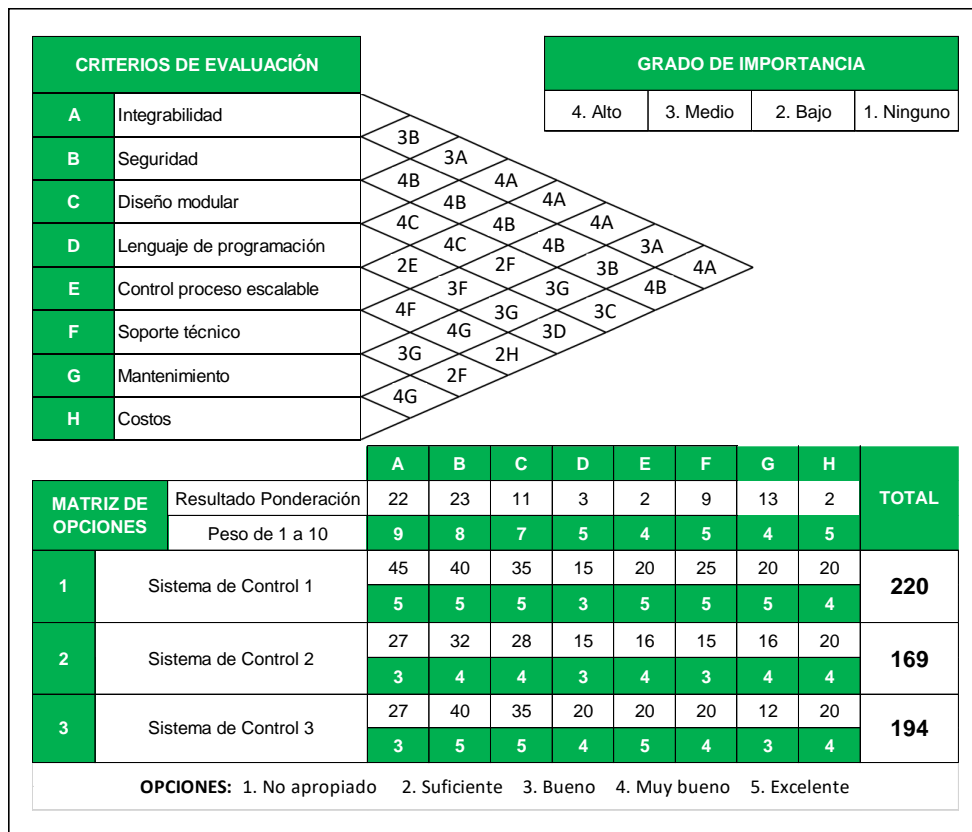


Figura 3. Matriz comparativa de tecnología para los transmisores

En la comparación de los sistemas de control realizada en la tabla anterior, se observa que el sistema de control 1 es el que mejor cumple con los criterios evaluados, obteniendo una puntuación total de 220 puntos, puntuación que lo ubica sobre los sistemas de control 2 y 3 los cuales obtuvieron una

ponderación de 169 y 194 puntos respectivamente. En los criterios relacionados con la seguridad, diseño modular, lenguaje de programación, control proceso escalable y costos, los 3 sistemas de control evaluados obtuvieron puntuaciones similares. En el criterio relacionado a la Integrabilidad, el

sistema de control 1 fue el ganador con una puntuación de 45 puntos, el sistema de control 2 y 3 obtuvieron una puntuación de 27 puntos cada uno. Para los criterios de soporte técnico y mantenimiento, el sistema de control 1 fue considerado la mejor opción con una puntuación de 25 puntos y 20 puntos, respectivamente.

### 3.2.3 Selección de las tecnologías a proponer

#### Selección del controlador

Los controladores del sistema de control 1 pueden monitorear y controlar entradas y salidas a través del backplane. Estos pueden comunicarse con computadoras u otros procesadores a través del medio RS-232-C, y redes como DeviceNet, ControlNet y EtherNet/IP. El controlador 1756-L6x ejecuta el Scan de lógica de escalera casi dos veces más rápido que los controladores 1756-L55; ejecuta instrucciones de control de movimiento, con datos matemáticos de tipo de datos REAL y bloques de función de 4 a 5 veces más rápido que los controladores 1756-L55. En este sentido, se seleccionó el controlador 1756-L61, que posee 2MBytes de memoria, se caracteriza como un PLC de gama media, por lo que posee las cualidades necesarias para satisfacer los requerimientos de proceso y control del área.

#### Selección del Chasis

Considerando los chasis disponibles en el mercado para la selección y la cantidad de tarjetas necesarias para lograr la comunicación de los instrumentos de campo hacia el Experion, se seleccionó un chasis de 7 slots, es decir el chasis 1756-A7, el cual posee una cantidad de slots suficientes para albergar las tarjetas necesarias para la comunicación y el procesamiento y deja espacio de reserva para futuras integraciones de tarjetas adicionales.

#### Selección de la fuente de alimentación

Las fuentes de alimentación eléctrica del sistema de control 3 se usan con el chasis 1756 para proporcionar alimentación eléctrica de 1.2 V, 3.3 V, 5 V y 24 VCC directamente al backplane del chasis. En este caso se seleccionó un chasis 1756-A7 de la serie B.

#### Selección de los Módulos I/O

Se seleccionó los módulos de I/O digitales 1756.

#### Selección de la red de comunicaciones

Las redes de la arquitectura NetLinx, es decir DeviceNet, ControlNet y EtherNet/IP, utilizan el mismo lenguaje y comparten un conjunto universal de servicios de comunicación. Tomando en cuenta las características que debe poseer la red de comunicación a proponer como lo son velocidad de transmisión, pericia del personal, robustez, soporte técnico, repuestos, programación de la red, cantidad de dispositivos que se pueden conectar a la red, se seleccionó la red Ethernet.

#### Selección del Software

En cuanto al software se seleccionó el paquete 9324-RLD700ESE RSLOGIX 5000 PROFESSIONAL, ESP. Este incluye el Rslinx profesional, y RsLogic 5000 Enterprise con una versión de firmware 16, además posee las facilidades de

programar en LadderLogic, texto estructurado, Diagrama de bloques funcionales, Diagramas de bloques secuenciales.

#### Ubicación de las tarjetas en el chasis principal

El chasis albergará la tarjeta Ethernet, además de la tarjeta del procesador, las cuales estarán ubicadas tal y como se muestra en la Tabla 2, en la que se presenta el listado de partes necesarias para la puesta en marcha del sistema de control, y la respectiva ubicación de las tarjetas seleccionadas en los slots del chasis principal.

**Tabla 2.** Lista de partes, chasis principal del PLC

SLOT	NÚMERO DE PARTES	DESCRIPCIÓN
	1756-A7	Chasis 7 Slot
	1756-PA75	Controllogix Power Supplies
0	1756-L63	Procesador Logix 5563
1	1756 - ENET	Ethernet/IP Bridge
2	1756-IB32	Input Module 32
3	1756-OB16I	Output Module 16 Aislado
4	1756 - IT61	Módulo Entrada Thermocouple
5	1756- IF6I	Módulo Entrada Analógica

#### Selección del Panel View

Se seleccionó el panelview PV PLUS 1500 Mod. 2711P-B15C4A, el cual tiene una pantalla plana a colores de 15 pulg. (38.1 cm) con una resolución de 640 x 480 (mínima) y gráficos de 18 bits. Este terminal admite la entrada del operador a través de un teclado (40 teclas de función), una pantalla táctil o un teclado y una pantalla táctil.

#### Selección del Switch

Se consideró el switch instalado actualmente en Muscar como lo es el EDS-505A el cual tiene 5 puertos Ethernet será el encargado de establecer la comunicación entre los gabinetes vía Ethernet, un gabinete será el maestro el cual se utilizará un switch Model EDS-508-MM-SC-T con 6 puertos Ethernet y 2 puertos de fibra óptica multi-modo.

#### Selección del UV

El Ultraviolet Flame Detector es el dispositivo encargado de detectar la llama necesaria para la ignición y puesta en marcha del rehervidor, este se encuentra instalado dentro del propio rehervidor, cada rehervidor requiere de dos UV; estos al detectar la llama del piloto envía una señal a los módulos honeywell instalados dentro del gabinete, a su vez estos módulos envían una señal de "piloto encendido" al PLC y al transformador simultáneamente, el transformador da la señal para encender la llama del quemador. El UV al detectar llama en el quemador le vuelve a enviar una señal al módulo honeywell y este de inmediato al PLC para que este último controle y supervise todo el proceso del rehervidor en operación. El UV MODEL U2-2016-PF, es un detector de llama con salida 4-20mA, es decir que se comunicaría directamente con el sistema de control seleccionado.

### 3.3 Fase II. Definir

En esta fase se realizó el diseño de la nueva arquitectura tecnológica del sistema de control de los rehervidores, tomando como referencia las tecnologías seleccionadas.

### 3.3.1 Creación de la base de datos que se implementará en la arquitectura de control propuesta

Una vez validadas las señales que se encuentran operativas en el área de rehervidores, así como los instrumentos existentes, se procedió a la elaboración de una base de datos en la cual se registró la totalidad de las señales que van a ser enviadas al sistema de supervisión, el tag utilizado para describir los

instrumentos, el tag utilizado en el sistema EXPERION, el tipo de I/O, entre otra información relacionada con los gabinetes instalados en campo.

### 3.3.2 Diseño de la arquitectura tecnológica a proponer

Una vez que se realice la conexión del sistema de control y se realice el cableado respectivo, la arquitectura de control quedará como se muestra en la Figura 4, donde se puede observar la disminución de los puntos de falla de la red.

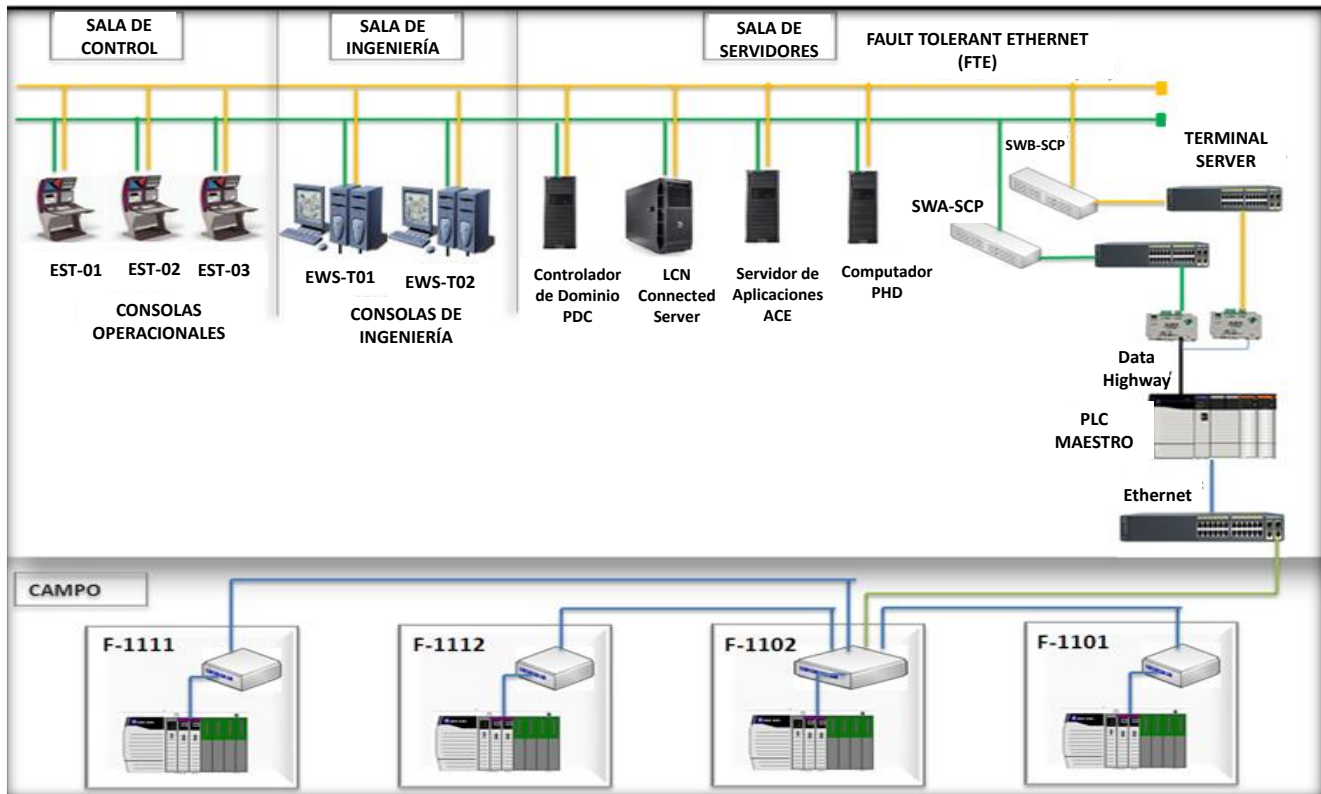


Figura 4. Arquitectura tecnológica a proponer

En la arquitectura propuesta las señales provenientes de los instrumentos van a los gabinetes instalados en campo en una red punto a punto, tal y como lo hacen actualmente, las mismas se distribuyen de acuerdo a los diagramas de conexionado, en los cuales se muestra a manera de diagrama la ubicación del cableado de las señales. Además, se realizaron diagramas causa-efecto para realizar la lógica de las señales de una manera accesible y comprensible para el personal mantenedor de la arquitectura tecnológica que opera en los rehervidores.

Una vez en los gabinetes instalados en campo, las señales llegan al sistema de control 1 y de ahí se dirigen vía Ethernet a un switch Industrial Ethernet Model EDS-505A que contiene 5 puertos Ethernet y será el switch que establecerá la comunicación entre cada gabinete, cabe acotar que el gabinete F-1102 correspondiente al rehervidor 2 del Tren A será el maestro. Es decir, en este estará un switch EDS-508-MM-SC-T, el cual contiene 6 puertos Ethernet 10/100BaseT y 2 puertos

de fibra óptica 100BaseFX multimodo, estos switches cuentan con una temperatura de operación comprendida entre  $-40$  a  $75^{\circ}\text{C}$ , siendo así unos switches aptos para operar en dicha área. Cada switch estará ubicado en el mismo gabinete, cabe acotar que cada gabinete tendrá uno. En otros términos, se necesitarán 4 switches, 3 Model EDS-505A y un EDS-508-MM-SC-T. En este sentido, estos switches serán los encargados de dar servicio de red a los PLC para garantizar la supervisión y control de los equipos.

A partir del gabinete F-1102 los datos son enviados a través de un medio fibra óptica multimodo, en vista de que es un medio óptimo para conexiones a distancias y es menos propenso a verse afectado por las interferencias electromagnéticas (EMI) producidas por diversos equipos en campo y los altos voltajes que se implementan en el mismo. De este modo dichas señales llegan a un switch catalyst 2960 que ya se encuentra instalado en sala de ingeniería, este dispositivo es aprovechado para la

conversión de la señal de fibra óptica a cable de par trenzado UTP RJ-45 con la finalidad de establecer la comunicación con los PLC's de los rehervidores instalados en campo.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado podríamos acotar que este switch convierte el medio de fibra óptica multimodo a UTP RJ-45, y de éste los datos viajan directo a un PLC-5 maestro donde son enviados a unos controladores DL-3500 el cual pueden recibir y transmitir información con los PLC's, dicha información viaja vía Data Highway DH+ al terminal server y así a los switches de proceso donde finalmente entran a la red FTE (Fault Tolerant Ethernet) del Experion. Es importante que el EXPERION se comunicará con el PLC por medio del protocolo Allen Bradley, tal y como lo hace actualmente.

## CONCLUSIONES

Se evaluaron los sistemas de control con características similares a la Planta Muscar. La evaluación de dichos sistemas mediante la matriz de selección de tecnologías permitió determinar de una manera objetiva y confiable por medio de la valoración de ciertos criterios establecidos, el sistema de control adecuado para garantizar la supervisión y control de las variables que intervienen en el proceso de deshidratación del gas y por ende en los rehervidores.

La propuesta contempla equipos y componentes que pueden integrarse a la tecnología actual brindando una plataforma tecnológica acorde a las necesidades de los procesos y con gran disponibilidad de sus repuestos en el mercado. La propuesta garantiza la operatividad y producción de la planta, y permite aumentar los niveles de confiabilidad del sistema. La selección del sistema de control fue la pieza clave para determinar los equipos o componentes que integraron la nueva arquitectura tecnológica, en vista de que éstos se deben adaptar a las exigencias del entorno.

La propuesta de la nueva arquitectura del sistema de supervisión y control de rehervidores de deshidratación de gas permite el monitoreo continuo de las condiciones del proceso de deshidratación, incluyendo la temperatura, la presión, el flujo de gas, el caudal de agua y los niveles de líquidos, permitiendo garantizar la eficiencia del proceso de deshidratación de gas natural, lo que puede reducir los costos y mejorar la calidad del gas. Además, el monitoreo continuo del sistema puede ayudar a identificar problemas potenciales antes de que se conviertan en problemas mayores, lo que puede minimizar el tiempo de inactividad y los costos de reparación.

La presente investigación sirve como referencia a las plantas de compresión de gas de la industria petrolera venezolana que requieran la implementación de un sistema de supervisión y control de rehervidores de deshidratación de gas que permita el monitoreo continuo de las condiciones del proceso de deshidratación (temperatura, presión, flujo de gas, caudal de agua y niveles de líquidos). El estudio puede ser replicado en otras plantas de gas, ya que la industria petrolera venezolana mantiene una plataforma homologada aprobada donde los

equipos considerados tomaron en cuenta los estándares establecidos por las normativas de PDVSA. Las empresas petroleras que tengan plantas de compresión de gas podrán replicar el estudio considerando la naturaleza y particularidad de su plataforma, lo que podría conllevar posibles cambios de equipos y/o dispositivos propuestos en la presente investigación.

## REFERENCIAS

- Bortolini, M., Galizia, F., and Mora, C. (2018), Reconfigurable manufacturing systems: Review of the literature and research trend. *Journal of Manufacturing Systems*, 49(2018), 93-106. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.09.005>
- Cotrina, M. (2019). Diseño de la instrumentación para el sistema de automatización y control de la planta de abastecimiento y despacho de biocombustibles en la región de Puerto Maldonado. [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Tecnológica del Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/2375>
- Corvo, R. (2018). Migración del Sistema de Control y Supervisión Scada S3 al Sistema Guardian del Alba en la Estación de Flujo Amaná, División Punta de Mata. [Tesis pregrado, Universidad de Oriente. Venezuela].
- Díaz, J. (2019). Diseño de un sistema de control basado en Scada en una estación de descompresión de gas natural comprimido para la reducción de costos de producción en plantas de fabricación de ladrillos [Tesis pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/21572>
- Estrada, L, Chacín, J., Pérez, K. (2017). Sistema de control y monitoreo de inyección a gas para pozos petroleros [Tesis pregrado, Universidad Privada Dr. Rafael Belloso Chacín]. Renati. <http://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/2028714>
- García, M., Irisarri, E., Pérez, F., Estévez, E., & Marcos, M. (2018). Automation Architecture Based on Cyber-Physical Systems for Flexible Manufacturing in the Oil and Gas Industry. *Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial*, 15(2), 156-166. <https://doi.org/10.4995/riai.2017.8823>
- PDVSA (1999) Guía de gestión de proyectos de inversión de capital (GGPIC). Caracas: Comité de Operaciones de PDVSA. [http://www.pdvsa.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=9073&Itemid=59](http://www.pdvsa.com/index.php?option=com_content&view=article&id=9073&Itemid=59)
- Lashin, M. (2014). Different Applications of Programmable Logic Controller (PLC). *International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology*, 4(1), 27-32. <https://doi.org/10.5121/ijcseit.2014.4103>
- Maganha, I., Silva, C., y Ferreira, L. (2018). Understanding reconfigurability of manufacturing systems: An empirical analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 48 (Part A), 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.07.004>
- Melgarejo-Jara, M., Chamorro-Atalaya, O., Aldana-Trejo, F., Alvarado-Bravo, N., Farfán-Aguilar, J., Zevallos-Vera, E., and Anicama-Navarrete, E. (2023). Automated

drainage system for thermoelectric power plant. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 29(3), 1393–1401. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v29.i3>

Velásquez, C. (2015). Automation of oil transfer pump room, of the flow station of the Amana operational complex (Coa), PDVSA-District Punta de Mata, Monagas state. [Tesis pregrado, Universidad de Oriente. Venezuela].

Tavara, J. (2016). Dimensionamiento de sistema para inyección de gas a alta presión para remover remanentes de petróleo. [Tesis pregrado, Universidad de Piura. Perú]. PIRHUA. [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2649/MAS\\_IME\\_SEM\\_011.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2649/MAS_IME_SEM_011.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Tidrea, A., Korodi, A. and Silea, I. (2023). Elliptic Curve Cryptography Considerations for Securing Automation and SCADA Systems. *Sensors Open Access*, 23(5), Article 2686. <https://doi.org/10.3390/s23052686>

Tomar, I., Sreedevi, I., and Pandey, N. (2022). PLC and SCADA based Real Time Monitoring and Train Control System for the Metro Railways Infrastructure. *Wireless Personal Communications*, 129(2023), 521–548. <https://doi.org/10.1007/s11277-022-10109-1>

Tomar, B., and Kumar, N. (2020). PLC and SCADA based Industrial Automated System. *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, Bangluru, India, 2020, 1-5, Article 9298190. <https://doi.org/10.1109/INOCON50539.2020.9298190>

Tomar, B., Kumar, N., and Sreejeth, M. (2023). Real Time Automation and Ratio Control Using PLC & SCADA in Industry 4.0. *Computer Systems Science and Engineering*, 45(2), 1495–1516. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.030635>

Parra-Camacho, L., Rodríguez-Bayona, A., and Carreno-Zagarra, J. (2023). Automation and control of the thermal mixing process. *Systems Science and Control Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/21642583.2023.2177769>

Ronceros, C. & Pombas, R. (2023). Modelo de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad Operacional para una Planta Compresora de Gas. *Revista Politécnica*, 51(1), 117–129. <https://doi.org/10.33333/rp.vol51n1.10>

Ronceros, C., Medina, J., Vásquez, J., León, P., Fernández, J., and Urdy, E. (2023). Supervision and Control System of the Operational Variables of a Cluster in a High-Pressure Gas Injection Plant. *Processes*, 11(3), 698. <https://doi.org/10.3390/pr11030698>

Ronceros, C. (2022). Modelado de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de la plataforma de telecomunicaciones y transmisión de datos. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 34(2), 85–104. <https://doi.org/10.37815/rte.v34n2.914>

## BIOGRAFÍAS



**Cristhian, Ronceros Morales**, Doctor en Gerencia por la Universidad Yacambú, Magíster en Gerencia General por la UDO. Ingeniero de Sistemas por la UDO. Estudios avanzados en Gestión de Proyectos TIC y Certificaciones internacionales en Coaching organizacional y PNL. Experiencia de 19 años Petróleos de Venezuela S.A, desempeñando cargos

supervisores y gerenciales en el área TI. Experiencia de 22 años como docente universitario. Docente de la Universidad Privada San Juan Bautista (Perú). Docente investigador de la UDO (Venezuela). Autor de libro de metodología de la investigación, autor y coautor de varias publicaciones en las áreas de automatización, confiabilidad operacional, proyectos y gerencia. Scopus Author ID: 58094434900



**Yuselys del Valle, Martínez Zambrano**, Ingeniero Sistemas por Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño. Magister en Informática Gerencial por la Universidad de Oriente. Experiencia de 17 años en la Industria Petrolera Venezolana (PDVSA). Coautora de artículos

científicos. Scopus Author ID: 58305301300



**Rubén Darío, Vega Mejía**, Doctorando Unexpo- Barquisimeto en Ciencias de la Ingeniería. Magister en Gerencia Empresarial - UFT. Ingeniero Mecánico – ULA. Profesor titular de la Universidad de Oriente. Investigador Nacional PEII-A2. Coordinador de la Maestría de Ingeniería de Gas de la Universidad de Oriente, Núcleo de

Monagas.





**Yenisbeth, Rodríguez Ruiz**, Magíster Scientiarum en Ciencias Administrativas mención en Gerencia General por la Universidad de Oriente. Ingeniero de Sistemas por la Universidad de Oriente. 10 años de experiencia en Petróleos de Venezuela, S.A (PDVSA), desempeñando cargos de ingeniería y de supervisión en el

área de planificación.



# Análisis del Retardo en la Transmisión de Secuencia de Tramas en Redes Inalámbricas de Sensores Lineales Usando iACK

Egas, Carlos<sup>1\*</sup> ; Gil-Castiñeira, Felipe<sup>2</sup> ; Herrera, Carlos<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Quito, Ecuador

<sup>2</sup> Universidad de Vigo, GTI, Vigo, España,

**Resumen:** La transmisión confiable con bajo retardo y baja potencia son parámetros que deben cumplirse en el diseño de redes inalámbricas de sensores lineales con múltiples saltos que operan con el protocolo IEEE 802.15.4. Para minimizar el retardo por procesamiento en el nodo debido a la confirmación de la recepción de la trama, se utiliza la confirmación implícita en lugar de la confirmación explícita manteniendo la misma confiabilidad, lo que permite minimizar los retardos de extremo a extremo en redes multisalto con topología lineal con cientos de nodos. Se analiza matemáticamente los retardos cuando un nodo tiene que transmitir o retransmitir secuencias de tramas en topologías lineales utilizando una confirmación implícita y explícita, y se los compara con los resultados obtenidos en un prototipo de red construido para tal efecto. El análisis revela que el uso de la confirmación implícita en la transmisión de secuencias de tramas en topologías lineales disminuye el retardo por procesamiento en el nodo sensor y el retardo de extremo a extremo.

**Palabras clave:** sensores, inalámbricos, lineal, retardo, enlace

## Analysis of the Delay in the Transmission of Frame Sequence in Wireless Networks of Linear Sensors Using iACK

**Abstract:** Reliable transmission with low delay and low power are parameters that must be met in the design of multi-hop wireless linear sensor networks that operate with the IEEE 802.15.4 protocol. In order to minimize the processing delay in the node due to the confirmation of the reception of the frame, the implicit confirmation is used instead of the explicit confirmation maintaining the same reliability, which allows minimizing the end-to-end delays in multi-hop networks with linear topology with hundreds of nodes. The delays are mathematically analyzed when a node has to transmit or retransmit frame sequences in linear topologies using an implicit and explicit confirmation, and they are compared with the results obtained in a network prototype built for this purpose. The analysis reveals that the use of implicit confirmation in the transmission of frame sequences in linear topologies decreases the processing delay at the sensor node and the end-to-end delay.

**Keywords:** sensors, wireless, linear, delay, link

### 1. INTRODUCCIÓN

Una red inalámbrica de sensores (WSN) se utiliza para obtener información de monitoreo para una aplicación determinada. Una WSN está formada por nodos que tienen limitaciones en la capacidad de cálculo, lo que genera retrasos de procesamiento en el nodo, y limitaciones en la energía disponible, debido a que funcionan con baterías, afectando la vida útil de los nodos y por lo tanto al funcionamiento de la red. Para disponer de conectividad extremo a extremo en una WSN, se han creado protocolos de comunicación específicamente diseñados para redes de sensores inalámbricos como Zigbee (Agarwal, 2015) o se ha adaptado el protocolo IPv6 para trabajar en una WSN, creando 6LowPAN (Chen et al., 2011)

para tener compatibilidad con la red de Internet. En las redes de sensores inalámbricos, el estándar para la capa de enlace y capa física es IEEE 802.15.4 (IEEE Standard, 2006). Los protocolos 6LowPAN y Zigbee utilizan IEEE 802.15.4 mientras que los protocolos WirelessHART (Luo et al., 2021) e ISA100.11a (Sen, 2021) solo utilizan la capa física.

Al presente, no existe la estandarización de la arquitectura para redes inalámbricas de sensores (Kumar S. et al., 2014), situación que se evidencia en la actualidad con la utilización de diferentes protocolos a partir de la capa de enlace. Por otro lado, existen dos tendencias relacionadas con la definición de la arquitectura WSN (Acosta et al., 2020). La primera tendencia indica que la arquitectura de la WSN debe ser similar a la

\*carlos.egas@epn.edu.ec

Recibido: 13/05/2023

Aceptado: 24/08/2023

Publicado en línea: 14/11/2023

10.33333/rp.vol52n2.07

CC 4.0

arquitectura de Internet, y la otra tendencia indica que la arquitectura depende de la aplicación.

Las redes de topología lineal multsalto a gran escala, denominadas LWSN (Sokullu & Demir, 2018), se caracterizan por tener miles de nodos. Estos sistemas se utilizan en diversas aplicaciones (Imran et al., 2016), incluida la supervisión de carreteras (Abbas et al., 2018), tuberías (Varshney et al., 2021), en la industria del gas (Lee et al., 2020), y se ha convertido en la tecnología preferida debido a los bajos costos de implementación y operación en infraestructuras lineales de cientos de kilómetros debido a que el costo para implementar la infraestructura física cableada para la transmisión de datos y el suministro de energía es alto.

En el caso de las redes inalámbricas de sensores con topología lineal (LWSN), al tener una sola ruta entre el nodo fuente y el nodo frontera, no se requiere el proceso de enrutamiento (Egas Acosta et al., 2021) y el nodo al tener una misma interface inalámbrica para la transmisión y recepción de datos, no requiere realizar el proceso de conmutación. Para optimizar los retrasos de procesamiento en el nodo en LWSN, es necesario definir una arquitectura que no tenga conmutación y enrutamiento las cuales son funciones de la capa de red, la eliminación de la capa de red obliga a que las funciones adicionales del nivel de red que se utilizan para tener conectividad de extremo, deben ser implementadas a nivel de enlace o a nivel de transporte.

En LWSN, el retraso de extremo a extremo y el consumo de energía de los nodos es un problema a resolver por lo cual es necesario crear las condiciones adecuadas que permitan la implementación de nuevas aplicaciones en LWSN.

El protocolo IEEE 802.15.4 permite que el nodo receptor, confirme al nodo transmisor la recepción exitosa de la trama utilizando la trama de confirmación conocida como ACK. Esta técnica se conoce como confirmación explícita eACK, el uso de eACK es opcional. En una estructura lineal como se observa en la Figura 1, cuando el nodo intermedio  $v_i$  tiene varias tramas para retransmitir al nodo fronterizo  $v_{n+1}$ , debe esperar a que el nodo  $v_{i+1}$  confirme la recepción de la primera trama con eACK y de esta manera, el nodo retransmite la segunda trama, proceso que se repite con todas las tramas que están almacenadas en  $v_i$  para ser retransmitidas. El tiempo de espera del nodo  $v_i$  para recibir la confirmación eACK del nodo  $v_{i+1}$ , es un parámetro que afecta el tiempo que tarda el nodo  $v_i$  en transmitir varias tramas y por lo tanto a su consumo de energía.

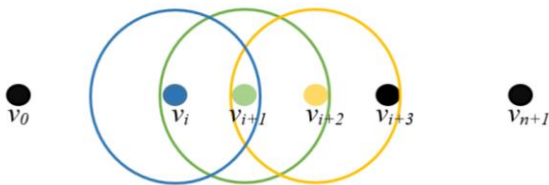


Figura 1. Estructura lineal multsalto

Cuando el nodo  $v_{i+1}$  recibe la trama de  $v_i$ , el momento en que el nodo  $v_{i+1}$  retransmite la trama al nodo  $v_{i+2}$ , la señal es captada por el nodo  $v_i$  y por tanto, este nodo sabe que su transmisión al nodo  $v_{i+1}$  fue exitosa, dando lugar a la confirmación implícita de la trama, denominada como iACK.

En una topología lineal multsalto formada por  $n+2$  nodos, cuando el nodo  $v_i$  detecta un evento, y tiene que transmitir la información utilizando  $k$  tramas, el nodo las transmite al nodo

$v_{i+1}$  y este nodo retransmite las tramas al nodo  $v_{i+2}$  y así sucesivamente hasta que todas las tramas lleguen al nodo de borde  $v_{n+1}$ . El nodo  $v_{i+1}$  debe tener prioridad sobre  $v_i$  en el uso del canal para retransmitir la trama al nodo  $v_{i+2}$  con el propósito de disminuir los retardos de extremo a extremo.

Estudios anteriores han demostrado la ventaja de usar iACK en lugar de eACK en condiciones de ruido y diferentes tipos de tráfico (Rosberg et al., 2008), del mismo modo, se ha encontrado que la confirmación de mensajes de nodo a nodo (capa de enlace) es mejor que la confirmación de mensajes de extremo a extremo (capa de transporte), optimizando el consumo de energía y los retardos de transmisión (Shanti & Sahoo, 2014). En el caso de las topologías lineales, se ha demostrado que el uso de iACK disminuye el retardo en el nodo por retransmisión de una trama y en el retardo de extremo a extremo, además reduce el consumo de energía de los nodos intermedios que tienen que retransmitir la trama a lo largo de la infraestructura lineal (Acosta et al., 2020). Estas investigaciones son las premisas en las cuales se basa nuestra propuesta que permite minimizar los retardos.

Analizamos la ventaja de usar iACK en lugar de eACK en topologías lineales cuando un nodo necesita enviar un mensaje al nodo frontera utilizando  $k$  tramas de datos con el protocolo IEEE 802.15.4. Cuantificamos las ventajas de usar iACK, en el retardo por procesamiento en el nodo y en el retraso en la transmisión de extremo a extremo manteniendo la misma fiabilidad que eACK.

En este contexto, la propuesta de utilizar iACK en estructuras lineales, cuando un nodo tiene que retransmitir varias tramas genera las siguientes contribuciones:

1. Disminuye el retardo de extremo a extremo.
2. Disminuye el retardo por procesamiento en el nodo que retransmite las tramas.
3. Facilita la utilización del estándar IEEE 802.15.4 como una tecnología para el desarrollo de aplicaciones de monitoreo en estructuras lineales a gran escala.
4. Contribuye para la prouesta de una arquitectura de red para LWSN sin capa de red

## 2. TRABAJOS RELACIONADOS

La mayor parte de las investigaciones realizadas en redes inalámbricas de sensores con topología lineal, con el propósito de optimizar los retardos en el nodo, están relacionadas con nuevos protocolos para la capa MAC diseñados específicamente para topología lineales (Singh et al., 2019). En otros casos, se han definido algoritmos para determinar las ubicaciones óptimas de los nodos en la estructura lineal (Albaseer & Baroudi, 2019). Nuevos esquemas de enrutamiento (Varshney et al., 2019) han sido propuestos. En Li et al. (2019), los autores para equilibrar la fiabilidad y el consumo de energía en una red de difusión con topología de tipo árbol, utilizan iACK y lo comparan con eACK, además de evaluar el consumo de energía en condiciones de ruido.

En Blagojević et al. (2011), se propone el uso de reconocimientos probabilísticos, basados en la calidad del enlace entre nodos, expresados como proporciones de recepción de paquetes que ofrecen varias ventajas en comparación con los métodos tradicionales de ARQ. En Dong et al. (2016), se presenta un protocolo de recopilación de datos

que combina NACK y ACK para una transmisión óptima de varias tramas a lo largo de topologías de tipo árbol de salto múltiple aplicadas a redes de sensores inalámbricos.

En Bagci (2016), se propone un protocolo MAC para el ahorro de energía basado en token ring en el que se optimizan los tiempos en los que el nodo tiene que estar en modo de recepción. Tharatipayakul et al. (2014) analizan la disminución del retardo y el aumento efectivo del porcentaje de paquetes recibidos cuando se utiliza iACK en una red inalámbrica de sensores IP multidifusión. En Rosberg et al. (2008) se compara la eficiencia energética de ARQ al trabajar en el modo para y espera, con el esquema iACK utilizado en la capa de enlace en redes multisalto, analizando las consecuencias de usar iACK con las altas pérdidas de paquetes.

Todas las investigaciones anteriores consideran escenarios con topologías de malla, árbol o estrella, las redes inalámbricas de sensores con topología lineal, tienen la característica especial de tener una única ruta multisalto por la cual la trama debe llegar a su destino, por lo tanto se considera que los protocolos de enrutamiento son demasiado complejos para ser utilizados en redes con topología lineal. Por otro lado, en el diseño de los protocolos para la capa de enlace, se consideran cientos de nodos dentro del área de cobertura de un nodo sensor, en topologías lineales, en la mayoría de aplicaciones, el número de nodos sensores que están dentro del área de cobertura de un nodo es mínimo lo que genera redes multisalto como se aprecia en la Figura 1 y las aplicaciones que generan de alarmas generan poco tráfico como por ejemplo la detección perforaciones no autorizadas en tuberías para el robo de gasolina.

### 3. PROPUESTA

Nuestra propuesta valida la utilización del estándar IEEE 802.15.4 en redes multisalto con topología lineal con cientos de nodos sensores retransmisores optimizando el retardo por procesamiento en el nodo y el retardo extremo a extremo, cuando se tiene que transmitir un mensaje utilizando varias tramas sin la utilización de los procesos del nivel de red.

El análisis realizado, considera redes de monitoreo en una estructura lineal a gran escala que tienen las siguientes características:

- Cuando el nodo  $v_i$  tiene  $k$  tramas para transmitir al nodo  $v_{i+1}$ , en el momento que  $v_{i+1}$  retransmite la trama al nodo  $v_{i+2}$ , el nodo  $v_i$  puede empezar a transmitir la siguiente trama al nodo  $v_{i+1}$ , por lo tanto, existe la posibilidad de colisiones de la señal de los nodos  $v_i$  y  $v_{i+1}$ .
- Cuando el nodo  $v_i$  tiene que seguir transmitiendo varias tramas al nodo  $v_{i+1}$ , en el momento en que  $v_{i+2}$  retransmite una trama al nodo  $v_{i+3}$ , existe la posibilidad de tener problemas relacionados con el nodo oculto en el nodo  $v_{i+1}$  con los nodos  $v_i$  y  $v_{i+2}$ .
- Los nodos están ubicados en zonas despobladas donde la presencia de interferencias es mínima (por ejemplo, en redes de monitorización de tuberías, bordes de carreteras, etc.), por lo que la probabilidad de error al transmitir una trama en cada enlace es la misma, y se considera despreciable.

- La probabilidad de que ocurran eventos simultáneos a lo largo de la infraestructura lineal en el mismo instante es poco probable.

El nodo  $v_i$  al detectar un evento de monitoreo o alarma, genera información que requiere de  $k$  tramas para transmitir los datos obtenidos. Esta condición es consecuencia de que la trama IEEE 802.15.4 tiene una longitud máxima de 127 bytes, lo cual no puede ser suficiente para transmitir en una sola trama la información.

Para realizar el análisis matemático, consideramos una LWSN que opera con el estándar IEEE 802.15.4, en el modo no ranurado, el nodo receptor se encuentra en el extremo de la zona de cobertura y se considera que los nodos pueden estar ubicados hasta una distancia máxima de 50 metros.

En el análisis se definen las siguientes variables;  $x$  representa el número de bytes que deben ser encapsulados en la trama IEEE 802.15.4,  $T_{BO}$  es período de espera (backoff),  $T_{CCA}$  representa el tiempo requerido para evaluar si el canal está libre,  $T_{tra(x)}$  es el tiempo requerido para la transmisión de una trama con una carga útil de  $x$  byte,  $T_{TA}$  es el tiempo que se requiere para pasar del modo de TX al modo RX,  $T_{ACK}$  es tiempo de transmisión para una trama ACK,  $T_{IFS}$  (Interframe Space time) es el tiempo de procesamiento que requiere el nodo para procesar una trama. Debido a que la distancia entre los nodos es pequeña, el tiempo de propagación se considera insignificante. La velocidad utilizada en el análisis es de 250 kbps, por lo tanto, 1 símbolo que se compone de 4 byte, tiene un período  $T_s = 16\mu s$ . El período de backoff se calcula como el producto entre el número de ranuras de backoff y el tiempo de cada ranura (20 símbolos). El número de ranuras que forman parte del tiempo de backoff es un número aleatorio que se obtiene de la siguiente expresión  $(0, 2^{BE}-1)$ , con un valor mínimo de BE igual a 3. El tiempo sugerido para que un nodo procese una trama  $y$ , por lo tanto, pase al estado de recepción o transmisión está dado por el período mínimo de separación entre tramas (IFS). La duración del período IFS depende del tamaño de la trama. La trama IEEE 802.15.4 con una longitud de hasta 18 bytes debe ir seguida de un período SIFS de al menos 12 períodos de símbolos. Las tramas con longitudes superiores a 18 bytes deben ir seguidas de un LIFS de al menos 40 períodos de símbolos. En casos reales, este retraso mínimo de IFS generalmente es absorbido por el tiempo de acceso al canal CSMA-CA. El análisis del retardo se realiza cuando se transmiten dos tramas luego se generaliza para  $k$  tramas.

En la Figura 2 se presenta la secuencia de transmisión de la segunda trama del nodo  $v_i$  al nodo  $v_{i+1}$  utilizando eACK. El nodo  $v_i$  transmite la trama en  $t_1$ , en  $t_2$  está listo para transmitir la segunda trama. Cuando el nodo  $v_i$  recibe el ACK, no puede enviar la segunda trama porque la prioridad de uso del canal es del nodo  $v_{i+1}$  para que pueda reenviar la trama al nodo  $v_{i+2}$ . Por lo tanto, en  $t_3$ , el nodo  $v_i$  no puede comenzar a generar el tiempo de backoff para transmitir la segunda trama para evitar colisiones con el nodo  $v_{i+1}$ . Por lo que debe esperar un tiempo para que el momento que el nodo  $v_i$  detecte la utilización del canal, el canal ya esté siendo utilizado por el nodo  $v_{i+1}$  y de esta manera se evita la transmisión de la segunda trama debido a que el nodo  $v_{i+1}$  está ocupado retransmitiendo la trama.

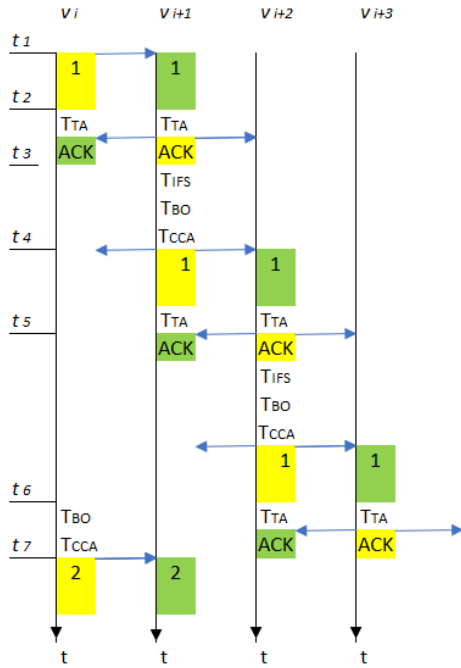


Figura 2. Secuencia de envío de segunda trama con eACK

En  $t_3$ , el nodo  $v_{i+1}$  tiene la prioridad de reenviar la trama a  $v_{i+2}$  y la envía en  $t_4$ . A partir de  $t_5$ ,  $v_i$  no puede transmitir la segunda trama para evitar el problema del nodo oculto cuando el nodo  $v_{i+2}$  retransmite la trama al nodo  $v_{i+3}$  debido a que la señal emitida por  $v_{i+2}$  también llega a  $v_{i+1}$ . Por lo tanto, con eACK, el nodo  $v_i$  en  $t_6$  debe empezar a ejecutar a los procesos para transmitir la segunda trama en  $t_7$  y de esta manera evitar colisiones, el problema del nodo oculto y minimizar los retardos en la transmisión de la primera trama

En la Figura 3, se presenta el proceso de transmisión de la segunda trama por parte del nodo  $v_i$  utilizando iACK. En este caso, en  $t_1$ , el nodo  $v_i$  transmite la primera trama al nodo  $v_{i+1}$ , el nodo  $v_i$  no puede transmitir inmediatamente la segunda trama en  $t_2$  al nodo  $v_{i+1}$  porque necesita recibir el iACK, además, el nodo  $v_{i+1}$  tiene prioridad para retransmitir la trama al nodo  $v_{i+2}$ . Después de un tiempo  $T_w$  definido por la siguiente expresión:

$$T_w = T_{TA} + T_{BO} + T_{CCA}$$

el nodo  $v_{i+1}$  retransmite la trama al nodo  $v_{i+2}$  en  $t_3$  y por lo tanto con esta retransmisión el nodo  $v_i$  recibe el iACK.

El nodo  $v_i$  tiene que esperar a que el nodo  $v_{i+1}$  retransmita la trama y reciba el iACK del nodo  $v_{i+2}$ . Después de que el nodo  $v_{i+2}$  termina de reenviar la trama al nodo  $v_{i+3}$ , el nodo  $v_{i+1}$  recibe el iACK y está en capacidad de recibir la segunda trama del nodo  $v_i$ . Para evitar el problema del nodo oculto, el nodo  $v_i$  debe esperar hasta  $t_5$  para comenzar a ejecutar los procesos para transmitir la segunda trama en  $t_6$ . Por lo tanto, con iACK, el nodo  $v_i$  puede comenzar a transmitir la segunda trama en  $t_6$  y así evitar colisiones y el problema del nodo oculto que afectan al retardo de extremo a extremo.

### 3.1 Retardo en el nodo

Utilizando eACK, el tiempo que el nodo  $v_i$  tiene que esperar para retransmitir la segunda trama  $d_{se}(x)$  para evitar colisiones

y el problema del nodo oculto (Latre et al., 2005), va desde  $t_3$  hasta  $t_7$  Figura 2. Este tiempo se lo calcula con la siguiente expresión:

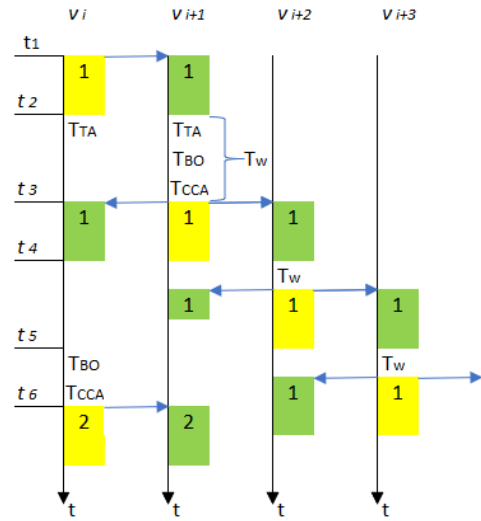


Figura 3. Secuencia de envío de segunda trama con iACK

$$d_{se}(x) = 3(T_{CCA} + T_{BO}) + 2(T_{fra}(x) + T_{TA} + T_{ACK}) \quad (1)$$

Utilizando iACK, el tiempo que el nodo  $v_i$  tiene que esperar para retransmitir la segunda trama  $d_{si}(x)$ , va desde  $t_2$  hasta  $t_6$  Figura 3, luego de que el nodo  $v_{i+1}$  confirma al nodo  $v_i$  la recepción exitosa de la primera trama se puede evaluar de la siguiente manera:

$$d_{si}(x) = 3(T_{BO} + T_{CCA}) + 2(T_{TA} + T_{fra}(x)) \quad (2)$$

Por lo tanto, el tiempo adicional requerido por el nodo  $v_i$  que opera con eACK, para retransmitir la segunda trama IEEE 802.15.4, con  $x$  bytes en la carga útil es igual a:

$$\Delta d_{eACK}(x) = d_{se} - d_{si} \quad (3)$$

En Acosta et al. (2020), se evalúa el tiempo adicional requerido, para que el nodo  $v_{i+1}$  retransmita la trama recibida correctamente al nodo  $v_{i+2}$  cuando se utiliza eACK en lugar de iACK en una topología lineal multisalto. El valor se lo calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta d(x) = T_{ACK} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta una estructura lineal con  $n+2$  nodos, donde los nodos  $v_0$  y  $v_{n+1}$  son los nodos frontera, el tiempo de retardo adicional utilizando eACK, para que la segunda trama vaya del nodo  $v_0$  al nodo  $v_{n+1}$  (retardo de extremo a extremo) es igual a:

$$\Delta D_T(x) = \Delta d_{eACK}(x) + (n-2) \Delta d(x) \quad (5)$$

Cuando el mensaje necesita  $k$  tramas IEEE 802.15.4 para ser enviado al nodo frontera, el retardo adicional en la transmisión del mensaje cuando se utiliza eACK se puede calcular como:

$$\Delta D_T(x) = k (\Delta d_{eACK}(x) + (n-2) \Delta d(x)) \quad (6)$$

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La investigación llevada a cabo es importante para el desarrollo de aplicaciones que utilizan redes de sensores inalámbricos con topologías lineales multiasalto a gran escala. Los resultados obtenidos nos muestran que el uso de iACK en lugar de eACK en el protocolo IEEE 802.15.4 permite disminuir el retardo por procesamiento en el nodo y el tiempo de retardo de extremo a extremo en el escenario en el cual un nodo sensor que forma parte de la infraestructura lineal, tiene que transmitir un mensaje en  $k$  tramas al nodo frontera.

Para evaluar la influencia que produce el retardo por el procesamiento en el nodo  $v_i$  para transmitir la segunda trama al nodo  $v_{i+1}$  utilizando iACK y eACK como método de confirmación de la trama recibida, se utilizan las expresiones anteriormente presentadas para posteriormente compararlas con tiempos de retardo obtenidos experimentalmente en un prototipo implementado para tal efecto y proyectar los resultados a  $k$  tramas.

##### 4.1 Retardos calculados

En la Figura 4, se presentan los resultados del retardo en la transmisión de la segunda trama considerando  $BO = 3$ ,  $IDnode = 2$  byte y  $IDPAN = 2$  byte.

Los resultados indican que el uso de iACK disminuye el tiempo de procesamiento en el nodo para transmitir la segunda trama, mientras se mantiene la misma confiabilidad en comparación con el uso de eACK. La diferencia de retardo de 0.7 mseg, es constante con diferentes valores de carga útil. Debemos recordar que cuando el nodo  $v_i$  transmite varias tramas IEEE 802.15.4, todas las tramas, excepto la última tienen una longitud máxima de 127 bytes

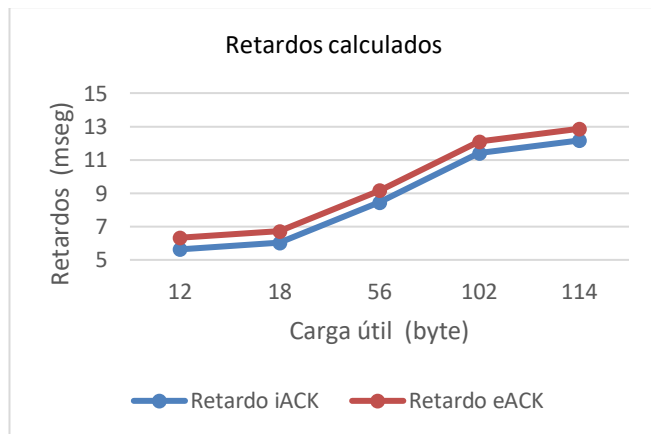


Figura 4. Retardo en el nodo  $i$  con  $IDPAN = 2$ ,  $IDnode = 2$  y  $BO = 3$

En la Figura 5, se calcula el retardo en el nodo  $v_i$  para transmitir la segunda trama, con el valor de  $IDnode = 8$  bytes, los demás parámetros se mantienen igual. Los retardos de procesamiento para transmitir la segunda trama se reducen con el uso de iACK. La diferencia de retardo tiene un valor de 0,7 ms en todos los casos de carga útil.

Los resultados obtenidos permiten evaluar el retraso de extremo a extremo en la transmisión de la segunda trama. En escenarios reales, los nodos para monitoreo de carreteras, tuberías, están ubicados en lugares donde la interferencia en la

banda de 2.4 GHz es prácticamente nula, y si consideramos que los de todos los nodos retransmisores que se encuentran dentro de la zona de cobertura, solo uno de ellos retransmitirá la trama, las probabilidades de colisión y las probabilidades de tener tramas erróneas son mínimas, por lo que es lógico suponer que los datos se transmitirán con el valor  $BOslots = 3$  definido por defecto..

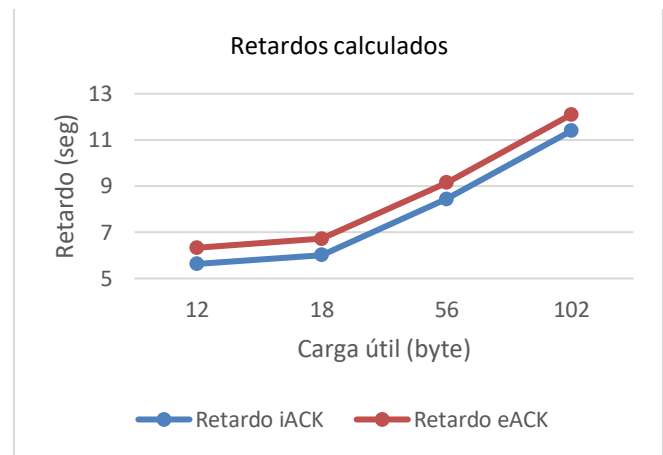


Figura 5. Retardo en el nodo  $i$  con  $IDPAN = 2$ ,  $IDnode = 8$  y  $BO = 3$

Para reconstruir el mensaje, el nodo frontera tiene que esperar a la recepción de las  $k$  tramas enviadas que componen el mensaje. En la Figura 6, se puede ver el tiempo adicional que el nodo frontera que opera con eACK tiene que esperar para reconstruir el mensaje. Los resultados se calcularon con un valor de  $BO = 3$ ,  $IDnode = 2$  bytes,  $IDPAN = 2$  bytes y una longitud de trama de 127 bytes. En el caso de que el nodo necesite transmitir un mensaje que requiera  $k = 6$  tramas, para enviar el mensaje al nodo fronterizo ubicado a 80 km, con nodos colocados cada 50 metros de distancia, cuando se usa iACK, todas las tramas llegan 6.72 seg antes, en comparación con el uso de eACK. Hay que tener en cuenta que este valor afecta al período con el que los nodos monitorizan la infraestructura lineal. Se puede considerar que si el nodo  $v_i$  envía los datos de monitoreo al nodo frontera más cercano, si la distancia máxima entre  $v_i$  y  $v_{n+1}$  es de 50 Km, la distancia entre los dos nodos fronteras  $v_0$  y  $v_{n+1}$  sería de 100 Km.

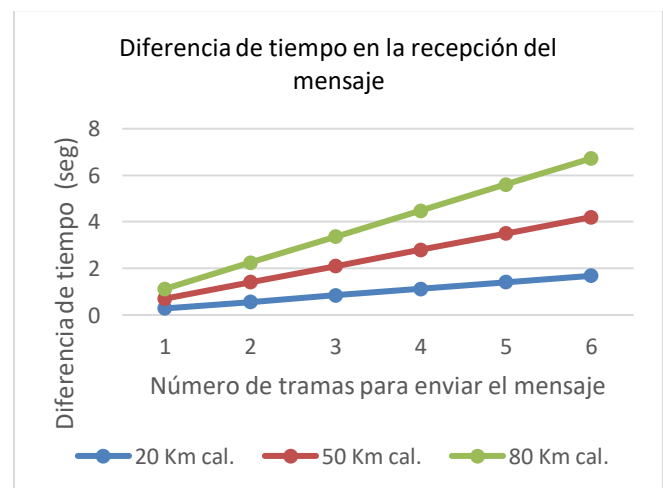


Figura 6. Retardo al utilizar eACK para recibir el mensaje con  $k$  tramas

#### 4.2 Resultados medidos

Para medir los retardos del nodo  $v_i$ , se implementó un prototipo de LWSN utilizando el nodo ATZB-256RFR2-XPRO (Atmel® Corporation, 2014), Figura 7, el cual permite gestionar directamente la capa de enlace y manipular directamente la cabecera de la trama del protocolo IEEE 802.15.4. Está compuesto por un microcontrolador de 8 bits, ATMega256RFR2 (Atmel®, 2014) y utiliza pilas AAA. En cuanto a la parte de radiofrecuencia, el módulo ATZB-256RFR2-XPRO tiene un transceptor que funciona a 2,4GHz y es compatible con el estándar IEEE 802.15.4.



Figura 7. Nodo ATZB-256RFR2-XPRO

Para implementar el programa que permite al nodo recibir y retransmitir varias tramas, utilizamos el software de desarrollo ASF® (Atmel Software Framework)(Microchip, 2020) propuesto por el fabricante Atmel™, que cuenta con un conjunto de las bibliotecas que facilitan la creación de código y la programación, como por ejemplo la herramienta de desarrollo Wireless Composer (Microchip, 2016) que permite evaluar y utilizar el protocolo IEEE 802.15.4 utilizando el Atmel Studio. El prototipo de red implementado para medir los retardos en el nodo se presenta en la Figura 8. Contiene 5 nodos sensores ubicados en topología lineal configurados para que su alcance sea de 20 cm. Los resultados presentados, son los promedios obtenidos de la realización de varias pruebas y los tiempos fueron obtenidos utilizando el captador de tramas SmartRF de Texas Instruments. Los tiempos de retardo medidos fueron similares en todos los nodos, por lo que no fue necesario colocar mas nodos en el prototipo.



Figura 8. Prototipo de red implementado

El tiempo de retardo que el nodo se demora en transmitir la segunda trama sin recibir un eACK con diferentes valores se presenta en la Figura 9, por ejemplo, si la carga útil es de 114 bytes, con eACK el nodo se demora 15,94 mseg y con iACK es 14.17 mseg.

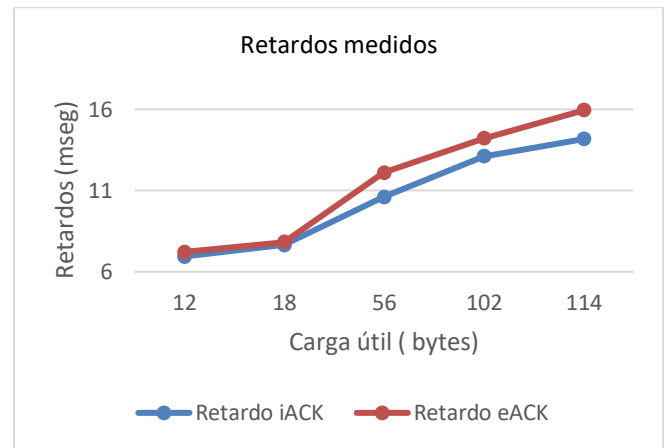


Figura 9. Retardo en el nodo  $i$  con IDPAN = 2, IDnode = 2 y BO = 3

En la Tabla 1, se presenta el porcentaje de disminución de retardo con iACK, medidos y calculados, en el nodo al transmitir la segunda trama con IDnode = 2 bytes y BO = 3.

Tabla 1. Porcentaje de disminución del retardo en el nodo

Datos Byte	Medido			Calculado		
	Retardo iACK mseg	Retardo eACK mseg	%	Retardo iACK mseg	Retardo eACK mseg	%
12	6,95	7,23	3,87	5,63	6,33	11,05
18	7,65	7,83	2,29	6,016	6,72	10,47
56	10,61	12,1	12,31	8,44	9,15	7,75
102	13,11	14,22	7,80	11,39	12,096	5,83
114	14,17	15,94	11,10	12,16	12,86	5,44

Como se puede apreciar, con una carga de datos de 114 bytes la disminución porcentual medida es 11,10 % y calculada es 5.44%. Con una carga de datos de 12 bytes la disminución porcentual medida es 3,87 % y calculada es 11.05%. Se observa que el retardo en el nodo es mayor con eACK y que a medida que aumenta los datos, el retardo en el nodo aumenta tanto para los valores medidos y calculados. La disminución del retardo, permiten verificar las ventajas de utilizar la iACK en lugar de eACK

Los cálculos del porcentaje de disminución del retardo cuando se utiliza iACK, indican que, si la longitud de los datos aumenta, el porcentaje basado en retardos calculados tiende a disminuir, en cambio, el porcentaje calculado con los valores medidos tiende a aumentar. Esto se debe a que en la fórmula se considera un tiempo fijo de procesamiento del nodo para tramas de diferente longitud. En el prototipo, el tiempo que requiere el nodo para sacar la trama del buffer de recepción, procesarla y luego retransmitirla depende del número de bytes de la trama. A mayor longitud de trama mayor retardo.

## 5. CONCLUSIONES

La necesidad de crear soluciones inalámbricas para aplicaciones de monitoreo en estructuras lineales a gran escala utilizando WSN, es un desafío en la industria debido a la considerable cantidad de ventajas de WSN sobre las soluciones tradicionales. Hoy en día, las nuevas aplicaciones en

infraestructuras lineales a gran escala requieren tiempos de retardo mínimos y largos períodos de operación de los nodos sensores. Nuestra propuesta utiliza iACK con el estándar IEEE 802.15.4 para minimizar los retardos en LWSN a gran escala y proporcionar la misma fiabilidad en la transmisión de datos que produce el uso de eACK. Nuestra propuesta utiliza iACK para disminuir el tiempo de retardo por procesamiento en el nodo y el retardo de extremo a extremo cuando tiene que enviar un mensaje que requiere varias tramas IEEE 802.15.4.

Se presenta un modelo matemático para evaluar el tiempo de retardo una infraestructura lineal considerando bajo tráfico y escenarios en los que la presencia de ruido es mínima característica presente en los oleoductos de petróleo, gas, carreteras, fronteras etc. Con los resultados obtenidos, se ha cuantificado la ventaja de utilizar iACK en lugar de eACK para proporcionar la misma fiabilidad de red, optimizando los retardos. Los resultados obtenidos permiten continuar con el desarrollo de una arquitectura para WSN sin capa de red para proporcionar una solución de bajo costo que permita detectar el problema de perforaciones no autorizadas en tuberías que transportan gasolina, agua etc.

### REFERENCIAS

- Abbas, M. Z., Abu Bakar, K., Ayaz, M., & Mohamed, M. H. (2018). An overview of routing techniques for road and pipeline monitoring in linear sensor networks. *Wireless Networks*, 24(6). <https://doi.org/10.1007/s11276-017-1457-6>
- Acosta, C. E., Gil-Castineira, F., & Gualotuna, C. E. (2020). Optimization of delays and power consumption in large-scale linear networks using iACK. *2020 IEEE ANDESCON*, ANDESCON 2020. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON50619.2020.9272063>
- Agarwal, T. (2015). What is ZigBee Technology, Architecture and its Applications? In *El-Pro-Cus*.
- Albaseer, A., & Baroudi, U. (2019). Node placement approaches for pipelines monitoring: Simulation and experimental analysis. *International Journal of Sensor Networks*, 29(3). <https://doi.org/10.1504/IJSNET.2019.098281>
- Atmel®, A. (2014). *ATmega 256RFR2 DataSheet*. [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8393-MCU\\_Wireless-ATmega256RFR2-ATmega128RFR2-ATmega64RFR2\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-8393-MCU_Wireless-ATmega256RFR2-ATmega128RFR2-ATmega64RFR2_Datasheet.pdf)
- Atmel® Corporation. (2014). *ZigBit Extension User Guide*. [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42186-ZigBit\\_Extension-User-Guide.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42186-ZigBit_Extension-User-Guide.pdf)
- Bagci, F. (2016). Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks. *Ad-Hoc and Sensor Wireless Networks*, 30(3-4), 301-322.
- Blagojević, M., Nabi, M., Geilen, M., Basten, T., Hendriks, T., & Steine, M. (2011). A probabilistic acknowledgment mechanism for wireless sensor networks. *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Networking, Architecture, and Storage*, China, 63-72. <https://doi.org/10.1109/NAS.2011.38>
- Chen, Y., Hou, K. M., Zhou, H., Shi, H. L., Liu, X., Diao, X., Ding, H., Li, J. J., & De Vaulx, C. (2011). 6LoWPAN stacks: A survey. *7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, WiCOM 2011. <https://doi.org/10.1109/wicom.2011.6040344>
- Dong, M., Ota, K., Liu, A., & Guo, M. (2016). Joint Optimization of Lifetime and Transport Delay under Reliability Constraint Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 27(1), 225-236. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2015.2388482>
- Egas Acosta, C., Gil-Castineira, F., & Costa-Montenegro, E. (2021). Red inalámbrica de sensores con topología lineal sin capa de red. *Revista de Investigación En Tecnologías de La Información*, 9(17), 56-65. <https://doi.org/10.36825/riti.09.17.006>
- IEEE Standard. (2006). IEEE standard for local and metropolitan area networks. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. *IEEE Std 802.15.4-2006*.
- Imran, C. M., Aldukhail, M., Almezeini, N., & Alnuem, M. (2016). Potential Applications of Linear Wireless Sensor Networks: A Survey. *International Journal of Computer Networks and Communications Security*, 4(6), 183-200.
- Kumar S., A. A., Ovsthus, K., & Kristensen., L. M. (2014). An industrial perspective on wireless sensor networks-a survey of requirements, protocols, and challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(3), 1391-1412. <https://doi.org/10.1109/SURV.2014.012114.00058>
- Latré, B., De Mil, P., Moerman, I., Van Dierdonck, N., Dhoedt, B., & Demeester, P. (2005). Maximum throughput and minimum delay in IEEE 802.15.4. In: Jia, X., Wu, J., He, Y. (eds) *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. MSN 2005*. Lecture Notes in Computer Science. [https://doi.org/10.1007/11599463\\_84](https://doi.org/10.1007/11599463_84)
- Lee, M. Y., Azman, A. S., Subramaniam, S. K., & Feroz, F. S. (2020). Performance Analysis of Linear Topology Wireless Sensor Network in Oil and Gas Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 765(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/765/1/012070>
- Li, S., Dou, Z., Wang, F., & Xu, Q. (2019). Energy efficiency of five broadcast-based ARQ protocols in multi-hop wireless sensor networks. *IET Communications*, 13(15), 2243-2253. <https://doi.org/10.1049/iet-com.2018.6098>
- Luo, F., Feng, T., & Zheng, L. (2021). Formal Security Evaluation and Improvement of Wireless HART Protocol in Industrial Wireless Network. *Security and Communication Networks*, 2021, Article ID 8090547, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2021/8090547>
- Microchip. (2016). *No Title*. <https://onlinedocs.microchip.com/pr/GUID-16A6E967-ABB5-42D8-BBED-6F0DBB16B126-en-US-1/index.html>
- Microchip. (2020). *Microchip Studio for AVR® and SAM Devices*.
- Rosberg, Z., Liu, R. P., Y.dong, A., D.tuan, L., & Jha, S. (2008). ARQ with implicit and explicit ACKs in wireless sensor networks. *GLOBECOM - IEEE Global Telecommunications Conference*, USA, 1-6. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2008.ECP.18>
- Sen, S. K. (2021). ISA100.11a. In *Fieldbus and Networking in Process Automation*.

<https://doi.org/10.1201/9781003149941-26>

Shanti, C., & Sahoo, A. (2014). Energy Efficient and Reliable Transmission of Data in Wireless Sensor Networks. In: Satapathy, S., Avadhani, P., Udgata, S., Lakshminarayana, S. (Eds.), *ICT and Critical Infrastructure: Proceedings of the 48th Annual Convention of Computer Society of India- Vol I. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 248*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-03107-1\\_37S](https://doi.org/10.1007/978-3-319-03107-1_37S)

Sokullu, R. I., & Demir, E. (2018). Linear wireless sensor networks and protocols in the next-generation networks. In *Enhanced Living Environments*. [https://doi.org/10.1049/PBHE010E\\_ch10](https://doi.org/10.1049/PBHE010E_ch10)

Tharatipayakul, K., Gordon, S., & Kaemarungsi, K. (2014). IACK: Implicit acknowledgements to improve multicast reliability in wireless sensor networks. *2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2014*. <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2014.6839749>

Varshney, S., Kumar, C., & Swaroop, A. (2021). Lightning-Based Lion Optimization Algorithm for Monitoring the Pipelines Using Linear Wireless Sensor Network. *Wireless Personal Communications, 117*(3), pages 2475–2494. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07987-8>

Varshney, S., Rajput, P. K., Singh, A., & Varshney, G. (2019). Routing Techniques used for Monitoring the Linear Structures using Linear Wireless Sensor Networks: An Overview. *Proceedings - 2019 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems, ICCIS 2019, 2019-January*, Greater Noida, India, 126-130.

<https://doi.org/10.1109/ICCIS48478.2019.8974522>



**Felipe, Gil-Castiñeira**, obtuvo los títulos de Ingeniero de Telecomunicación (especialidad en Telemática), y el Doctorado en Ingeniería de Telecomunicación por la Universidad de Vigo, en 2002 y 2007. Actualmente es profesor titular en el Departamento de Ingeniería Telemática de la misma universidad. Entre 2009 y 2010 actuó una estancia en el Centro de Investigación de Nokia en Palo Alto, y desde 2014 al 2016 fue director técnico del área de "Sistemas Inteligentes en Red" en el Centro Tecnológico de Telecomunicaciones de Galicia. Ha publicado más de 60 artículos y liderado numerosos proyectos nacionales e internacionales en estos campos.



**Carlos, Herrera**, Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones por la Escuela Politécnica Nacional, EPN, 1999. Magister en Conectividad y Redes de Telecomunicaciones por la Escuela Politécnica Nacional, EPN, 2014, Quito-Ecuador. Docente de la Escuela Politécnica Nacional de Quito desde el año 2000, cátedras dictadas: Telemática y Redes TCP/IP, Instructor CCNA, CCNP y CCAI. Decano Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Escuela

## BIOGRAFÍAS



**Carlos, Egas Acosta**, obtuvo el título de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones en el año 1986, en la Escuela Politécnica Nacional, Magister en Informática en la Universidad de Andina Simón Bolívar, Diploma de Estudios Avanzados, Universidad de Vigo, Instructor Cisco. Actualmente es Docente

de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Director del Grupo de Investigación en Internet de Todas las Cosas del DETRI.



# Calidad Ecológica de las Cuencas Abastecedoras de Agua en la Ciudad de Loja – Ecuador

Martínez, Fabiola<sup>1,\*</sup> ; Prieto, Cristhian<sup>1</sup> ; Martínez, Paulina<sup>1</sup> ; Ochoa, Pablo<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Instituto Superior Tecnológico Sudamericano (ISTS), Tecnología Superior en Desarrollo Ambiental, Loja, Ecuador

<sup>2</sup>Universidad Técnica Particular de Loja, Departamento de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Loja, Ecuador

**Resumen:** La calidad del agua superficial en cuencas con baja oferta y alta demanda de este recurso, debe evaluarse principalmente en países en desarrollo. Sin embargo, por la disponibilidad de recursos, únicamente se ha venido considerando a los parámetros fisicoquímicos para hacerlo, por lo que el relacionar elementos bióticos y abióticos permitirá conocer el estado ecológico, como una lectura más integral de la salud o calidad del ecosistema acuático. Por ello, el objetivo de este estudio fue estimar la calidad ecológica en microcuencas con diverso estado de conservación del suelo y que abastecen con agua para su potabilización en la ciudad de Loja al Sur del Ecuador. Para ello, fueron usados diversos índices bióticos, partiendo desde los más comunes como los índices de diversidad, el índice ABI (Andean Biotic Index) basado en el BMWP (Biological Monitoring Working Party), el EPT (Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera); y el índice de calidad de hábitat SVAP (Stream Visual Assessment Protocol). Los resultados de estos índices ubican a las tres microcuencas que abastecen actualmente de agua (San Simón, El Carmen y Mendieta) con buena calidad; sin embargo, no se deben descuidar sus condiciones de uso, manejo y conservación. Para las dos microcuencas restantes, se estimó una calidad de agua dudosa debido al impacto de ciertas actividades antrópicas que se presentan en ellas. Por esta razón, usar el índice de calidad ecológica (ICE) en cuencas abastecedoras de agua, puede ser muy útil para la gestión integral de cuencas, el ordenamiento territorial, o generar normativa por parte de los gobiernos autónomos descentralizados (GAD) con una visión más holística y prospectiva.

**Palabras clave:** Calidad del agua, macroinvertebrados, ABI-BMWP, EPT, SVAP, ICE

## Ecological Quality of the Water Supply Basins in the City of Loja – Ecuador

**Abstract:** The quality of surface water in basins with low supply and high demand for this resource must be evaluated, mainly in developing countries. However, due to the availability of resources, only the physicochemical parameters have been considered to do it, in order that relating biotic and abiotic elements will allow knowing the ecological status, as a more comprehensive reading of the health or quality of the aquatic ecosystem. Therefore, the objective of this study was to estimate the ecological quality in micro-basins with different soil conservation status and that supply water for its purification in the city of Loja in southern Ecuador. For this, various biotic indices were used, starting from the most common as diversity indices, the ABI (Andean Biotic Index) based on the BMWP (Biological Monitoring Working Party), the EPT (Ephemeroptera, Plecoptera and Trichoptera); and the habitat quality index SVAP (Stream Visual Assessment Protocol). The results of these indices place the three micro-basins that currently supply water (San Simón, El Carmen and Mendieta), with good quality; however, their conditions of use, management and conservation should not be neglected. For the two remaining micro-basins, a doubtful water quality was estimated due to the impact of certain anthropic activities that occur in them. For this reason, using the ecological quality index (EQI) in water supply basins can be very useful for integral management watersheds, territorial ordering, or to generate regulations by decentralized autonomous governments (DAG), with a more holistic and prospective vision.

**Keywords:** Water quality, macroinvertebrates, ABI-BMWP, EPT, SVAP, EQI

### 1. INTRODUCCIÓN

En las cuencas hidrográficas, se integran sistemas biofísicos, socioeconómicos y político-administrativos, importantes para

el diseño de políticas enfocadas al desarrollo rural y al manejo integral y sostenible de los ecosistemas (Damián-Carrión et al., 2017). Estas soportan servicios ambientales que demanda la sociedad; uno de ellos el recurso hídrico, indispensable para

\*fzmartinez@tecnologicosudamericano.edu.ec

Recibido: 20/01/2023

Aceptado: 01/06/2023

Publicado en línea: 14/11/2023

10.33333/rp.vol52n2.08

CC 4.0

varias actividades como el desarrollo urbano, agrícola, industrial entre otras (Padilla-García & Franco Higuaita., 2021). Por ello, es necesario evaluar el impacto de estas actividades antrópicas sobre los recursos hídricos; y, para conseguir este fin de acuerdo con las condiciones socioeconómicas actuales, es recomendable aplicar metodologías que permitan obtener un diagnóstico sencillo y al mismo tiempo fiable de los recursos naturales, principalmente los que son usados para consumo humano (Rodríguez-Badillo et al., 2016). Por otro lado, el crecimiento poblacional ha traído como consecuencia una alta demanda de los recursos agua y suelo, por su cambio de uso a infraestructura urbana; y como resultado de estos cambios el incremento de vertidos contaminantes sobre los cursos de agua (Osejós Merino et al., 2020).

La subcuenca Zamora Huayco está ubicada junto a una ciudad intermedia al sur de Ecuador, y recibe esta presión urbana. Por lo que se han venido desarrollando estudios relacionados con la cobertura del suelo y sus efectos en el riesgo de erosión hídrica (Ochoa et al., 2015), en la producción de sedimentos (Mejía et al., 2019), y en el modelamiento hidrológico y recarga de acuíferos (Mera et al., 2021). Sin embargo, es importante desarrollar estudios complementarios que determinen específicamente la calidad del agua, frente a las diferentes coberturas del suelo, al ser abastecedora del líquido vital para esta ciudad.

Al hablar de calidad ecológica en cuencas abastecedoras de agua para consumo humano, conviene contar no solo con los análisis fisicoquímicos y microbiológicos; porque muestran una instantánea del momento específico del muestreo. Por lo tanto, es necesario ampliar el horizonte en la obtención de información que represente el impacto atemporal de diferentes actividades antropogénicas, con organismos que ilustren condiciones de calidad del agua. El aplicar diferentes metodologías biológicas como indicadores de calidad, como por ejemplo los macroinvertebrados acuáticos, es lo recomendado; por usar técnicas de fácil acceso y con resultados eficientes (Urdanigo et al., 2019). Como describe la bibliografía, los macroinvertebrados bentónicos tienen una amplia distribución y un muestreo simple, y se atribuye su nombre al ser un grupo de “macroinvertebrados” es decir visibles para su identificación (Leaño-Sanabria & Pérez-Barriga, 2020). Además, éstos son muy sensibles a los cambios ambientales, viven en aguas muy limpias, y huyen o desaparecen cuando el agua presenta agentes extraños o contaminación; lo que los convierte en excelentes indicadores para evaluar calidad del agua (Iñiguez-Armijos et al., 2014).

Por esto, Trama et al. (2020) propone establecer diferentes sitios de muestreo, en los que se analice la variación de familias y órdenes de macroinvertebrados, usando índices bióticos, como los índices de diversidad que relacionan el número de especies observadas (riqueza, uniformidad) con el número de individuos (abundancia). Soria-Reinoso (2016) también menciona el estudio de la parte biótica, usando el índice EPT al ser uno de los más utilizados para valorar la abundancia en porcentaje de estos órdenes con respecto al total de organismos colectados; para determinar calidad de agua (Bravo-Chaves & Restrepo-Franco, 2021). También, Ramírez y Gutiérrez (2014) en un estudio para América Latina, resaltan la importancia del EPT como mecanismo para adoptar

medidas que eviten el deterioro de los ecosistemas acuáticos y contribuyan al equilibrio y funcionalidad ecológica. También, en estudios de evaluación de calidad del agua, el índice biótico andino (ABI) por sus siglas en inglés, que es una adaptación del BMWP para cuencas de altura, toma en cuenta la tolerancia de los macroinvertebrados o sensibilidad a la contaminación (Ríos-Touma et al., 2014).

Finalmente, para determinar la calidad ecológica de las cuencas hidrográficas es importante relacionar la parte biótica antes descrita, con las condiciones abióticas en las vertientes y ríos que forman parte de ellas. Con ese fin, Rodríguez-Valencia et al. (2018), propone usar el protocolo de evaluación visual de arroyos (SVAP).

Por lo anteriormente expuesto, en este estudio se propone evaluar la calidad ecológica de ríos altoandinos, que son fuentes de abastecimiento de agua para ciudades intermedias. Información clave para generar propuestas de gestión integral de cuencas en los GAD, y de apoyo en las estrategias de manejo, monitoreo y control.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio

El estudio fue desarrollado en las microcuencas que conforman la subcuenca Zamora Huayco, misma que está ubicada al suroriente de la ciudad de Loja, en el cantón Loja al Sur de Ecuador; entre las coordenadas UTM 955962 – 9548415 S, y 708180 – 698895 E (Figura 1). Esta subcuenca nace en las estribaciones occidentales de la cordillera Real de los Andes, y forma parte del sistema fluvial del río Zamora que vierte sus aguas en el río Marañón hacia el Amazonas. La subcuenca limita al norte con la microcuenca San Cayetano, al sur con la microcuenca Namanda, al este con el Parque Nacional Podocarpus (PNP), y al oeste con el río Malacatos en la hoya de Loja.

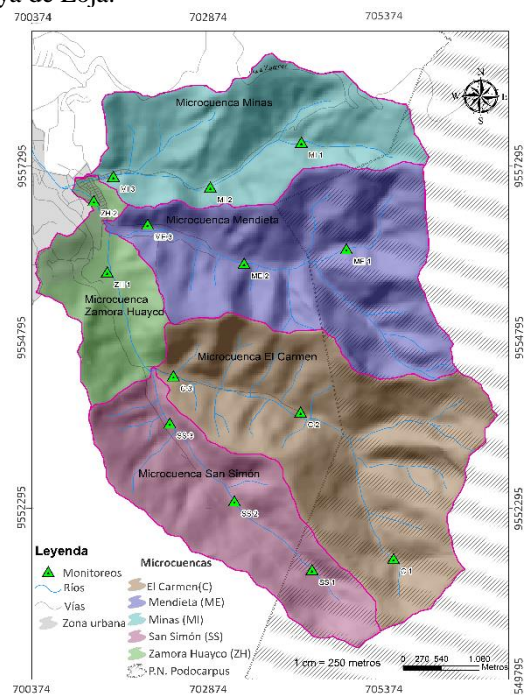


Figura 1. Microcuencas de estudio y las estaciones de muestreo

El rango de elevación de la subcuenca Zamora Huayco va desde los 2560 hasta los 3380 m.s.n.m., misma que está conformada por las microcuencas tributarias: El Carmen, San Simón, Mendieta, Minas y Zamora Huayco como microcuenca receptora. Las tres primeras microcuencas nombradas son fuentes de abastecimiento directo de agua para la ciudad de Loja con cerca del 50% del caudal diario para su potabilización. Las lluvias están presentes durante todo el año, pero los meses en los que se registran eventos fuertes de precipitación van de diciembre a abril. En la estación meteorológica del INAMHI “La Argelia”, se ha registrado un valor de 65.4 mm como máxima diaria en 24 horas, y los meses menos lluviosos son septiembre y octubre. La media anual de precipitación es de 877 mm en la parte baja y 1947 mm en la cabecera de la cuenca (Ochoa et al., 2015).

## 2.2 Puntos de muestreo

Como el objetivo de este estudio es determinar la calidad ecológica del agua superficial, para conocer la oferta hídrica para esta ciudad, fueron elegidas las microcuencas antes mencionadas; por tener un caudal conocido de baja oferta y alta demanda (50% del caudal requerido para la ciudad). Estas microcuencas reciben una baja presión directa dentro de su territorio, pero por su cercanía con la ciudad de Loja gran parte de las diferentes actividades socioeconómicas dependen de su adecuado manejo y conservación, por ello fueron elegidas 14 estaciones o puntos de muestreo, ubicados geográficamente como los muestra la Tabla 1 y Figura 1.

**Tabla 1.** Ubicación geográfica de los puntos de muestreo

Código	Latitud UTM	Longitud UTM	Altitud m snm	Punto de muestreo
C1	706117	9551437	2717	Estación 1
C2	704403	9553614	2290	Estación 2
C3	701983	9554403	2205	Estación 3
SS1	704077	9551753	2643	Estación 4
SS2	702623	9553110	2416	Estación 5
SS3	702017	9554333	2228	Estación 6
ZH1	701446	9555751	2128	Estación 7
ZH2	700915	9557159	2118	Estación 8
ME1	703701	9555882	2224	Estación 9
ME2	702587	9556283	2152	Estación 10
ME3	701466	3556403	2107	Estación 11
MI1	702475	9557121	2337	Estación 12
MI2	703032	9557164	2243	Estación 13
MI3	701025	9557130	2134	Estación 14

## 2.3. Colecta de macroinvertebrados acuáticos

La composición y abundancia de los macroinvertebrados fueron determinadas con el análisis de las muestras tomadas con tres repeticiones en cada uno de los 14 puntos de muestreo; distribuidos en la parte alta media y baja de las microcuencas, y codificadas con relación al nombre de estas, así: Mendieta (ME), Minas (MI) El Carmen (C), San Simón (SS) y Zamora Huayco (ZH). La campaña de muestreo inició en diciembre 2021 y finalizó en marzo 2022, al inicio de la temporada lluviosa que incrementa el caudal en las vertientes.

Para la colecta de los macroinvertebrados fueron aplicadas dos técnicas en todos los puntos, siguiendo la metodología descrita en la guía metodológica de peritaje ambiental para el Ecuador (PRAS, 2020). La colecta con la *red Surber*, que tiene un marco metálico de 30 x 30 cm, y se usa removiendo el fondo acuático por un minuto, con 10 repeticiones en promedio a lo largo de 30 metros de extensión en el lecho del río. Y la colecta con *red de patada*, que tiene 1 m<sup>2</sup> aproximadamente, para ello al igual que el otro método se removió el fondo del cuerpo de agua, moviendo troncos, piedras y arena. Las mallas de colecta de ambas redes usadas fueron de 0,5 mm. El tiempo de muestreo en total fue de 30 minutos en cada estación, o hasta cubrir un área aproximada de 6 m<sup>2</sup>.

Los individuos colectados fueron separados del exceso de lodo y hojarasca adherida a las redes, y posteriormente fueron colocados en recipientes de boca ancha, etiquetados y que contengan etanol al 90% para su preservación inicial. Luego en el laboratorio de gestión ambiental del ISTS-Loja, se procedió con la clasificación e identificación de los macroinvertebrados, usando las claves taxonómicas y descriptores de identificación disponibles para Sudamérica; y apoyados de la instrumentación básica como son el microscopio y estereoscopio para su observación (Peña et al., 2019).

## 2.4. Calidad ecológica

Para evaluar la calidad ecológica de las microcuencas abastecedoras de agua para la ciudad de Loja fueron usados algunos índices bióticos, los más comunes son los de diversidad de Margalef, dominancia de Simpson y equidad de Shannon-Wiener, también los índices EPT, ABI-BMWP; y como apoyo de la parte abiótica el protocolo de evaluación visual de arroyos SVAP. Finalmente, se analizará la calidad ecológica de las microcuencas a través de una relación numérica que integre en partes iguales los índices bióticos y abióticos mencionados anteriormente.

### 2.4.1. Índice abiótico SVAP

Para el SVAP, siglas en inglés de “Stream Visual Assessment Protocol”; se tomó como referencia la guía para la evaluación de calidad de agua superficial propuesta por Rodríguez-Valencia et al. (2018). En este estudio se proponen 15 variables con su puntuación específica dependiendo de las condiciones. El protocolo SVAP fue aplicado en las catorce estaciones de muestreo, siguiendo la fórmula: *Puntaje total / número de criterios evaluados*.

Las condiciones ecológicas fueron evaluadas “in situ” a través de observación directa, apoyados en la identificación visual del estado actual del cauce de cada una de las microcuencas, obteniendo puntajes relacionados con el hábitat ripario y calidad hídrica. En cada estación, fueron determinados los valores promedio, mismos que fueron ubicados dentro de un rango de calidad cualitativo de cinco categorías para su interpretación. Estas categorías van desde 1 que sería muy mala calidad, hasta 10 con excelente calidad. La tabla completa de categorías, así como la lista de variables para

determinar calidad de agua según el índice SVAP se puede revisar con mayor detalle en Rodríguez-Valencia et al. (2018).

2.4.2. Índice biótico EPT

Para calcular el índice de EPT se tomó en cuenta el total de individuos de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera, dividido para la abundancia poblacional total de cada una de las estaciones; y este resultado multiplicado por 100 para obtener los porcentajes indicativos de la calidad del agua (PRAS, 2020). La interpretación de los resultados está descrita en cuatro categorías con valores que van desde la cuarta clase desde 0 a 25%, considerada como mala calidad; hasta la primera clase que va de 75 a 100% que es considerada muy buena calidad de agua.

2.4.3. Índice biótico ABI-BMWP

Para el cálculo del índice ABI-BMWP; se asignan valores de 1 a 10 a los macroinvertebrados identificados a nivel de familia (Ríos-Touma et al., 2014). Las familias que no toleran disminución de la calidad de agua tienen puntajes altos, mientras que las familias que toleran la pérdida de calidad tienen puntajes bajos (Soria-Reinoso, 2016). La suma total ponderada de puntajes de todas las familias encontradas en cada estación, proporciona el valor de la calidad del agua en relación con su sensibilidad, de las cuales se tiene cinco categorías de calidad. Estudios como los de Alzate-Gamboa y Moreno-Gutiérrez (2021) y el de Leñaño-Sanabria & Pérez-Barriga, (2020), muestran el puntaje y la interpretación para determinar calidad de agua con este índice.

2.4.4. Índices bióticos de diversidad

Para estimar los índices de diversidad de los macroinvertebrados asociados a todos los puntos de muestreo, se usaron los índices de dominancia de Simpson, de diversidad de Margalef y de equidad de Shannon – Wiener (Soria-Reinoso, 2016). Para analizar la composición de macroinvertebrados de las cinco microcuencas de estudio se realizó un análisis clúster, tomando en cuenta el índice de Simpson, y la matriz de Bray-Curtis para el análisis de similitud entre familias (Iñiguez-Armijos et al., 2014). Las diferencias de la riqueza taxonómica en los cuerpos de agua fueron probadas por medio de un test ANOVA de una vía, en el que se aplicó como factor las estaciones muestreadas, seguido por una prueba de Tukey con p=0.05, para estos análisis se usó el software Past 4.0.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan a continuación en el orden en el que se describió la metodología, partiendo desde el índice abiótico SVAP hasta los índices bióticos.

3.1 SVAP

Los resultados del índice SVAP utilizado para determinar la salud ambiental se observan en la Tabla 2, junto con la superficie total y de áreas protegidas (AP) que tienen las microcuencas. Zamora Huayco, Minas y El Carmen presentan

condiciones regulares producto de alteraciones antrópicas sobre las condiciones ecológicas naturales de su territorio. La deforestación con prácticas de tala y quemas, agricultura, ganadería, presencia de granjas avícolas y porcinas en la parte media y adicionalmente el vertido de aguas servidas con el lavado de vehículos en la parte baja son las principales alteraciones al ecosistema natural que se observa en las cuencas, muchas de estas por efectos de cercanía con áreas urbanas (Rodríguez et al., 2022). Específicamente la microcuenca Minas presenta impactos adicionales a los mencionados, por facilidad de acceso al limitar con la vía interprovincial Loja – Zamora Chinchipe, lo que ha favorecido a un mayor crecimiento suburbano y construcción de viviendas que aún no cuentan con sistemas sanitarios. Por el contrario, Mendieta y San Simón muestran baja intervención antrópica, y buen manejo de la cobertura natural del suelo; con niveles bajos de erosión, contando con un indicador que podría ser recuperable simplemente con adoptar medidas preventivas, ya que la puntuación de calidad ecológica de estas microcuencas es buena.

La importancia de conservar una buena calidad de agua en estas cuencas radica en la alta demanda para los diferentes usos consuntivos por parte de la población de la ciudad de Loja, que en los últimos años es la que presenta uno de los mayores crecimientos urbanos del país. Por este motivo, se recomienda ordenar el territorio de estas cuencas, y ejercer un mayor control aplicando la normativa local con medidas correctivas que eviten que los impactos sean irreversibles a futuro (Santamaría & Bernal, 2016; Mera et al., 2021).

Tabla 2. SVAP y conservación del suelo de las microcuencas

Micro-cuenca	SVAP	Calidad	Área total (ha)	Área AP (ha)	A P (%)
Mendieta	7,64	Buena	920,75	506,96	55
San Simón	7,39	Buena	630,39	140,16	22
El Carmen	6,62	Regular	1122,91	655,25	58
Minas	6,62	Regular	680,97	30,93	5
Zamora Huayco	6,33	Regular	341,17	0,00	0

Para relacionar la calidad del agua con el uso y conservación del suelo del área de estudio, se usó la información del proyecto “Generación de Geo-información para la Gestión del Territorio a nivel Nacional” que está a escala 1:25000; disponible en: <https://sni.gob.ec/mapa-cobertura-uso>.

La Tabla 2 también muestra la cantidad de área natural protegida (AP) con que cuenta cada microcuenca. Las microcuencas que tienen más área conservada son El Carmen y Mendieta, con un 58% y 55% respectivamente de su superficie total. Esto es principalmente por la incidencia directa del área buffer del PNP (Ochoa et al., 2017). Es importante aclarar que, en este estudio la microcuenca Zamora Huayco es la microcuenca receptora de toda la subcuenca, o el lugar de desembocadura de las cuatro microcuencas tributarias; por este motivo no cuenta con un área protegida en sus 341 ha de superficie, lo que influye y guarda estrecha relación con los resultados del SVAP descritos anteriormente.

### 3.2 EPT

Los resultados cualitativos y cuantitativos del índice EPT se muestran en la Tabla 3. Este índice toma en cuenta las especies pertenecientes a los órdenes Ephemeroptera, Trichoptera y Plecoptera, que son muy sensibles a la contaminación, y requieren aguas con muy buena oxigenación. Observándose un similar comportamiento con los resultados descritos por Montoya-Moreno y Escobar-Gutiérrez (2019) a mayor número de EPT la calidad del agua pasa de buena a muy buena.

**Tabla 3.** Registro de EPT cuantitativo y cualitativo por microcuencas

Microcuenca	Índice EPT (%)	Clase	Calidad
El Carmen	93,75	I	Muy buena
Zamora Huayco	79,97	I	Muy buena
San Simón	73,92	II	Buena
Mendieta	68,64	II	Buena
Minas	58,39	II	Buena

De acuerdo con estos resultados y la predominancia de los individuos, las aguas a nivel general son de buena calidad. La riqueza de taxones muestra el índice EPT (Iñiguez-Armijos et al., 2014). En este estudio la calidad del agua va de Buena a Muy Buena por los macroinvertebrados encontrados que corresponden a las tres familias y que se consideran sensibles a los factores estresantes como también lo resalta para cuencas Andinas (Chavez-Cruz, 2022).

### 3.3 ABI-BMWP

El ABI-BMWP estima los puntajes de acuerdo con la tolerancia a la contaminación orgánica, otorgando una puntuación de 10 para los grupos más sensibles y 1 para los más tolerantes a la contaminación (Leaño-Sanabria & Pérez-Barriga, 2020). Similar a lo descrito por Iñiguez-Armijos et al. (2022), en estas cuencas existe variación del ABI-BMWP entre las diferentes microcuencas.

**Tabla 4.** Calidad del agua y su significado ecológico de acuerdo con el índice ABI-BMWP

Microcuenca	ABI -BMWP	Clase	Calidad	Significado
San Simón	91	II	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas
Mendieta	72	II	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas
El Carmen	66	II	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas
Zamora Huayco	62	II	Aceptable	Aguas ligeramente contaminadas
Minas	54	III	Dudosa	Aguas contaminadas, dudosas

La Tabla 4 describe los valores de ABI-BMWP, que van disminuyendo en relación con el grado de afectación, desde San Simón hasta la microcuenca Zamora Huayco describe a las aguas como ligeramente contaminadas, y en la microcuenca Minas sus aguas están contaminadas, con calidad de agua dudosa.

Estos resultados, como se mencionó en el SVAP, se atribuyen a la evaluación del hábitat en las cuencas, relacionadas con su ubicación y cobertura del suelo. Sin embargo, pueden ser reversibles si se aplican buenas prácticas productivas en el área agrícola-ganadera, manteniendo una visión prospectiva del territorio por los diferentes servicios ecosistémicos que ofrecen estas cuencas (Mera-Parra et al., 2022).

### 3.4 Índices de diversidad

#### 3.4.1. Diversidad de macroinvertebrados

Fueron colectados un total de 2 266 individuos, pertenecientes a 45 familias (Tabla 5), 11 órdenes, 5 clases (Malacostraca, Insecta, Rhabditophora, Arácnida y Clitellata), y 3 phylums (Artrópoda, Platelminfos y Anélidos). La clase Insecta fue el grupo más abundante con el 98,98%, es decir 2 243 del total de individuos; siendo las microcuencas con mayor número de individuos San Simón con 577 y El Carmen con 506. Este estudio presenta mayor diversidad y abundancia en comparación con lo desarrollado por Arce y Leiva (2009), que colectaron 1 868 individuos agrupados en 22 familias, 8 órdenes, y 6 clases, en 8 estaciones de muestreo (zona alta y baja del río Zamora Huayco). Este aumento puede ser un indicador del manejo adecuado de las zonas de recarga hídrica de las cuencas abastecedoras de agua para la ciudad de Loja, que se ha venido desarrollando entre el Gobierno Local y FORAGUA (Mera-Parra et al., 2022).

La presencia de los organismos colectados es típica de sistemas lóticos poco intervenidos, y se atribuye la abundancia de individuos y familias a dos tipos de sustratos: hojarasca y pedregosos (Morelli y Verdi, 2014); encontrados también en este estudio. Otro aspecto fundamental que se destaca en los estudios a nivel de orden, es la cobertura vegetal presente en los márgenes de las microcuencas (Urdanigo et al., 2019). En este estudio fueron encontradas coberturas con plantación forestal con *Pinus patula* y *Eucalyptus globulus* en los puntos de muestreo 2, 7, 8, 13 y 14, coberturas de bosque nativo en 1, 4 y 12, y coberturas agrícola-ganaderas en los puntos 3, 5, 6, 9 y 11 que describen las Tabla 1 y 2.

Los órdenes con mayor abundancia de macroinvertebrados fueron Plecoptera de la familia Perlidae con 513 individuos (21,4%). El segundo fue el orden Ephemeroptera de la familia Baetidae con 473 individuos (20,7%), en tercer lugar está el orden Leptohiphidae de la familia Ephemeroptera con 360 individuos (15,64%); según Moya et al., (2019), estos son los más intolerantes a la contaminación en cuencas Andinas. Luego están Hidropsychidae del orden Trichoptera con 194 individuos (9,11%), Glossosomatidae de la familia coleópteros con 132 individuos (6,98%), Trichoptera de la familia Leptophlebiidae con 116 individuos (5,91%). Estos órdenes mencionados son los más representativos en relación con el resto en cuanto a porcentajes.

#### 3.4.2 Diversidad alfa

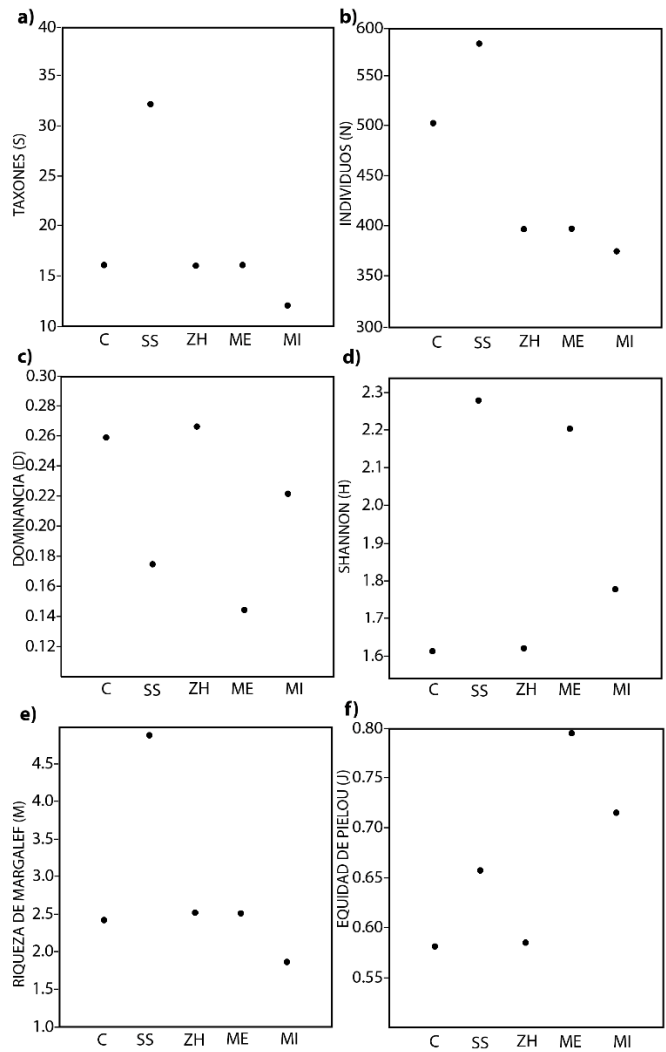
A los parámetros ecológicos evaluados espacialmente los muestra la Figura 2. El índice de diversidad de Shannon presenta valores que van desde 1,61 a 2,28. Se puede observar que la microcuenca San Simón es aquella que tiene mayor

diversidad de individuos. Soria-Reinoso (2016) también relaciona a este índice con el nivel de contaminación del agua, por lo que esta microcuenca tendría buena calidad de agua.

**Tabla 5.** Número de familias de macroinvertebrados colectados en las microcuencas

FAMILIA	Microcuencas				
	C	SS	ZH	ME	MI
Gammaridae	0	3	0	0	0
Hyalellidae	0	1	0	0	0
Glossosomatidae	0	0	0	0	132
Elmidae	5	21	3	19	0
Ptilodactylidae	4	1	46	5	0
Psephenidae	1	0	0	3	0
Grynidae	0	6	0	0	0
Chrysomelidae	0	1	0	0	0
Curculionidae	0	14	0	0	0
Staphylinidae	10	9	0	3	0
Scirtidae	0	21	1	5	0
Dystiscidae	0	19	1	0	0
Limnichidae	0	0	0	7	0
Tabanidae	1	0	0	0	0
Tipulidae	4	12	0	5	13
Blephariceridae	3	0	0	0	0
Dolichoponidae	1	1	0	0	0
Limoniidae	1	1	2	0	0
Simuliidae	0	5	1	0	0
Empididae	0	0	0	46	0
Culicidae	0	0	0	0	2
Psychodidae	0	1	0	0	2
Chironomidae	0	2	31	7	0
Ceratopogonidae	0	9	0	0	0
Leptophlebiidae	13	0	2	18	83
Baetidae	139	119	127	80	8
Leptohyphidae	138	62	150	2	8
Oigoneuriidae	0	0	7	24	0
Caenidae	0	0	0	0	4
Veliidae	0	2	0	0	0
Gerridae	0	9	0	0	0
Mesoveliidae	0	0	1	0	0
Sialidae	0	1	0	0	0
Libellulidae	0	1	0	0	0
Lumbricidae	0	2	0	0	0
Perlidae	166	195	1	81	70
Xiphocentronidae	1	0	0	0	0
Leptoceridae	9	18	0	0	4
Hidropsychidae	10	39	22	79	44
Polycentropodidae	0	2	0	0	0
Hydroptilidae	0	1	0	0	0
Helicopsychidae	0	4	2	0	8
Philopotamidae	0	1	1	0	0
Planariidae	0	0	0	16	0
Hydrachnidae	0	1	0	0	0
TOTAL	506	584	398	400	378

Mientras que, el índice de dominancia de Simpson muestra valores que van desde 0,14 a 0,27, con una mayor dominancia en la microcuenca Zamora Huayco. El índice de diversidad específica o índice de riqueza de Margalef refiere a la microcuenca Minas con la menor diversidad específica (1,85), y a la San Simón con la mayor (4,87). En el índice de equidad de Pielou los valores están entre 0,58 hasta 0,79; con una mayor abundancia poblacional para la microcuenca Mendieta.



**Figura 2.** Representación gráfica del índice alfa a) Taxones, b) Individuos, c) Dominancia, d) Shannon, e) Margalef, f) Equitabilidad de Pielou

### 3.4.3 Densidad Beta

El análisis de similitud se muestra en la Figura 3, donde se observa la relación entre macroinvertebrados con las estaciones de muestreo de las microcuencas. Observándose mayor similitud entre las microcuencas San Simón y Zamora Huayco con un 81%; por el contrario. Una mayor disimilitud se observa en la microcuenca Minas con respecto a todas las demás con cerca del 55%. La Figura 4 muestra otro análisis de grupos usando la matriz de similitud de Bray-Curtis, donde se observan asociaciones entre los diferentes taxones; se evidencian seis grupos (I, II, III, IV, V y VI). El grupo I lo integran las familias (Glossosomatidae, Leptophlebiidae, Baetidae, Leptohyphidae, Perlidae, Hidropsychidae) las cuales fueron las de mayor abundancia en todo el estudio. Abundancia media presentaron: el grupo IV que incluye a las familias (Elmidae, Scirtidae, Dystiscidae, Staphylinidae, Leptoceridae, Tipulidae, Grynidae, Simuliidae, Curculionidae, Ceratopogonidae, Gerridae), y el grupo II que incluye a las familias (Ptilodactylidae, Chironomidae, Psephenidae, Limnichidae, Empididae, Oigoneuriidae, Planariidae). Finalmente, los grupos III, V y VI se caracterizaron por su escasa ocurrencia, ya que fueron taxones poco representados en las microcuencas y con una distribución restrictiva.

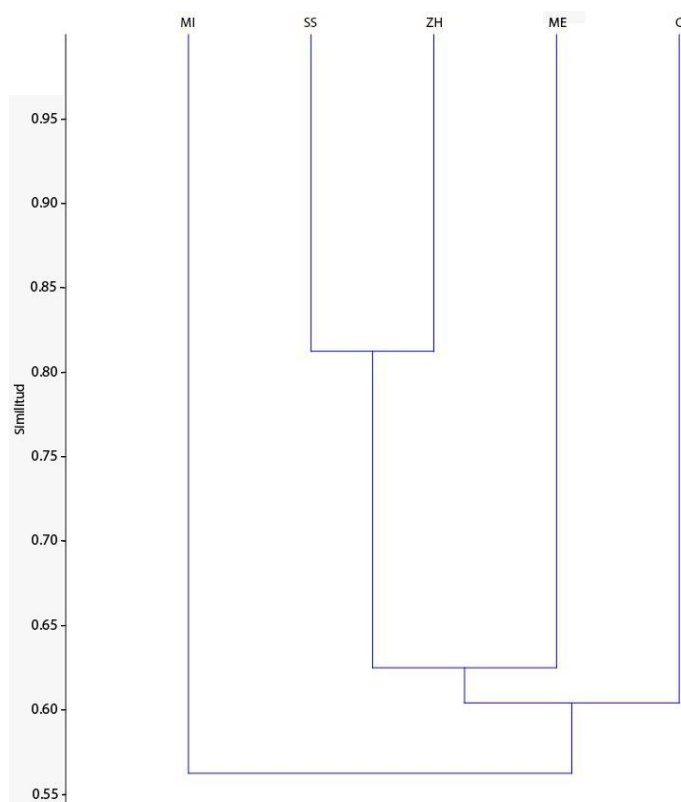


Figura 3. Índice de Simpson, de las estaciones de muestreo en las microcuencas

En el test ANOVA de una vía, para determinar si los valores medios de los 14 puntos de muestreo presentan diferencias significativas, con un nivel de confianza del 95%. La variable número de individuos por familia tuvo un valor de  $p = 0,0031$ , encontrando diferencias significativas entre la microcuenca San Simón con las microcuencas El Carmen, Zamora Huayco, Mendieta y Minas con un nivel de significancia del 0,05%.

Finalmente, la Tabla 6 muestra el índice de calidad ecológica (ICE) con una ponderación del 25% en los cuatro índices descritos en la metodología de este estudio, donde se resaltan las condiciones de buena calidad en las microcuencas San Simón y El Carmen alcanzando un puntaje de 0,79 y 0,70 respectivamente. A pesar de contar estas microcuencas con buena calidad, se debe mantener su cuidado monitoreando periódicamente su calidad más aún al ser fuentes de abastecimiento de agua para la ciudad. De igual forma se puede observar que la microcuenca Mendieta está muy cerca de alcanzar un valor que la ubicaría en el rango de buena calidad ecológica; siendo esta última también proveedora de agua para Loja. En la que sus habitantes poseen una conciencia ambiental buena, en donde principalmente el GAD municipal con el apoyo de FORAGUA han desarrollado estrategias oportunas de manejo y conservación a través de ordenanzas para las cuencas de importancia hídrica y natural (Mera-Parra et al., 2022). Sin embargo, se debería continuar impulsando el cuidado con más propuestas y planes de manejo y conservación, para mejorar las condiciones en las demás microcuencas que rodean la ciudad y su interconexión con las parroquias del cantón Loja.

A pesar de que la Tabla 6 muestra la ponderación de los índices (SVAP, EPT, ABI-BMWP y DIVERSIDAD), que ubican

independientemente en los primeros lugares a las tres microcuencas abastecedoras de agua para la ciudad (del área de estudio). Adicionalmente, se evaluó lo sugerido por Moya et al. (2019), la relación entre los índices que integran el ICE, a través de un análisis de correlación de Pearson. Se observó una correlación positiva moderada (0,33) entre el ABI-BMWP y el SVAP, y una fuerte correlación positiva entre el índice de DIVERSIDAD con el ABI-BMWP (0,95), y el EPT (0,94).

En contraste con lo que describe la Tabla 2, que la microcuenca San Simón tiene el 22% de su área protegida, cuenta con el valor más alto del ICE. Por el contrario, la microcuenca Minas con una superficie total similar, tiene solamente el 5% de su área protegida, lo que a su vez genera el valor más bajo del ICE. Por lo que podemos decir que a nivel general se observa una disminución progresiva de la calidad ecológica en relación con el porcentaje de conservación de la cobertura del suelo de las microcuencas; por lo que se recomienda ampliar los programas de reforestación y restauración para todas las microcuencas. También es recomendable hacer monitoreos espacio-temporales, en los que se pueda incluir otras variables, como parámetros fisicoquímicos complementarios. Adicionalmente, se puede relacionar el ICE con los efectos de prácticas de conservación de suelos y condiciones climáticas (Arteaga-Marín et al., 2022). O relacionar este, con impactos antropogénicos específicos; por ejemplo, en cuencas con efluentes puntuales de contaminación como vertidos de granjas de animales, o áreas de producción agrícola intensiva que usan gran cantidad de pesticidas.

Tabla 6. Índice de calidad ecológica (ICE) de las microcuencas de estudio

Índices	El Carmen	San Simón	Zamora Huayco	Mendieta	Minas
SVAP	24,33	27,75	23,75	28,67	27,75
ABI-BMWP	16,50	22,67	15,38	18,00	13,42
EPT	23,44	18,48	19,99	17,16	14,60
DIVERSIDAD	5,40	10,20	5,43	5,63	4,34
ICE	0,70	0,79	0,65	0,69	0,60
Calidad	Buena	Buena	Media	Media	Media

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las microcuencas bajo estudio presentaron una dominancia en familias de macroinvertebrados que, demandan de buena calidad de agua y que son altamente sensibles a la contaminación.

Según el índice de diversidad, se pudo determinar que las microcuencas San Simón y El Carmen cuentan con una alta diversidad biológica. En todas las microcuencas se aprecia una relación entre las especies de macroinvertebrados y la cobertura vegetal protegida presente. En el análisis de similitud el menor peso es para la microcuenca Minas, que también tiene los valores más bajos de ICE y conservación de la cobertura vegetal natural.

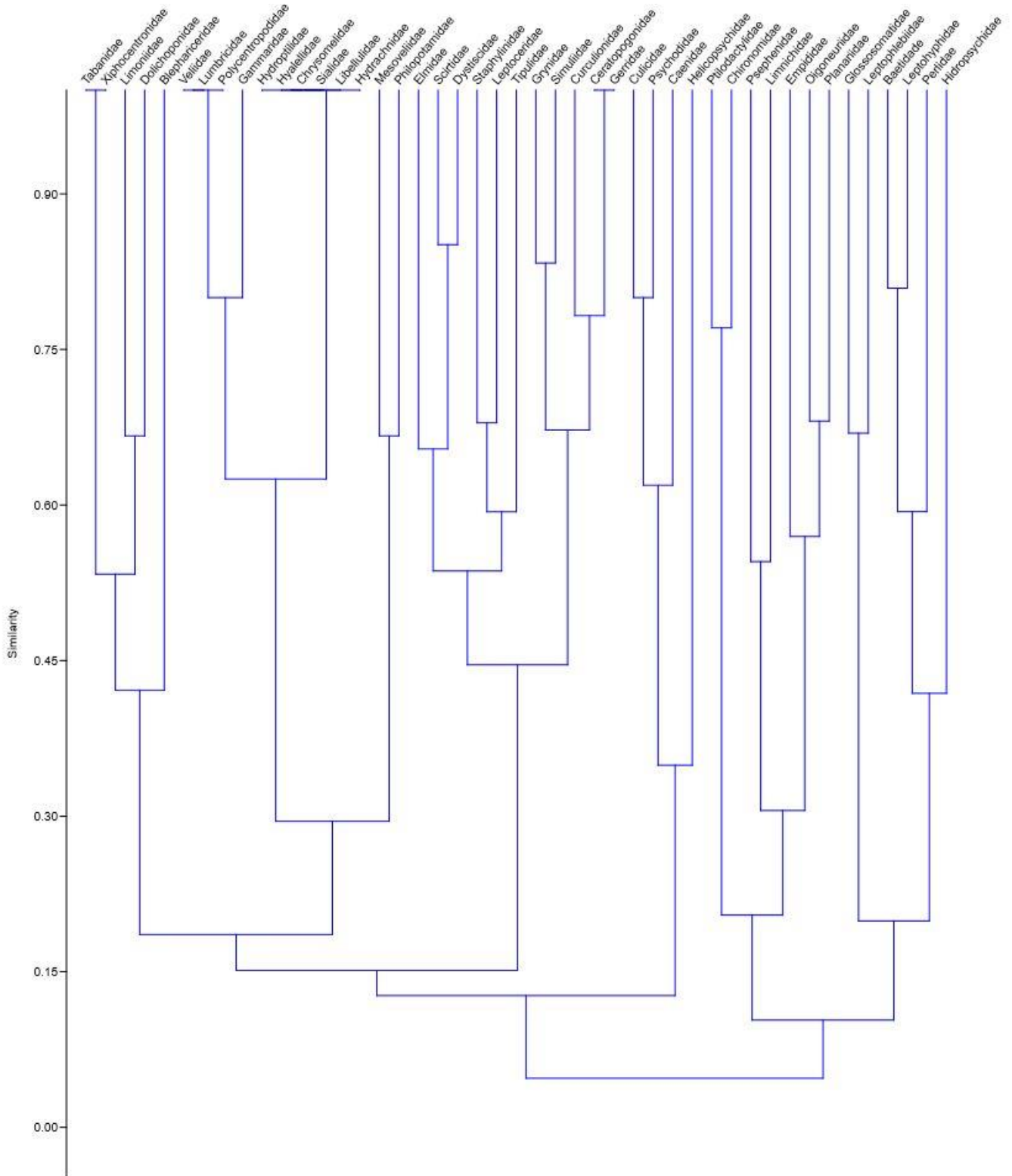


Figura 4. Dendrograma de similitud entre familias de macroinvertebrados

El ICE, es adecuado para evaluar el estado ecológico en cuencas abastecedoras de agua; por lo que se recomienda su uso para el diagnóstico de las mismas, y poder proponer la gestión integral de cuencas, en los que se establezca su monitoreo periódico o simulando diferentes escenarios ambientales ya sean climáticos, de uso, manejo y/o conservación.

**REFERENCIAS**

Alzate Gamboa, I. J., & Moreno Gutiérrez, L. N. (2021). Evaluación de la calidad del agua del Río Chisacá en la localidad de Usme mediante macroinvertebrados acuáticos empleando el índice BMWP/Col y el índice ASPT. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/29237>



- Arce, M.F., y Leiva, A. (2009). *Determinación de la calidad del agua de los ríos de la ciudad de Loja y diseño de líneas generales de acción para su recuperación y manejo* [Tesis de Ingeniería, Universidad Técnica Particular de Loja]. RiUTPL. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/474>
- Arteaga-Marín J, Mejía-Ventimilla D, Ochoa-Cueva P. 2022. Estimación de la producción de sedimentos por prácticas de manejo de suelos en una cuenca transfronteriza. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 38: 1–12. <https://doi.org/10.20937/rica.54315>
- Bravo Chaves, L.R. & Restrepo Franco, G.M. (2021). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en dos ecosistemas lóticos en El Doncello, Caquetá. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 17(1), 57-71. <https://doi.org/10.18359/rfcb.5432>
- Chavez-Cruz, R. (2022). Evaluación de la calidad del agua mediante la bioindicación de macroinvertebrados acuáticos, en un tramo del río Toribio, Ciénaga, Magdalena, Colombia. *Ciencia e Ingeniería*, 9(2). <http://revistas.uniguajira.edu.co/index.php/cei>
- Damián-Carrión, D., Recalde Moreno, C., Marquez, C., Rodríguez Llerena, M., y Ayala, J. (2017). Priorización de microcuencas en los Andes ecuatorianos usando parámetros WSA y GIS. *Revista Geográfica Venezolana*, 58(1), 38-61. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=347753792004>
- Íñiguez-Armijos, C., Leiva, A., Frede, H.G., Hampel, H., Breuer, L. (2014). Deforestation and Benthic Indicators: How Much Vegetation Cover Is Needed to Sustain Healthy Andean Streams? *PLoS ONE* 9(8), e105869. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105869>
- Íñiguez-Armijos, C., Tapia-Armijos, M. F., Wilhelm, F., & Breuer, L. (2022). Urbanisation process generates more independently-acting stressors and ecosystem functioning impairment in tropical Andean streams. *Journal of Environmental Management*, 304, 114211. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114211>
- Leaño-Sanabria, J.J., & Pérez-Barriga, D. (2020). Determinación de la Calidad del Agua mediante el índice BMWP/BOL (bioindicadores ecológicos) del Río Trancas, Municipio de Entre Ríos-Tarija. *Acta Nova*, 9(4), 567-591. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892020000100007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892020000100007&script=sci_arttext)
- Mejía, D., Ochoa, P., Samaniego, N., Félix, R., Arteaga, J., Crespo, P., Oñate, F., Fries, A. (2019). River Discharge Simulation in the high Andes of Southern Ecuador using high-resolution radar observations and meteorological station data. *Remote Sensing*, 11, 2804. <https://doi.org/10.3390/rs11232804>
- Mera, C., Oñate, F., Massa, P., Ochoa, P. (2021). Establishment of the Baseline for the IWRM in the Ecuadorian Andean Basins: Land Use Change, Water Recharge, Meteorological Forecast and Hydrological Modeling. *Land*, 10, 513. <https://doi.org/10.3390/land10050513>
- Mera-Parra, C., Massa-Sánchez, P., Oñate-Valdivieso, F., Ochoa-Cueva, P. (2022). Territorial Prospective to Sustainability: Strategies for Future Successful of Water Resource Management on Andean Basins. *Land*, 11, 1100. <https://doi.org/10.3390/land11071100>
- Moya, N., Santander, M., & Fernández, B. (2019). Evaluación de la calidad ecológica de los ríos Quirpinchaca y Cachimayu usando macroinvertebrados como bioindicadores de contaminación. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 17(19), 11-22. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2225-87872019000100002&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2225-87872019000100002&script=sci_arttext)
- Montoya-Moreno, Y., & Escobar-Gutiérrez, A.F. (2019). Los macroinvertebrados acuáticos y la calidad biológica del agua en una quebrada andina, Antioquia-Colombia. *Revista Politécnica*, 15(29), 65-81. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n29a6>
- Morelli, E., y Verdi, A. (2014). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en cursos de agua dulce con vegetación ribereña nativa de Uruguay. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 8(4), 1160-1170. <https://doi.org/10.7550/rmb.45419>
- Ochoa, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez, J.A., & Boll J. (2015). Spatial estimation of soil erosion risk by Land-cover change in the Andes of Southern Ecuador. *Land Degradation and Development*, 26, 565–573. <https://doi.org/10.1002/ldr.2219>
- Ochoa, P.A., Chamba, Y.M., Arteaga, J.G., Capa, E.D. (2017). Estimation of Suitable Areas for Coffee Growth using a GIS Approach and Multicriteria Evaluation in regions with Scarce Data. *Applied Engineering in Agriculture*, 33, 841–848. <https://doi.org/10.13031/aea.12354>
- Osejos, M., Merino, M., Merino, M., y Solis, J. (2020). Macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua de la parte céntrica del río Jipijapa - Ecuador. *Recimundo*, 4(4), 454-467. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(4\).octubre.2020.454-467](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.454-467)
- Padilla García, C.A., & Franco Higuaita, Y.A. (2021). Evaluación de la calidad del agua y su relación con factores antrópicos y del hábitat en el tramo medio del río Gaira en la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/4854>
- Peña, S.A., Bohórquez, H.A., Barrera, A.K., Salamanca, S.S., Jiménez, D.A. y Botello, W.A. (2019). Macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua en la quebrada La Calabozza (Yopal, Casanare), *Entre Ciencia e Ingeniería*, 13(25), 14-22. <https://doi.org/10.31908/19098367.4010>
- PRAS Programa de Reparación Ambiental y Social del Ministerio del Ambiente. (2020). Guía metodológica de peritaje ambiental – Herramienta para la reparación integral de daños ambientales, 2da. Edición. Quito: PRAS. <http://pras.ambiente.gob.ec/inicio>

- Ramírez, A., & Gutiérrez-Fonseca, P.E. (2014). Estudios sobre macroinvertebrados acuáticos en América Latina: avances recientes y direcciones futuras. *Revista de Biología Tropical*, 62(2), 9-20. [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442014000600001&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442014000600001&lng=en&tlng=es)
- Ríos-Touma, B., Acosta, R., & Prat, N. (2014). The Andean Biotic Index (ABI): revised tolerance to pollution values for macroinvertebrate families and index performance evaluation. *Revista de Biología Tropical*, 249-273. [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0034-77442014000600017&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0034-77442014000600017&script=sci_arttext)
- Rodríguez Valencia, N., Quintero Yepes, L. V., Gómez Zuluaga, G. A., Bohórquez Zapata, V. L., González Durán, C. M., Osorio Ocampo, A. F., de Miguel García, A., Harmsen, J., Wolters, W., & Miguel Ayala, L. (2018). *Guía para la evaluación de la calidad del agua superficial en microcuencas cafeteras de Colombia*. APC Columbia. 206 p.
- Rodríguez, S., Jaramillo, S., Zurita, D., Valdiviezo, A., & Choloquina, C. (2022). Evaluación de la Calidad del Agua de Riego Proveniente de la Acequia Tilipulo Enriquez-Cotopaxi Mediante la Relación de Absorción de Sodio (RAS). *Revista Politécnica*, 49(2), 55-64. <https://doi.org/10.33333/rp.vol49n2.06>
- Rodríguez Badillo, L., Ríos Guayasamín, P., Espinosa Chico, M., Cedeño Loja, P. y Jiménez Ortiz, G. (2016). Caracterización de la calidad de agua mediante macroinvertebrados bentónicos en el río Puyo, en la Amazonía Ecuatoriana. *Hidrobiología*, 26(3), 497-507. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-88972016000300497&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972016000300497&lng=es&tlng=es)
- Soria-Reinoso, I.F. (2016). *Evaluación de la Calidad Ecológica del río Jatunhuayco en la zona asociada a la Captación Jatunhuayco (EPMAPS) utilizando comunidades de macroinvertebrados como indicadores de la calidad del agua* [Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital - EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16736>
- Santamaría, E.E, y Bernal, J.A. (2016). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos y calidad del agua en la cuenca alta del río Chiriquí Viejo, provincia de Chiriquí, Panamá. *Tecnociencia*, 18(1), 5-24. <https://uptv.up.ac.pa/index.php/tecnociencia/artic/view/129>
- Trama, F.A., Salcedo Gustavson, S.A., Demarcy, L., Erbure Cardozo, L.E., Jara Palomino, B.A., Muñoz Curo, F.E., Rios Alvarado, J.R. & Rizo Patrón Viale, F.L.S. (2020). Índices de calidad de habitat y macroinvertebrados en siete Cuencas del Parque Nacional Yanachaga Chemillén y su Zona de Amortiguamiento: conservación y manejo del bosque ribereño en el Perú. *Revista Peruana de Biología*, 27(2), 149-168. <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v27i2.16730>

- Urdanigo, J.P., Díaz Ponce, M., Tay-Hing Cajas, C., Sánchez Fonseca, C., Yong Benítez, R., Armijo Albán, K., Guerrero Chuez, N., & Mancera-Rodríguez, N.J. (2019). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos en quebradas con diferente cobertura ribereña en el bosque Protector Murocomba, Ecuador. *Revista de Biología Tropical*, 67(4), 861-878. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v67i4.35190>

## BIOGRAFÍAS



**Fabiola, Martínez**, Ingeniera en Gestión Ambiental por la Universidad Técnica Particular de Loja, Maestría en Ingeniería Ambiental y Seguridad Industrial en la Universidad Nacional de Piura. Experiencia en Monitoreo Ambiental, Estudios de Impacto Ambiental, Ecología, Biología de la conservación. Docente-investigador y asesora de proyectos de investigación de fin de carrera de pregrado en la Tecnología Superior en Desarrollo Ambiental del Instituto Superior Tecnológico Sudamericano.



**Cristhian, Prieto**, Ingeniero en Gestión Ambiental por la Universidad Técnica Particular de Loja, Magister en Seguridad Industrial con mención en Prevención de Riesgos Laborales. Experiencia en Sistemas de Información Geográfica, Estudios de Impacto Ambiental, Seguridad Industrial. Coordinador, docente-investigador de la Tecnología Superior en Desarrollo Ambiental del Instituto Superior Tecnológico Sudamericano.





**Paulina, Martínez**, Licenciada en Ciencias de la Educación con especialidad de Química y Biología, por la Universidad Nacional de Loja, Magister en Psicopedagogía del Centro Universitario Internacional de Madrid CUNIMAD. Cuenta con formación en análisis químico. Vicerrectora Académica, Coordinadora de Vinculación con la Sociedad y Docente-investigadora del Instituto Superior Tecnológico Sudamericano.



**Pablo, Ochoa**, PhD en Ciencias y Tecnologías Agrarias, de los Recursos Naturales y de Desarrollo Rural por las Universidades de Córdoba y Málaga (España). Ingeniero en Gestión Ambiental por la UTPL. Docente en esta Universidad desde el 2005 en las modalidades a distancia y presencial. Coordinador y participante en estudios relacionados con el impacto de uso, manejo y conservación del suelo y agua en cuencas hidrográficas.

# Modeling Cloud Infrastructure Provisioning: A Software-as-a-Service Approach

Sandobalin, Julio <sup>1,\*</sup>  ; Iñiguez-Jarrín, Carlos <sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Informática y Ciencias de la Computación, Quito, Ecuador

**Abstract:** Provisioning means making an infrastructure element, such as a server or network device, ready for use. DevOps community leverages the Infrastructure as Code (IaC) approach to supply tools for cloud infrastructure provision. However, each provisioning tool has its scripting language, and managing different tools for several cloud providers is time-consuming and error-prone. In previous work, we presented a model-driven infrastructure provisioning tool called ARGON, which leverages the IaC approach using Model-Driven Engineering. ARGON provides a modeling language to specify cloud infrastructure resources and generates scripts to support cloud infrastructure provisioning orchestration. Since ARGON runs in the Eclipse Desktop IDE, we propose to migrate from an ARGON Desktop to an ARGON Cloud as a Software-as-a-Service approach. On the one hand, we developed a domain-specific modeling language using JavaScript Frameworks. On the other hand, we used a Model-to-Text transformation engine through a REST web service to generate scripts. Finally, we carried out an example by modeling infrastructure resources for Amazon Web Services and then generating a script for the Ansible tool.

**Keywords:** Infrastructure as Code, Domain-Specific Language, Cloud Infrastructure Provisioning, Software-as-a-Services, Model-Driven Engineering

## Modelado del Aprovechamiento de Infraestructura en la Nube: Un Enfoque de Software como un Servicio

**Resumen:** Aprovisionar significa hacer que un elemento de la infraestructura, como un servidor o un dispositivo de red, esté listo para su uso. La comunidad DevOps aprovecha el enfoque de Infraestructura como Código (Infraestructura as Code, IaC) para proporcionar herramientas para el aprovisionamiento de infraestructura en la nube. Sin embargo, cada herramienta de aprovisionamiento tiene su propio lenguaje de secuencias de comandos, y administrar diferentes herramientas para varios proveedores de la nube lleva mucho tiempo y es propenso a errores. En trabajos anteriores, presentamos una herramienta de aprovisionamiento de infraestructura dirigida por modelos llamada ARGON, que aprovecha el enfoque de IaC mediante la Ingeniería de Software Dirigida por Modelos. ARGON proporciona un lenguaje de modelado para especificar los recursos de la infraestructura de la nube y genera scripts para apoyar la orquestación del aprovisionamiento de la infraestructura de la nube. Dado que ARGON se ejecuta en el IDE de escritorio Eclipse, proponemos migrar de un ARGON Desktop a un ARGON Cloud como un enfoque de Software-como-un-Servicio. Por un lado, desarrollamos un lenguaje de modelado específico de dominio utilizando marcos de trabajo de JavaScript. Por otro lado, utilizamos un motor de transformación de modelo-a-texto a través de un servicio web REST para generar scripts. Finalmente, llevamos a cabo un ejemplo modelando recursos de infraestructura para Amazon Web Services y luego generamos un script para la herramienta Ansible.

**Palabras claves:** Infraestructura como Código, Lenguaje Específico de Dominio, Aprovisionamiento de Infraestructura en la Nube, Software como un Servicio, Ingeniería de Software Dirigida por Modelos

### 1. INTRODUCTION

DevOps (*Development and Operations*) promotes collaboration between developers and operations staff using a set of values, principles, practices, and tools to optimize software delivery time (Farley et al., 2010). The continuous deployment (CD) practice generates a lot of attention when a critical defect comes to the pro-

duction environment or software artifacts are delivered late. Furthermore, the CD practice is the borderline between developers and operation staff in the software delivery cycle. In this scenario, practitioners and researchers use the Infrastructure as Code (IaC) to support the CD practice and improve the software delivery time. IaC is an approach to infrastructure automation based on software development practices (Morris, 2016). The idea behind IaC is to

\*julio.sandobalin@epn.edu.ec

Recibido: 10/08/2022

Aceptado: 24/08/2023

Publicado en línea: 14/11/2023

10.33333/tp.vol52n2.09

CC BY 4.0

write and execute code to define, update, provision, and destroy the infrastructure (Brikman, 2019).

Cloud Computing comprises hardware-based services, in which hardware management is highly abstracted, and the infrastructure capacity is highly elastic (Buyya et al., 2011). The DevOps community supplies IaC tools to orchestrate cloud infrastructure provisioning. Each IaC tool uses its files or scripts to define the creation, update, execution, and destruction of the cloud infrastructure resources. However, managing scripting languages of different IaC tools for several cloud providers is time-consuming and error-prone. In previous work, we presented ARGON (Sandobalín et al., 2017a), an infrastructure modeling tool for cloud provisioning to address these problems. ARGON leverages the IaC approach through Model-Driven Engineering (MDE). On the one hand, ARGON abstracts the complexity of managing the particularities of cloud providers to define their infrastructure resources using a domain-specific modeling language called ArgonML (*ARGON Modeling Language*). On the other hand, ARGON generates scripts by a Model-to-Text (M2T) transformation engine for different IaC tools to support the orchestration of cloud infrastructure provisioning. ARGON (Sandobalín et al., 2017b) has proven work suitable in a toolchain for cloud infrastructure provisioning using DevOps community tools. Furthermore, ARGON (Sandobalín et al., 2018) supports multi-cloud infrastructure provisioning and proposes a flexible migration process among cloud providers. Finally, a family of controlled experiments (Sandobalín et al., 2020) was carried out to compare ARGON with Ansible as regards their effectiveness, efficiency, perceived ease of use, perceived usefulness, and intention to use.

ARGON works in Eclipse Modeling Framework (Steinberg et al., 2009). Eclipse is an Integrated Development Environment (IDE) with multiple programming languages and modeling tools. Eclipse provides a Desktop IDE and Cloud IDE. The former is installed, launched, and run locally on a computer. The latter is a web-based integrated development platform that can be accessed from different web browsers. Eclipse Desktop IDE has been used for a long-term period. Nevertheless, Eclipse Desktop IDE has all problems of desktop applications, such as portability, being limited by hardware, being restricted to just one machine, requiring the user to download and install it before using, etc. In contrast, Eclipse Cloud IDE works through a web browser with advantages such as users can access through all their devices, portability, less hardware dependence, fewer hardware and software compatibility issues, updates and upgrades being more accessible, etc.

Since the advent of Cloud Computing, many software applications have migrated to one of its services. In this scenario, Eclipse Cloud IDE provides its environment as a Software-as-a-Service (SaaS). However, the Eclipse Cloud IDE does not provide all the programming languages and modeling tools that offer Eclipse Desktop IDE. Therefore, our main research objective is to migrate ARGON toward Cloud Computing to provide infrastructure modeling and script generation as a SaaS service. In this scenario, we migrate ARGON Desktop IDE toward ARGON Cloud IDE to provide a SaaS approach. We did not use Eclipse Cloud IDE because it does not provide the necessary tools for developing domain-specific modeling languages and M2T transformation.

The remainder of this paper is structured as follows: Section 2 discusses related works and identifies the need for modeling the

infrastructure resources as a SaaS service. Section 3 presents ARGON Cloud as a SaaS approach. We explain the development of a domain-specific modeling language using JavaScript Frameworks and an M2T transformation engine to generate scripts employing a REST web service. Section 4 introduces an illustrative case study that shows the feasibility of the ARGON Cloud for modeling infrastructure resources and generating scripts. Finally, Section 5 presents our conclusions and future work.

## 2. RELATED WORK

There has been considerable interest in managing cloud infrastructure provisioning in recent years, and several approaches and strategies have emerged to support it. In this scenario, cloud providers have tools to define, update, manage, execute, and destroy their infrastructure resources, for instance, CloudFormation and OpsWorks of Amazon Web Services. Moreover, the DevOps community has developed several tools to manage the infrastructure provisioning of different cloud providers, such as Terraform and Ansible, and tools to install and manage software in existing servers, such as Chef and Puppet.

Solayman et al. (2023) propose an approach to automate the provision and orchestration of IoT components on Edge and Cloud Computing. In this scenario, the authors use DevOps tools to provision and orchestrate container-based IoT applications through practices such as continuous integration and deployment.

Neharika et al. (2023) investigate secure infrastructure provisioning. This approach achieves secure and automatic infrastructure provisioning using a source code analysis tool, container security tool, and Infrastructure as Code (IaC) tools. The IaC scripts of containers are scanned, and when critical vulnerabilities are not found, the infrastructure is automatically provisioned using Terraform tool.

Miñón et al. (2022) present the Pangea tool to generate suitable execution environments for deploying analytic pipelines. The pipelines are executed on edge, fog, cloud, or on-premise computing settings. First, Pangea provisions infrastructure on demand if it does not exist. Subsequently, Pangea configures each host operative system, installs dependencies, and downloads the code to execute. Finally, Pangea deploys the pipelines.

Kartheyayini et al. (2022) propose an approach for DevOps tools management using a Domain-Specific Language (DSL) based on IaC. The DSL model the final state of a provisioning infrastructure on the cloud and generating the provisioning scripts for Amazon Web Services (AWS). The authors propose moving legacy applications to a cloud platform by creating infrastructure as code dynamic infrastructure platforms to deploy and manage different applications design such as microservices applications, IoT applications, legacy applications, etc.

Chiari et al. (2022) present a DevOps Modelling Language (DOML) to describe cloud applications of different cloud providers and IaC tools. DOML supplies different modeling perspectives in a multi-layer approach. DOML describes an application, abstract, and concrete infrastructure layer. This approach supports developers in abstractly defining cloud applications, mapping software components to infrastructure elements, and deploying the software application.

Palma et al. (2022) present DEFUSE, a language-agnostic tool

for software defect prediction. DEFUSE tool collects and classifies failure data to enable data correction and then builds machine learning models to detect defects based on the data classified. DEFUSE tool supports the IaC practice to enable infrastructure provisioning through the definition of machine-readable files. López-Viana et al. (2022) present a proof of concept based on Cloud Native Computing Foundation (CNCF) tools to check the feasibility of using GitOps with the Internet of Things (IoT) along with Edge computing (EC) solutions. The authors found several drawbacks to using these tools, such as a lack of automatic infrastructure provisioning and limitations on the edge devices that can be supported. Additionally, the authors aim to replicate best practices used in cloud-native development and operation.

Zhou et al. (2019) designed and implemented a framework called CloudsStorm to allow developers to easily leverage different cloud providers' virtual infrastructure functions (VIF) for programming their cloud applications. CloudsStorm supports application and infrastructure programmability at the design, infrastructure, and application levels. Besides, Clouds Storm also defines infrastructure provisioning using IaC tools.

Guerriero et al. (2019) present the state of adopting the IaC practice and the critical software engineering challenges. The authors carried out semi-structured interviews with senior developers. The study shows how practitioners adopt and develop the IaC practice for infrastructure provisioning. Moreover, the study also presents the advantages and disadvantages of using IaC tools and the practitioner's needs when dealing with developing, maintaining, and evolving infrastructure provisions using IaC practice. The findings establish that the currently available IaC tools are still limited, and developers feel the need for novel techniques for maintaining IaC code.

Ferry et al. (2018) present a Cloud Modeling Framework (CloudMF), which has a domain-specific language for specifying the deployment and provisioning of multi-cloud applications. CloudFM proposes a Cloud Provider-Independent Model (CPIM) to define the provisioning and deployment of cloud applications. Moreover, CloudFM has a Cloud Provider-Specific Model (CPSM) that uses a model@run-time engine to request cloud providers a list of available resources to refine the CPIM into a CPSM.

Casola et al. (2017) provide a DevOps approach to developing multi-cloud applications (MUSA) with Service Level Agreements (SLAs). MUSA has a modeler tool to define application architectures and deployment requirements using a modeling language based on CAMEL (Rossini, 2015) to define application architectures and deployment requirements.

Nitto et al. (2017) propose a model-driven approach for designing and executing applications on multiple Clouds (MODAClouds). On the one hand, Quality of Service (QoS) requirements are defined and specified on the Cloud Independent Model (CIM) level. On the other hand, cloud-specific characteristics are defined on the CPIM level. Consequently, the CPSM level specifies a precise provider and service for the software application, runs QoS analyses and generates appropriate deployment, monitoring, and self-adaptation scripts to support the runtime phases.

Chen et al. (2016) developed a model-driven operation service (MORE) for cloud-based IT systems that automates deployment and dynamic configuration of software applications. MORE sup-

plies an online modeling editor to specify a topology model, deployment structure, and desired state. MORE transforms the topology model into executable code for Puppet to deploy virtual machines, physical machines, and containers.

In summary, current research works have focused on reusing DevOps community tools (i.e., IaC Tools) to breach gaps described in infrastructure provisioning and applications deployment in cloud computing. Furthermore, researchers focus on providing support for modeling and deploying cloud applications and managing the CPIM and CPSM levels following a model-driven approach. In contrast, ARGON Cloud abstracts the issues related to infrastructure modeling of different cloud providers and then generates scripts for DevOps provisioning tools. As a result, ARGON Cloud offers a SaaS approach to provide a Domain-Specific Modeling Language (DSL) and an M2T transformation engine.

### 3. ARGON CLOUD

ARGON Desktop (Sandobalin et al., 2017a) is an infrastructure modeling tool for cloud provisioning, which uses the fundamental principles of Model-Driven Engineering (MDE): *abstraction* and *automation*. On the one hand, ARGON Desktop provides ArgonML (ARGON Modeling Language) to abstract cloud capabilities and thus model cloud infrastructure resources. On the other hand, ARGON Desktop uses a Model-to-Text (M2T) transformation engine to generate scripts for cloud infrastructure provisioning automatically. The following subsections explain the ARGON Cloud as a Software-as-a-Service (SaaS) approach.

#### 3.1 Domain-Specific Modeling Language

DevOps community provides a vast range of IaC tools for supporting the orchestration of cloud infrastructure provisioning, such as Ansible, Terraform, CloudFormation, OpenStack Head, etc. Each IaC tool has a different scripting language to define the cloud infrastructure resources. We propose ArgonML to mitigate the complexity of different scripting languages and facilitate a holistic infrastructure modeling language. ArgonML is a Domain-Specific Modeling Language (DSL) to model infrastructure resources for cloud providers. ArgonML follows the design principles for developing DSL proposed by Brambilla et al. (2017).

##### 3.1.1 Abstract Syntax

ArgonML has an Infrastructure Metamodel (Sandobalin et al., 2017a) (IMM) to define modeling concepts, relationships, and properties of cloud infrastructure resources. According to Brambilla et al. (2017), a metamodel constitutes the definition of a modeling language since it describes the whole class of models that language can represent. Figure 1 shows an excerpt from the IMM, which abstracts cloud capacities, such as computing, storage, networking, and elasticity of different cloud providers, to obtain a holistic infrastructure modeling language.

ARGON Desktop runs on Eclipse Modeling Framework (Steinberg et al., 2009) (EMF) to provide a modeling environment, and thus, the metamodeling language Ecore\* defines the IMM. However, Ecore is restricted to defining metamodels based solely on the EMF environment. In this scenario, to provide an abstract

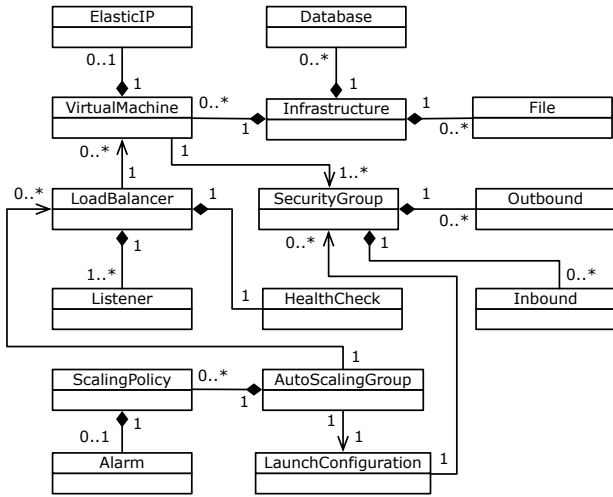


Figure 1. Excerpt from the Infrastructure Metamodel (Sandobalín et al., 2017a)

syntax (i.e., infrastructure metamodel) for ARGON Cloud, we conduct a comparative study of JavaScript Frameworks to obtain the most suitable option to define the IMM in a textual manner. As a result, we chose Ecore.js to represent the IMM meta-modeling using JavaScript. Ecore.js implements the Ecore model in JavaScript, including JSON and XMI (XML Metadata Interchange) writers and parsers for web browsers and Node.js.

We describe the main steps below to outline the metamodeling process and thus obtain an infrastructure metamodel.

- **Modeling domain analysis.** Since the specific domain of the DSL is the Infrastructure-as-a-Service (IaaS), we select the principal cloud providers, such as Google Computing Engine, Microsoft Azure, and Amazon Web Services, to define a holistic IMM. We chose these cloud providers due to their education licenses.
- **Modeling language design.** We focus on the infrastructure resources of cloud providers to abstract their capacities (i.e., computing, storage, networking, and elasticity) instead of the particular scripting languages of the DevOps tools. ARGON Cloud also generates the IaC scripts for different DevOps tools from an infrastructure model. As a result, the IMM (see Figure 2a) represents in a textual manner the cloud capacities.
- **Modeling language validation.** To validate infrastructure concepts, the IMM is instantiated for different cloud providers. In this context, we generate an infrastructure model (see Figure 2b) that conforms to the IMM. Therefore, we create dynamic instances to validate concepts, relationships, and properties of infrastructure models, which are in accordance with its IMM.

Figure 2a shows an excerpt from the IMM written in a textual manner using Ecore.js. In Ecore, a Package groups metaclasses and their data types. In this case, the Ecore Package (line 1) defines its name, which is not to be unique. Instead, a URI (Uniform Resource Identifier) uniquely identifies the package. This URI is

specified as the value of the nsURI attribute, and the nsPrefix attribute is used to define the corresponding namespace prefix. The Virtual Machine metaclass (line 8) defines its name (line 9) and the supertype (line 10) corresponding to the Element metaclass from which it is extended. The image attribute (line 12) represents a virtual machine image that contains a virtual disk with a bootable operating system. Additionally, we define references (line 24) to other metaclasses, such as the reference to a Security Group metaclass that works as a firewall to the Virtual Machine.

Since Ecore metamodels are serialized using XMI (XML Metadata Interchange). We use the Ecore.js framework to serialize the IMM. Serialization translates a data structure (i.e., IMM) into a format that can be stored, transmitted, and reconstructed in different environments. Figure 2b shows an excerpt from the IMM represented in XMI format. XMI is the format used by the Eclipse environment as a canonical representation of metamodels. Additionally, to export the model (which conforms to its metamodel) is necessary to use the XMI format. For instance, to move an infrastructure model (which conforms to the IMM) toward a Model-to-Text (M2T) transformation engine and thus generate the corresponding IaC script.

The IMM describes the whole infrastructure models that ArgonML can represent. In this case, the IMM defines all infrastructure models expressed using ArgonML. Note that the DSL proposes a holistic modeling language to describe the infrastructure of any cloud provider. Moreover, it is possible to specialize the tags of an infrastructure model for a particular cloud provider, such as Microsoft Azure, Amazon Web Services, Google Computing Engine, etc.

### 3.1.2 Concrete Syntax

While the *abstract syntax* (i.e., IMM) constitutes the definition of the ArgonML since it describes the whole classes of infrastructure models that can be represented, the *concrete syntax* defines the notation of the graphical language. Several frameworks provide specific languages to describe the concrete syntax for ArgonML, as well as generator components that allow the generation of editors to visualize and manipulate infrastructure models, such as EuGENia, Graphiti, Graphical Editing Framework, etc. Since ARGON Desktop runs on the Eclipse environment, we used EuGENia to generate the corresponding editor to visualize and manipulate infrastructure models. However, ARGON Cloud must be accessed from different web browsers to provide a SaaS approach. Therefore, we also conduct a comparative study of JavaScript Frameworks to obtain the most suitable option to define the graphical notation. As a result, we selected mxGraph, a JavaScript diagramming library that enables create interactive graph applications to run natively in any web browser. According to Brambilla et al. (2017) and considering mxGraph, we define the graphical concrete syntax for ARGON Cloud through particular elements, such as graphic symbols, compositional rules, and mapping.

Figure 3a shows an excerpt from visual editor code using mxGraph. We specify the graphical concrete syntax as follows:

- **Graphical symbols:** The *mxcell* class supports the definition of the virtual machine element (line 1), a visual element to be created in the infrastructure visual editor. In this case, the

**a**

```

1 var Package = Ecore.EPackage.create({
2   name: 'Infrastructure',
3   nsPrefix: 'Infrastructure',
4   nsURI: 'platform:/metamodel/Infrastructure.ecore'});
5 ...
6 var VirtualMachine = Ecore.EClass.create({
7   name: 'VirtualMachine',
8   eSuperTypes: Element
9 });
10 var Image = Ecore.EAttribute.create({
11   name: 'image',
12   eType: Ecore.EString
13 });
14 var InstanceType = Ecore.EAttribute.create({
15   name: 'instanceType',
16   eType: Ecore.EString
17 });
18 var Count = Ecore.EAttribute.create({
19   name: 'count',
20   eType: Ecore.EInt
21 });
22 var Groups = Ecore.EReference.create({
23   name: 'groups',
24   lowerBound: 1,
25   upperBound: -1,
26   eType: SecurityGroup
27 });

```

**b**

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <ecore:EPackage xmi:version="2.0"
3   xmlns:xmi="http://www.omg.org/XMI"
4   xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
5   xmlns:ecore="http://www.eclipse.org/emf/2002/Ecore"
6   name="Infrastructure"
7   nsURI="platform:/metamodel/Infrastructure.ecore"
8   nsPrefix="Infrastructure">
9   ...
10  <eClassifiers xsi:type="ecore:EClass"
11    name="VirtualMachine"
12    eSuperTypes="#//Element">
13    <eStructuralFeatures xsi:type="ecore:EReference"
14      name="group" lowerBound="1" upperBound="-1"
15      eType="#//SecurityGroup">
16    </eStructuralFeatures>
17    <eStructuralFeatures xsi:type="ecore:EAttribute"
18      name="name" eType="ecore:EDataType http://
19      www.eclipse.org/emf/2002/Ecore#//EString"/>
20    <eStructuralFeatures xsi:type="ecore:EAttribute"
21      name="image" eType="ecore:EDataType http://
22      www.eclipse.org/emf/2002/Ecore#//EString"/>
23    <eStructuralFeatures xsi:type="ecore:EAttribute"
24      name="instance_type" eType="ecore:EDataType
25      http://www.eclipse.org/emf/2002/Ecore#//EString"
26    />
27  </eClassifiers>
28  ...

```

Figure 2. Representing the Infrastructure Metamodel textually

**a**

```

1 var node = doc.createElement('virtualmachine');
2 node.setAttribute('Name', 'Virtual Machine');
3 node.setAttribute('Image', 'ami-0d7c8dde348d3b09f');
4 node.setAttribute('Instance Type', 't2.micro');
5 node.setAttribute('Count', 1);
6 addVertex('images/virtualmachine.png', 40, 40,
7   'virtualmachine', virtualmachine);
8 graph.multiplicities.push(new mxMultiplicity(true,
9   'virtualmachine', null, null, 0, 1,
10  ['securitygroup'], null, 'CONNECTION_ERROR' ));

```

**b**

Figure 3. Excerpt from the Concrete Graphical Syntax

virtual machine element has attributes, such as name (line 2), image (line 3), instance type (line 4), and count (line 5).

- **Compositional rules:** The *mxMultiplicity* class helps define how the virtual machine element links (line 8) with the security group element. The link defines how these graphical symbols are nested and combined.
- **Mapping:** Since we are using Ecore.js to define the abstract syntax and mxGraph to create the visual editor (i.e., concrete syntax), we map the graphical symbols to the corresponding abstract syntax elements. The mapping aims to state which graphic symbol should be used for which modeling concept. For instance, a virtual machine element (see Figure 3a) is visualized as a visual element (see Figure 3b).

Note that Figure 3b shows the concrete graphical syntax of a virtual machine. Moreover, virtual machine properties (see Figure 7a) should be defined in this stage. For instance, the Instance Type attribute has t2.micro that will provide 1 vCPU and 1 GB of RAM for a virtual machine in Amazon Web Services.

### 3.2 ARGON Cloud Architecture

ARGON Cloud follows the metamodeling principle to leverage the IaC approach using MDE. Metamodels can define new modeling languages and properties or features associated with existing information (a.k.a. metadata). Therefore, ARGON Cloud is based on a four-layer MDE architecture. We defined a layered architecture that helps us work at different abstractions levels. The architecture allows us to model the infrastructure resources (independently of any cloud provider and IaC tool) and then generate IaC scripts to orchestrate the cloud infrastructure provisioning. Figure 4 shows the layered ARGON Cloud architecture, where:

- **M3:** The meta-metamodel defines the concepts used at M2 (i.e., metamodel), specifying how to represent the IMM. Since ARGON Cloud will run outside the Eclipse environment, we did not use the Ecore metamodeling language. In this layer, the JavaScript Framework used as a metamodeling language is Ecore.js.
- **M2:** The metamodel defines the concepts used at M1 (i.e., the infrastructure model). In this layer, we specified all infrastructure concepts abstracted from cloud capacities (i.e., computing, storage, networking, and elasticity) using

Ecore.js. The main concepts are infrastructure elements and their attributes. This layer corresponds to the abstract syntax of ArgonML.

- **M1:** At this layer, we model the infrastructure resources based on concepts defined at M2. ARGON Cloud allows modeling infrastructure resources of any cloud provider due to abstraction (at M2) of the capacities of three leading cloud providers (Google Computing Engine, Microsoft Azure, and Amazon Web Services) to define a holistic IMM. As a result, we obtain a generic infrastructure model.
- **M0:** In this layer, an IaC script is the final instance of its infrastructure model. ARGON Cloud automatically generates scripts for several DevOps IaC Tools, such as Ansible, Terraform, etc. ARGON Cloud uses an M2T transformation engine to generate scripts from an infrastructure model. Finally, the IaC tool uses the script to orchestrate the infrastructure provisioning in a particular cloud provider.

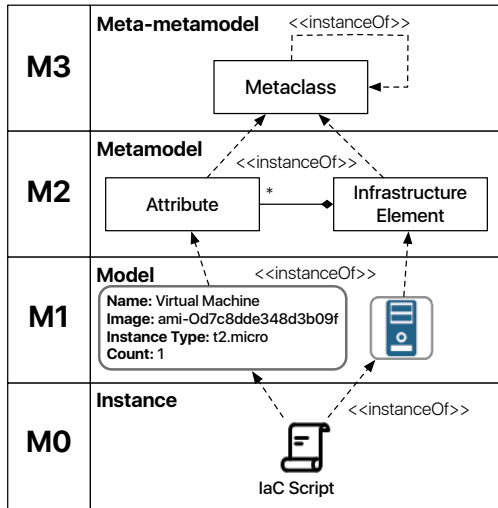


Figure 4. ARGON Cloud Architecture

### 3.2.1 A Software-as-a-Service Approach

According to Buyya et al. (2011), end-users can access a Software-as-a-Service through web browsers, thus alleviating the burden of software maintenance for customers and simplifying development and testing for providers. ARGON Cloud leverages the SaaS model service to provide end-user access to the visual modeler of cloud infrastructure through a web browser. In this context, ARGON Cloud has two components: a graphical modeler and an M2T transformation engine. The former is ArgonML, a DSL developed using JavaScript Frameworks, such as Ecore.js and mx-Graph, to provide the visual modeler of cloud infrastructure. The latter is an M2T transformation engine to support the automatic generation of IaC scripts from infrastructure models. The M2T transformation engine uses a REST web service to interchange data with the visual modeler. In this case, ArgonML uses the XMI (XML Metadata Interchange format) writer of the Ecore.js library to generate an Ecore XMI file (see Figure 2b) from an infrastructure model. The M2T transformation engine and all

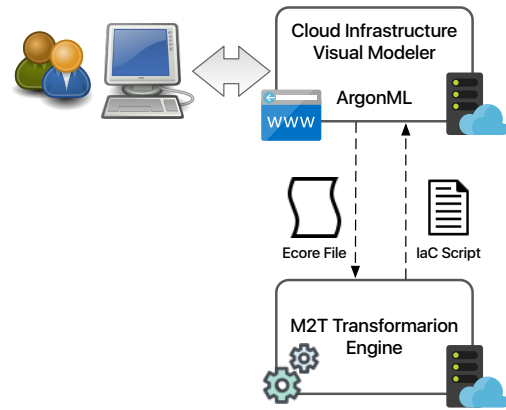


Figure 5. ARGON Cloud as Software-as-a-Service

its transformation rules were developed using Aceleo language. Sandobalin et al. (2017a) explain the procedure to define the transformation rules.

On the other hand, Eclipse is a Java-based application requiring Java Runtime Environment or Java Development Kit (JRE or JDK) to run. Therefore, the M2T transformation engine for Eclipse Desktop was packaged as a JAR (a.k.a. Java ARchive). We reuse the M2T transformation engine packaged as a JAR in Eclipse Cloud. ArgonML provides an Ecore XMI file compatible with the M2T transformation engine.

### 3.3 Limitations

ARGON Cloud currently demonstrates four notable limitations. Firstly, ARGON Cloud depends on Infrastructure as Code (IaC) tools to orchestrate infrastructure provisioning on each cloud provider. While user feedback indicates that the ARGON Cloud is appropriate for modeling cloud infrastructure resources, they suggest a seamless integration of ARGON Cloud with IaC tools to avoid moving IaC scripts —generated by ARGON— toward IaC tools such as Ansible, Terraform, CloudFormation, etc.

The second limitation of ARGON Cloud is that it does not simultaneously support the modeling of infrastructure resources for multi-clouds. It is worth mentioning that ARGON has an agnostic infrastructure metamodel (IMM), which means its Domain-Specific Modeling Language (i.e., ArgonML) can model infrastructure resources for different cloud providers. However, ArgonML can model the infrastructure for one cloud provider at a time.

A third limitation is that ARGON Cloud does not support calculating the estimated cost of provisioning infrastructure resources. Since ARGON can model the infrastructure of different cloud providers, a significant limitation is that it does not calculate the estimated cost of the infrastructure modeled that will be provisioned in a particular cloud provider.

Finally, ARGON Cloud is working in an isolated fashion. On the one hand, ARGON Cloud models the infrastructure resources for several cloud providers. On the other, it generates IaC scripts for different provisioning tools. However, ARGON Cloud lacks a seamless integration with software development tools. to support an entire DevOps lifecycle. As a result, we have to develop the software and define the infrastructure in different environments.



#### 4. RUNNING EXAMPLE

To demonstrate the feasibility of ARGON Cloud as a Software-as-a-Service approach, we propose a case study description to explain how to model and then generate the corresponding script for infrastructure provisioning in Amazon Web Services (AWS).

The infrastructure requirements for modeling and provisioning are the following:

- **Requirement 1.** A Load Balancer Architecture should define infrastructure resources needed for provisioning them in the Brazil region of AWS.
- **Requirement 2.** A *Load Balancer* element should distribute the workload among five (5) EC2 Instances (a.k.a. virtual machines). Each EC2 Instance should have one (1) virtual CPU and one (1) GB of RAM.
- **Requirement 3.** A *Health Check* element should review the state of each EC2 Instance through port 9090 and TCP protocol utilizing checking intervals every 24 seconds and should wait at least eight (8) seconds to notify an error. Moreover, the element should receive at least three (3) consecutive errors to change the state of an EC2 instance to an unhealthy state. In contrast, before changing the state of an EC2 Instance to a healthy state, it is necessary to obtain at least six (6) state verification probes successfully.
- **Requirement 4.** A *Listener* element should use the TCP protocol to resolve client requests through port 80 and distributes the workload to EC2 instances through port 9090.
- **Requirement 5.** All infrastructure resources should work in the first availability zone of the Brazil region in AWS.
- **Requirement 6.** A *Security Group* element should enable inbound TCP connections to the *Load Balancer* solely through port 80. Additionally, all outbound *Load Balancer* connections should be allowed.
- **Requirement 7.** A different *Security Group* element should enable inbound TCP connections to the EC2 Instances through port 9090 and port 22. Additionally, all outbound connections from EC Instances should be allowed.

##### 4.1 Cloud Infrastructure Modeling

Figure 6 shows an Infrastructure Diagram modeled by ARGON Cloud. Note that the resulting infrastructure model is the input for the M2T transformation engine that generates a script of infrastructure provisioning for Amazon Web Services.

The modeling solution for the infrastructure requirements is explained below:

- **Solution Requirement 1.** Figure 6 shows the Infrastructure Diagram properties that specify the **kp-brazil** code in the *Key name* property and the **sa-east-1** code in the *Region* property to provision the infrastructure in the Brazil region of AWS. The *File name* property is the name of the Infrastructure Diagram and the Script.

- **Solution Requirement 2.** Figure 8a shows the **Load Balancer** element, where it is necessary to fill out the *Name* property as well as the security group in the *Group* property and the EC2 Instance in the *Machines* property. Figure 7a presents the EC2 Instance properties. Note that the EC2 Instance defines several virtual machines to be provisioned with identical hardware characteristics. We specify the number **5** in the *Count* property to determine that five EC2 Instances will be running with the Load Balancer. The **ami-6d7t8ddee49d3b0f0** property defines the Image code to set up that each EC2 Instance should have the OS Ubuntu 18.04 LTS with the Apache server. The **t2.micro** code is specified in the *Instance type* property to set that each virtual machine should have 1 virtual CPU and 1 GB of RAM.

- **Solution Requirement 3.** Figure 8c shows the properties of the **Health Check** element. The *Ping protocol* property has the **TCP** option selected, and the *Ping port* property has the number **9090** to allow checking the state of each EC2 Instance through the **TCP** protocol and port **9090**. The *Interval* property has the number **24**, and the *Response timeout* property has the number **6** to enable checking intervals every **24** seconds and the timeout at least **6** seconds to notify an error. The *Healthy threshold* property has the number **8**, and the *Unhealthy threshold* property has the number **3** to configure the change of the state of an EC2 Instance. On the one hand, if the element receives at least **3** consecutive errors from an EC2 Instance, it should change the EC2 Instance state to unhealthy. On the other hand, if the element receives at least **8** successful consecutive state verification probes, it should change the EC2 Instance state to healthy.

- **Solution Requirement 4.** Figure 8b shows the properties of the **Listener** element. The *Protocol* property has the **TCP** option selected to enable the TCP protocol to resolve client requests. The *Load balancer port* property has the number **80**, and the *Instance port* property has the number **9090** to ensure client requests are resolved through port **80** and distributed to the EC2 Instances through port **9090**.

- **Solution Requirement 5.** Figure 7d shows the **Zone** element. The Load Balancer and Virtual Machine elements have a **Zone** element connected. To ensure that the Load Balancer and its EC2 Instances (i.e., virtual machines) work in the first availability zone of the Brazil region, we should fill out the **sa-east-1a** code in the *Name* property.

- **Solution R6.-** Figure 8d shows the **Inbound** element of the Security Group for the Load Balancer. The *Protocol* property has the **TCP** option selected, and the properties *From port* and *To port* have the number **80** to enable all inbound **TCP** connections to the Load Balancer to be made through port 80. Figure 7c shows the *Outbound* element, similar to the case of the Security Group for the Load Balancer. The *Outbound* element has the *Protocol* property with the **ALL** option selected to enable all outbound Load Balancer connections.

- **Solution R7.** Figure 7b shows the *Inbound* element of the Security Group for EC2 Instances. The *Protocol* property

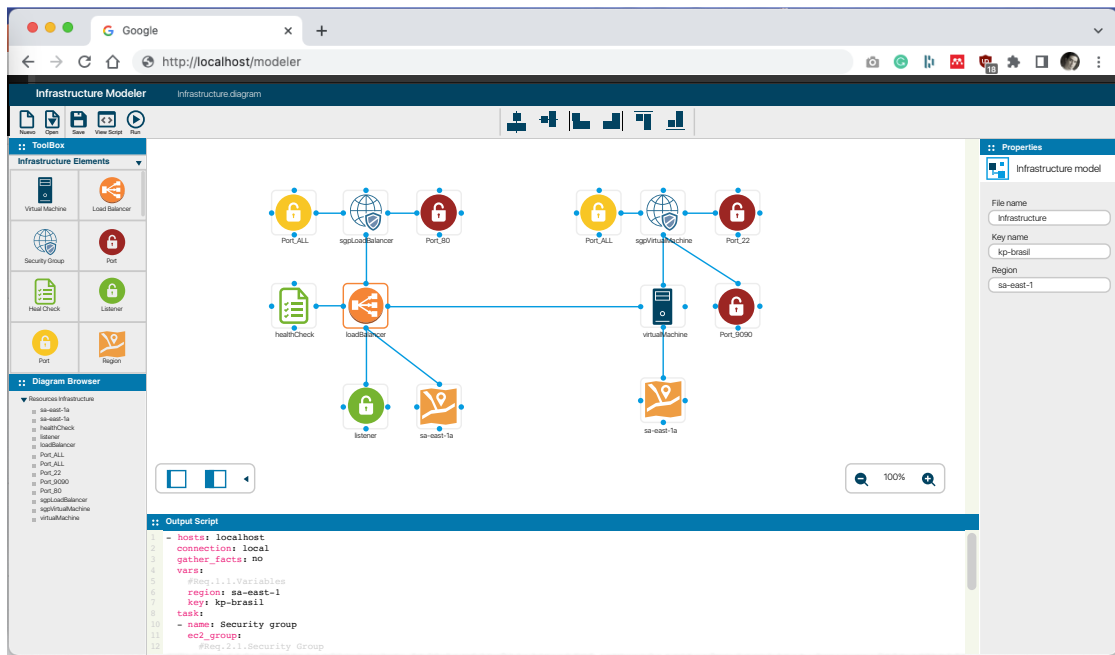


Figure 6. Infrastructure Diagram for Amazon Web Services

**a**

**:: Properties**

Virtual Machine

Name:

Group:

Image:

Instance type:

Count:

**b**

**:: Properties**

Port (Inbound)

Name:

From port:

To port:

Cidr Ip:

Protocol:

**c**

**:: Properties**

Port (Outbound)

Name:

From port:

To port:

Cidr Ip:

Protocol:

**d**

**:: Properties**

Zone

Name:

Figure 7. Virtual Machines elements

**a**

**:: Properties**

Load balancer

Name:

Group:

Machines:

**b**

**:: Properties**

Listener

Name:

Instance port:

Load balancer port:

Protocol:

**c**

**:: Properties**

HealthCheck

Name:

Healthy threshold:

Interval:

Ping port:

Ping protocol:

Response timeout:

Unhealthy threshold:

**d**

**:: Properties**

Port (Inbound)

Name:

From port:

To port:

Cidr Ip:

Protocol:

Figure 8. Load Balancer elements

has the **TCP** option selected, and the properties *From port* and *To port* have the number **9090** to enable all inbound TCP connections to the Apache server to be made through port 9090. Another Inbound element has the Protocol property with the TCP option selected, the properties *From port* and *To port* have the number **22** to enable SSH connections to EC2 Instances through port 22. Finally, Figure 7c shows the *Outbound* element where the Protocol property has the **ALL** option selected to ensure that all outbound EC2 Instance connections are enabled.

#### 4.2 Cloud Infrastructure Provisioning

ARGON Cloud allows modeling the cloud infrastructure provisioning for AWS on an infrastructure model and then generating the script for a particular DevOps provisioning tool, such as Ansible, Terraform, etc. For instance, Figure 9 shows an excerpt from the Ansible script generated from the infrastructure model (see Figure 6).

The Ansible script (see Figure 9) presents the Infrastructure Diagram properties, such as *region* (line 6) and *key* (line 7), to be used to provision the infrastructure in the Brazil region of AWS. In the task section, the security group for the EC2 Instances (see requirement R7) defines the *region* (line 11) in which they will run, along with its *name* (line 12) and a *description* (line 13). The security group inbound rules enable EC2 Instances to use TCP *protocol* to connect (lines 15 and 19) through *Port* 9090 (lines 16 and 17) and *Port* 22 (lines 20 and 21). Furthermore, the EC2 Instances specify the *region* (line 29) in which they will run, *kp\_name* (line 30) is the key pair of access to the Brazil region, *instance\_type* (line 31) defines the hardware characteristics (e.g., 1 vCPU and 1GB RAM), *image* (line 32) is the AMI (Amazon Machine Image) code provides the information required to launch an instance, *exact\_count* (line 35) indicates how many instances will be launched, and *zone* (line 39) indicates availability zone in which to launch the virtual machines.

### 5. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

In this paper, we have presented ARGON Cloud as a Software-as-a-Service (SaaS) approach. We demonstrated the feasibility of migrating ARGON from a desktop environment to a shared cloud service and made available as a software product that represents a typical profile of a SaaS service. On the one hand, we explained how a domain-specific modeling language (i.e., ArgonML) was developed using JavaScript Frameworks, such as Ecore.js and mx-Graph. However, we used a Model-to-Text (M2T) transformation engine to generate IaC scripts. Further, we explained a REST web service to interchange data between ArgonML and the M2T transformation engine. Accordingly, we presented the practicability of ARGON Cloud, running an example through modeling infrastructure resources to Amazon Web Services (AWS) and then generating the corresponding Infrastructure as Code (IaC) script for the Ansible tool.

Our research achieves migration ARGON toward Cloud Computing to provide infrastructure modeling and script generation as a SaaS service. Nevertheless, there are limitations to the use of ARGON Cloud and how to improve its features. First, we need an

```

1 ---
2 - hosts: localhost
3   connection: local
4   gather_facts: no
5   vars:
6     region: sa-east-1
7     key: kp-brazil
8   task:
9     - name: Security Group sgpVirtualMachine
10      ec2_group:
11        region: sa-east-1
12        name: sgpVirtualMachine
13        description: Security Group sgpVirtualMachine
14        rules:
15          - proto: TCP
16            from_port: 9090
17            to_port: 9090
18            cidr_ip: 0.0.0.0/0
19          - proto: TCP
20            from_port: 22
21            to_port: 22
22            cidr_ip: 0.0.0.0/0
23        rules_egress:
24          - proto: all
25            cidr_ip: 0.0.0.0/0
26      register: sgpVirtualMachine
27     - name: EC2 Instances virtualMachine
28      ec2:
29        region: sa-east-1
30        key_name: kp-brazil
31        instance_type: t2.micro
32        image: ami-6d7t8ddee49d3b0f0
33        instance_tags:
34          Name: virtualMachine
35        exact_count: 5
36        count_tag:
37          Name: virtualMachine
38        group: sgpVirtualMachine
39        zone: sa-east-1a
40        wait: yes
41      register: virtualMachine

```

Figure 9. Excerpt from Ansible script

IaC tool like Ansible or Terraform to execute the cloud infrastructure provisioning. Currently, ARGON Cloud allows modeling infrastructure resources and generates the corresponding IaC scripts. However, ARGON Cloud must integrate IaC tools and connections to several providers to provide seamless infrastructure provisioning to a particular provider. Second, ARGON Cloud does not simultaneously support the infrastructure modeling for multi-cloud providers. This might be a feature to improve because, as far as we know, no tool allows modeling multi-cloud infrastructure resources. Third, ARGON Cloud does not calculate the cost of provisioning infrastructure resources modeled. This feature is implemented for cloud providers like Amazon Web Services with AWS Pricing Calculator services. In this scenario, developing a pricing calculator in ARGON Cloud could help practitioners understand the cost of infrastructure modeled for a particular cloud provider. The challenge is to know the cost of each infrastructure resource of each cloud provider. Finally, ARGON Cloud works in an isolated fashion, which means it needs to be integrated with software development tools to achieve a holistic DevOps lifecycle. In future work, we want to extend the ARGON Cloud features, as mentioned afore, such as i) integrating IaC tools to achieve our tool orchestrate de infrastructure provisioning; ii) modeling infrastructure resources for multi-cloud; iii) developing a pricing calculator of infrastructure resources to obtain the price of cloud infrastructure modeled; and iv) integrating software development tools to achieve a full DevOps lifecycle. We also plan to run exper-

iments with practitioners and students with experience in software development and, in particular, with knowledge of cloud computing.

### ACKNOWLEDGMENTS

This research work was supported by the Escuela Politécnica Nacional (Ecuador) under **PII-DICC-2021-01** and **PII-DICC-2021-02** projects.

### REFERENCES

- Brambilla, Marco, Jordi Cabot, and Manuel Wimmer (2017). *Model-Driven Software Engineering in Practice*. 2nd. Morgan and Claypool Publishers. ISBN: 9781627057080.
- Brikman, Yevgeniy (2019). *Terraform: Up and Running*. O'Reilly Media, Inc., p. 368. ISBN: 9781492046905.
- Buyya, Rajkumar, James Broberg, and Andrzej Goscinski (Jan. 2011). *Cloud Computing: Principles and Paradigms*. John Wiley and Sons. ISBN: 9780470887998.
- Casola, Valentina et al. (Aug. 2017). «MUSA deployer: Deployment of Multi-cloud Applications». In: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 107–112. ISBN: 9781538617588. DOI: <https://doi.org/10.1109/WETICE.2017.46>.
- Chen, Wei et al. (Aug. 2016). «MORE: A model-driven operation service for cloud-based IT systems». In: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 633–640. ISBN: 9781509026289. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCC.2016.88>.
- Chiari, Michele et al. (2022). «Developing a New DevOps Modelling Language to Support the Creation of Infrastructure as Code». In: *Communications in Computer and Information Science* 1617 CCIS, pp. 88–93. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-23298-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23298-5_8).
- Farley, Dave and Jez Humble (2010). *Continuous Delivery: Reliable Software Releases through Build, Test, and Deployment Automation*. Addison-Wesley Professional, p. 300. ISBN: 9780321670250.
- Ferry, Nicolas et al. (Jan. 2018). «CloudMF: Model-Driven Management of Multi-Cloud Applications». In: *ACM Transactions on Internet Technology (TOIT)* 18 (2). DOI: <https://doi.org/10.1145/3125621>. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3125621>.
- Guerriero, Michele et al. (2019). «Adoption, Support, and Challenges of Infrastructure-as-Code: Insights from Industry». In: pp. 580–589. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSME.2019.00092>.
- Kartheeyayini, V. et al. (2022). «AWS cloud computing platforms deployment of landing zone - Infrastructure as a code». In: vol. 2393. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0079757>.
- López-Viana, Ramón, Jessica Díaz, and Jorge E. Pérez (2022). «Continuous Deployment in IoT Edge Computing: A GitOps implementation». In: *2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.23919/CISTI54924.2022.9820108>.
- Miñón, Raúl et al. (2022). «Pangea: An MLOps Tool for Automatically Generating Infrastructure and Deploying Analytic Pipelines in Edge, Fog and Cloud Layers». In: *Sensors* 22(12). DOI: <https://doi.org/10.3390/s22124425>.
- Morris, Kief (2016). *Infrastructure as Code: Managing Servers in the Cloud*. O'Reilly Media, Inc. ISBN: 9781491924358.
- Neharika, Keerthi and Ruth G. Lennon (2023). «Investigations into Secure IaC Practices». In: *Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology*. Ed. by Xin-She Yang et al. Springer Nature Singapore: Singapore, pp. 289–303. ISBN: 978-981-19-1610-6. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1610-6\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1610-6_25).
- Nitto, Elisabetta Di et al. (2017). *Model-Driven Development and Operation of Multi-Cloud Applications*. Ed. by Elisabetta Di Nitto et al. 1st. Springer Cham. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46031-4>.
- Palma, Stefano Dalla, Dario Di Nucci, and Damian Tamburri (2022). «Defuse: A Data Annotator and Model Builder for Software Defect Prediction». In: *2022 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME)*, pp. 479–483. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSME55016.2022.00063>.
- Rossini, Alessandro (2015). «Cloud Application Modelling and Execution Language (CAMEL) and the PaaS Workflow». In: *Advances in Service-Oriented and Cloud Computing — Workshops of ESOC 2015, Taormina, Italy*. ISBN: 978-3-319-33312-0. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-33313-7>.
- Sandobalín, Julio, Emilio Insfran, and Silvia Abrahao (2017a). «An Infrastructure Modelling Tool for Cloud Provisioning». In: *Proceedings of the IEEE 14th International Conference on Services Computing, SCC 2017*. ISBN: 9781538620052. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCC.2017.52>.
- Sandobalín, Julio, Emilio Insfran, and Silvia Abrahao (2017b). «End-to-end automation in cloud infrastructure provisioning». In: *Proceedings of the 26th International Conference on Information Systems Development, ISD 2017*. ISBN: 9789963228836. URL: <http://aisel.aisnet.org/isd2014/proceedings2017/ISDMethodologies/5>.
- Sandobalín, Julio, Emilio Insfran, and Silvia Abrahao (2018). «An infrastructure modeling approach for multi-cloud provisioning». In: *Proceedings of the 27th International Conference on Information Systems Development: Designing Digitalization, ISD 2018*. ISBN: 978-91-7753-876-9. URL: <http://aisel.aisnet.org/isd2014/proceedings2018/ISDMethodologies/2>.
- Sandobalín, Julio, Emilio Insfran, and Silvia Abrahao (2020). «On the effectiveness of tools to support infrastructure as code: Model-driven versus code-centric». In: *IEEE Access* 8. ISSN: 21693536. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2966597>.
- Solayman, Haleema Essa and Rawaa Putros Qasha (2023). «Seamless Integration of DevOps Tools for Provisioning Automation of the IoT Application on Multi-Infrastructures». In: *2023 3rd International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques (ICCT)*, pp. 1–7. DOI:

<https://doi.org/10.1109/ICCT56969.2023.10075814>.

Steinberg, David et al. (2009). *EMF: Eclipse Modeling Framework*. 2nd. Addison-Wesley Professional. ISBN: 0321331885.

Zhou, Huan et al. (2019). «CloudsStorm: A framework for seamlessly programming and controlling virtual infrastructure functions during the DevOps lifecycle of cloud applications». In: *Software - Practice and Experience* 49(10), pp. 1421–1447. DOI: <https://doi.org/10.1002/spe.2741>.

## BIOGRAPHIES



**Julio Sandobalín**, is Professor at Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. He received his Ph.D. in Computer Science and Master in Software Engineering from Universitat Politècnica de València, Spain. His research areas of interest are Model-Driven Engineering, Requirement Engineering, Empirical Software Engineering, DevOps, and Agile. Currently,

his research focuses on the continuous delivery of cloud resources based on Model-Driven Engineering and DevOps



**Carlos Iñiguez-Jarrín**, is Professor in informatics at Escuela Politécnica Nacional (EPN), Ecuador. He has a Ph.D. in Computer Science from Universitat Politècnica de València (Spain), where he was a member of the Genomic Group at PROS Research Center. He holds a Master's Degree in Web Engineering from Universidad Politécnica de Madrid (Spain). He is currently involved in

user experience design and interaction design.



# Assessment of Parameters of the Generalized Extreme Value Distribution in Rainfall of the Peruvian North

Arriola, Guillermo<sup>1,\*</sup> ; Villegas, Luis<sup>1</sup> ; Fernandez, Joseph<sup>1</sup> ; Vallejos, Jheny<sup>1</sup> ; Idrogo, Cesar<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Señor de Sipán, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Pimentel, Perú

**Abstract:** The maximum rainfall in the Peruvian north behaves seasonally, concentrating between the first months of the year, however, few studies have analyzed its distribution over time through an analysis of extremes. The objective of the research was to evaluate the parameters of location, scale and shape of the generalized extreme value distribution in maximum rainfall in the Peruvian north corresponding to the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions. The maximum daily rainfall data available was collected in the climatic stations of both regions, considering a minimum number of 15 years of records per station and a filter based on statistical and visual analysis, for which 138 stations were established. Subsequently, the adjustments were applied to ordinary moments and to linear moments of the generalized extreme value distribution and two types of hypothesis tests were used for each region that helped to validate the similarities of each parameter in both regions. The results show significant differences only in the location parameter, while, when contrasting the altitude, average rainfall and maximum rainfall of each hydrological region it was determined that there are high correlations with the location and scale parameters. Finally, it is concluded that both hydrological regions, the scale and shape parameters show a good performance for both adjustments based on the applied hypotheses and the location parameter showed that the Pacific 6 hydrological region is rainier than the Pacific 5 hydrological region.

**Keywords:** Altitude; ordinary moments; linear moments; the Peruvian north; rainfall

## Evaluación de Parámetros de la Distribución Generalizada de Valor Extremo en Precipitaciones del Norte Peruano

**Resumen:** Las precipitaciones máximas del norte peruano se comportan de una manera estacional, concentrándose entre los primeros meses del año, sin embargo, pocos estudios han analizado su distribución a lo largo del tiempo mediante un análisis de extremos. El objetivo de la investigación fue evaluar los parámetros de ubicación, escala y forma de la distribución generalizada de valor extremo en precipitaciones máximas del norte peruano correspondientes a las regiones hidrológicas Pacífico 5 y Pacífico 6. Se realizó la recolección de datos de precipitaciones máximas diarias disponibles en las estaciones climáticas de ambas regiones, considerando una cantidad mínima de 15 años de registros por estación y un filtro basado en el análisis estadístico y visual, por lo que se estableció 138 estaciones. Posteriormente se aplicaron los ajustes a momentos ordinarios y a momentos lineales de la distribución generalizada de valor extremo y se utilizó dos tipos de prueba de hipótesis para cada región que ayudaron a validar las similitudes de cada parámetro en ambas regiones. Los resultados muestran diferencias significativas sólo en el parámetro de ubicación, en tanto, al contrastar la altitud, precipitación media y precipitación máxima de cada región hidrológica se determinó que existen altas correlaciones con los parámetros de ubicación y escala. Finalmente, se concluye en que ambas regiones hidrológicas los parámetros de escala y forma muestran un buen desempeño para ambos ajustes a partir de las hipótesis aplicadas y el parámetro de ubicación demostró que la región hidrológica Pacífico 6 es más lluviosa que la región hidrológica Pacífico 5.

**Palabras clave:** Altitud; momentos ordinarios; momentos lineales; norte peruano; precipitación

### 1. INTRODUCTION

Worldwide, the study of rainfall has been widely addressed over the years, since its analysis has allowed us to know the rainfall seasonality of different geographical areas and, on the

other hand, rain as it is a very important component in hydrological studies and drainage, has managed to form part of the determination of the water resource for the different uses and requirements (Campos-Aranda, 2018). However, the current trends associated with climate change and water

\*garriola@crece.uss.edu.pe

Recibido: 27/02/2023

Aceptado: 04/08/2023

Publicado en línea: 14/11/2023

10.33333/rp.vol52n2.10

CC 4.0

resources management suggest that there must be a careful evaluation of the quality of the rainfall information, as well as the comparison of probabilities and extremes for different return periods (Vivekanandan, 2018).

One of the main applications that rainfall has had from the analysis of maximum frequencies are the so-called intensity, duration, and frequency (IDF) curves or storm curves (Peleg et al., 2018); that by means of various stochastic and multiple correlation methods, it is possible to generate prediction equations for the maximum intensity for a certain duration and different return periods (López et al., 2018). Nevertheless, it is necessary to previously know the behavior of the statistical parameters of said rainfall frequencies for a certain distribution of best fit, especially if the approach is developed on a larger scale, for example in the implementation of hydrological models of hydrographic basins (Halim, 2019; Juma et al., 2021).

Current research indicates that of all the existing distributions for the evaluation of extremes, the one that has shown the best statistical response capacity of its parameters from a record of maximum rainfall, is the generalized extreme value distribution (GEVD) (Campos-Aranda, 2019; Alahmadi & Rahman, 2020; Seo et al., 2021). In addition, as Mashishi et al. (2020) and Klassou & Komi (2021) refer the GEVD can achieve a good adjustment to extreme rainfall for return periods of up to 100 years; including for maximum annual rainfall at daily, subdaily and short duration time scales (Yeo et al., 2021; Ulrich et al., 2021). Another case studied, such as the flow variable, has also shown very good results with the GEVD (Roslan et al., 2020; Campos-Aranda, 2021); reaching a return period of 150 years (Samantaray y Sahoo, 2020).

An extreme event is related to the tails of the probability distribution of the observed values (Guillén-Oviedo et al., 2020), and can be applied to any variable that involves an evaluation of the maximum values within a data set (Flores-Rojas et al., 2021). In this context, the current trend of its use has commonly been extended to climatic variables, whose records can come from conventional climatic, pluviometric or pluviographic stations and even from satellite data (Diriba & Debusho, 2021).

Likewise, if we refer to the application in rainfall, it is mentioned that the maximum rainfall events are important to investigate, since their evaluation allows determining the dangers related to intense and extreme weather (Diriba & Debusho, 2021). For this reason, the interest arises in studying this climatic variable and in somehow associating its maximum values with the GEVD parameters, including the possibility of predicting extreme events during the seasonal rain cycle (Alfaro et al., 2018).

The GEVD is traditionally applied to estimate extreme events and their return period, and within the equation there are three parameters (location, scale and shape) that must be determined to be subsequently applied to some hydroclimatic variable (Hossain et al., 2021). With respect to the location, scale and shape parameters of the GEVD, Guillén-Oviedo et al. (2020) demonstrated that through these estimators, significant

differences can be established that help to know the rainfall behavior of Central America, however there is some uncertainty about the validation of the results, well, as Wang & Xuan (2022) affirm in their applied research in England, they determined a series of linear correlations through these three parameters in relation to altitude, thus managing to adequately explain the variability of extreme rainfall.

In Peru, the most recent study that deals with maximum rainfall is the one prepared by SENAMHI (2017a) which mentions that through a process of frequency analysis and an adjustment of five extreme distributions, highlighting among them the GEVD, ten regions of maximum rainfall can be delimited, but it was not possible to compare these results on the parameters of each distribution.

Other investigations such as those of Rollenbeck et al. (2021), Rollenbeck et al. (2022) and, Vavrus et al. (2022) also analyzed the maximum rainfall in Peru, specifically in the northern zone of Peruvian Pacific, but without reaching the contrast of any extreme value distribution with their respective parameters and the quantification of extreme events for different return periods.

Due to the above, there is a need to know the parameters of the GEVD in rainfall of Peru and with greater scope in the northern zone, since as indicated by SENAMHI (2017b) the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions of Peruvian northwest, they are the ones that are the most prone to extreme storm events, which are mainly influenced by the altitude and seasonality of rainfall (Oruc, 2021; Arriola et al., 2022; Fernandez-Palomino et al., 2022).

The application of the GEVD with respect to other distributions in the present investigation is justified because said distribution is the one that presents the most adequate adjustments and optimal statistical performances for the analysis of maximum rainfall extremes and their corresponding return periods, especially for rainy and seasonal periods, as indicated by research by Campos-Aranda (2018), Min & Halim (2020), Hossain et al. (2021), Mohamed & Adam (2022) and Abreu et al. (2023). Likewise, its location, scale, and shape parameters are better related to the climatic variables altitude and average rainfall, compared to other indicators of other distributions, which later helps to differentiate areas of greater or lesser rainfall, as well as its intensity, these results are in agreement with the findings of Campos-Aranda (2019) for Mexico, Guillén-Oviedo et al. (2020) for Costa Rica, Mashishi et al. (2020) for South Africa, Back & Bonfante (2021) for Brazil, Klassou & Komi (2021) for West Africa, Wang & Xuan (2021) for England and Australia, and Ulrich et al. (2021) for Germany.

As noted, the application of the GEVD as indicated by the various investigations cited above related to the topic presented, is valid for the analysis of extremes in rainfall and for the prediction of maximum events in various return periods, also due to its ease of study makes its use very practical and valid in the evaluation of maximum rainfall, in this case in Peruvian north, compared to other more complex distributions that require specialized software.



For these reasons, the objective of this research was to evaluate the parameters of location, scale, and shape of the generalized extreme value distribution in maximum rainfall in Peruvian north corresponding to the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Study area

The Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions are located in Peruvian north (Figure 1), also these zones are part of the six hydrological regions of the Pacific of Peru. The SENAMHI

(2017b) indicates that in the Pacific 5 hydrological region there are a total of 17 basins totaling an area of 31700.32 km<sup>2</sup>, while in the Pacific 6 hydrological region there are a total of 18 basins totaling an area of 42304.87 km<sup>2</sup>.

Regarding altitude (Figure 2a), average rainfall (Figure 2b) and maximum rainfall (Figure 2c), they are variable in both hydrological regions, since the Pacific 5 region presents areas with higher altitudes than the Pacific 6 region, also the pattern of rainfall is different, since in the Pacific 6 region the average rainfall reaches 450 mm and the maximum rainfall up to 1200 mm, while for the Pacific 5 region the average rainfall fluctuates up to 90 mm and the maximum ranges up to 360 mm.

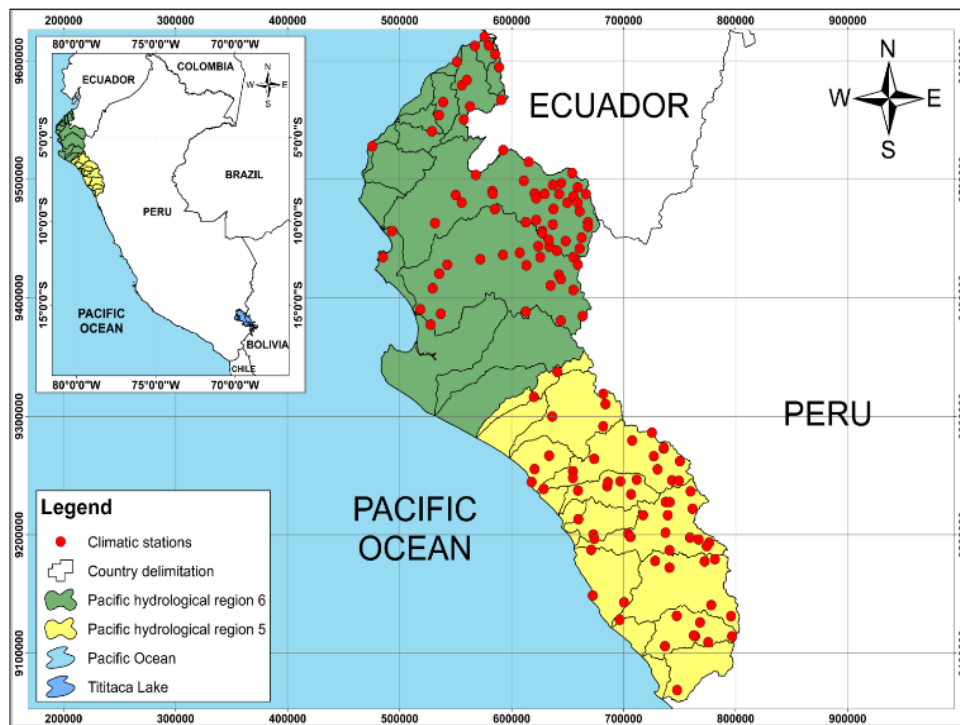


Figure 1. Ubication of the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions of Peruvian north

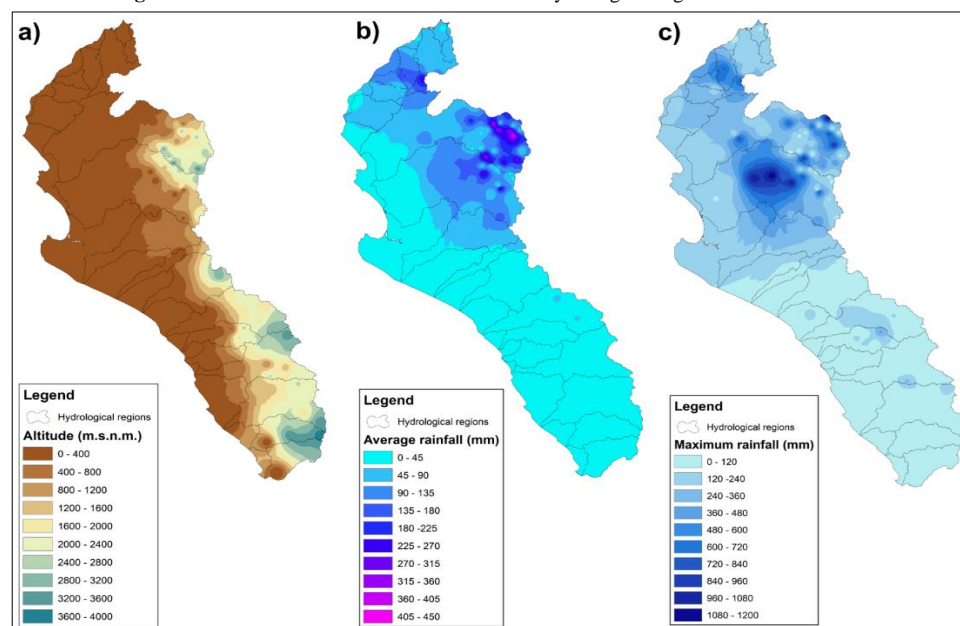


Figure 2. a) Altitude, b) average rainfall and c) maximum rainfall of the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions of Peruvian north

## 2.2 Methodology

The type of research was applied and quantitative approach. The population corresponded to a total of 138 climatic stations in the Peruvian north, of which 63 stations belong to the Pacific 5 hydrological region and 75 stations belong to the Pacific 6 hydrological region. The sources of data collection were obtained from the open access electronic portal of the ANA (Autoridad Nacional del Agua) from Peru, which is available for any consultation.

The data collection instruments used were the formats of records of maximum daily rainfall with date ranges from January of the year 1942 to December of the year 2020, however this was variable since there are stations with few data, so it was opted to consider a minimum of 15 years of complete records for each station as recommended by SENAMHI (2018) for studies in the hydrological regions of the Peruvian Pacific, using this criterion as a protocol in the collection and selection of rainfall information, for consequently, the statistical analysis involved a quality control of the data to determine possible erroneous values that could result from some operational, systematic or observation problem (Luna-Romero et al., 2018). Due to the above, a graphical analysis was applied to identify outliers, box diagrams being very common at 95% probability, excluding months that differed by more than three standard deviations from the monthly average of the respective season (Lavado et al., 2013); and complementary to this, the Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test was evaluated at each climatic station for the adjustment to the GEVD, fulfilling satisfactorily in all cases.

For the analysis of extremes, it began with the application of the GEVD function, which is shown in Equation 1:

$$f(x, \xi, \theta, \gamma) = \left(\frac{1}{\theta}\right) * \exp \left[ - \left( 1 + \gamma * \left( \frac{x - \xi}{\theta} \right) \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \right] * \left( 1 + \gamma * \left( \frac{x - \xi}{\theta} \right) \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (1)$$

Where,  $x$  is the variable to evaluate, being in this case the maximum rainfall,  $\xi$ ,  $\theta$ , and  $\gamma$  are the location, scale, and shape, parameters respectively of the GEVD. It should be noted that the function must always be with  $\gamma \neq 0$ ;  $\theta > 0$  and  $1 + \gamma \left( \frac{x - \xi}{\theta} \right) > 0$ , and that the shape and location parameters can take any real value (Guillén-Oviedo et al., 2020).

Continuing with the sequence of the investigation and with the purpose to achieving a greater scope and validation in the differences of the three parameters in each hydrological region, the adjustments to ordinary moments and to linear moments of the generalized extreme value distribution were applied to each record, which is included in the Hydrognomon program developed by Kozanis et al. (2010) and also because it is freely accessible software, it can be used in the different specialties of hydrology for statistical analysis (Arriola, 2021).

As previously mentioned, the estimation methods used in the present investigation to adjust the GEVD to the maximum daily rainfall of both hydrological regions were ordinary

moments and linear moments, which are based on the general theory of method of moments (Bowman & Shenton, 2014).

The Ordinary moments provide the location measure that relates to the arithmetic average, the variance measure that relates to the standard deviation, the coefficient of variation that relates the standard deviation to the arithmetic average, the skewness coefficient that relates to the bias and the measure of kurtosis related to the coefficient of kurtosis (Bowman & Shenton, 2014).

Regarding linear moments, Hosking (1990) developed the theory of linear moments, commonly known as L-moments, which is based on statistical ordering from the linear combination of data and using four linear moments, starting with the first linear moment that corresponds to the arithmetic average, then the second linear moment that is equivalent to the standard deviation, then the third linear moment is obtained from the product of the asymmetry coefficient with the second linear moment and finally, the fourth linear moment is determined by the product of the kurtosis coefficient with the second linear momentum.

In order to know the significant differences between the two hydrological regions, two types of hypotheses were contrasted, which were based on the bootstrap method and the t-test for two samples of equal variances.

The bootstrap method is a non-parametric technique that was established by Efron (1979) for the random resampling of an original data set and to develop subsets of data similar to the initial one, which are statistically in correspondence with the original series, since they are based on the main statistical estimators such as the average, the standard deviation, the coefficient of variation, the coefficient of bias and the correlation. This resampling technique has applications in various fields of science, among which hydrology and its different specialties stand out, so its use in the analysis of maximum rainfall extremes to compare significant differences in different areas is very efficient (Padiyedath-Gopalan et al., 2019; Guillén-Oviedo et al., 2020).

Regarding the t-test for two samples of equal variances, Lee & Kim (2023) point out that it is a test that assumes equality in the data of two samples, but in relation to the statistical value of the variance of said samples, since to test the equal means under independent normal samples, this test is the one that presents the best results, under the criterion that there is a similarity of the analyzed variable, being in the case of the present investigation a very practical application, because the two hydrological regions evaluated, present similar conditions both in the amount of data on maximum daily rainfall, in the number of weather stations and their location in Peruvian northwest.

In addition, for these hypothesis tests, the criteria suggested by Guillén-Oviedo et al. (2020), which indicate a comparison through the expected values of the parameters of location (Equation 2 and Equation 3), scale (Equation 4 and Equation 5) and shape (Equation 6 and Equation 7).

$$\begin{aligned}
 H_{0-\xi}: \xi_5 &= \xi_6 & (2) \\
 H_{1-\xi}: \xi_5 &\neq \xi_6 & (3) \\
 H_{0-\theta}: \theta_5 &= \theta_6 & (4) \\
 H_{1-\theta}: \theta_5 &\neq \theta_6 & (5) \\
 H_{0-\gamma}: \gamma_5 &= \gamma_6 & (6) \\
 H_{1-\gamma}: \gamma_5 &\neq \gamma_6 & (7)
 \end{aligned}$$

Where  $H_{0-\xi}$ ,  $H_{0-\theta}$  and  $H_{0-\gamma}$  are the null hypothesis for location, scale and shape parameter,  $H_{1-\xi}$ ,  $H_{1-\theta}$  and  $H_{1-\gamma}$  are the alternate hypothesis for location, scale and shape parameter,  $\xi_5$  and  $\xi_6$  correspond to the expected value of the location parameter for the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions, respectively;  $\theta_5$  and  $\theta_6$  correspond to the expected value of the scale parameter for the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions, respectively;  $\gamma_5$  and  $\gamma_6$  correspond to the expected value of the shape parameter for the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions, respectively.

These criteria were carried out with the purpose of having a global balance of these estimators for each hydrological region, since there is no method of analysis of comparison of the three parameters one by one in each climatic station, in the same way, in each comparison of hypothesis, the GEVD parameters were established with the adjustments to ordinary moments and linear moments, which were estimated with the Hydrognomon program (Kozanis et al., 2010).

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 shows the results of the average values of the three GEVD parameters for both hydrological regions of the Peruvian north, both with the adjustment to ordinary moments and to linear moments.

**Table 1.** GEVD parameters with ordinary and linear moments of the two hydrological regions of Peruvian north

Hydrological region	Average values of the GEVD parameters					
	With adjustment to ordinary moments			With adjustment to linear moments		
	Location	Scale	Shape	Location	Scale	Shape
Pacific 5	11.304	1.651	0.144	8.944	1.928	0.278
Pacific 6	53.896	1.570	0.131	43.871	1.757	0.246

The location parameter obtained with both adjustments shows a direct relationship with the behavior of maximum rainfall in the two hydrological regions, since, as can be seen their values (Table 1), are higher compared to the other parameters, as this is supported in their respective investigations by Guillén-Oviedo et al. (2020), Lima et al. (2021), Wang & Xuan (2021) and Wang & Xuan (2022). In addition, the ranges of this parameter indicate that the Pacific 6 region has more rainfall than the Pacific 5 region, since the values of one region with respect to the other varied up to 5 times for the two settings.

Regarding the parameter of scale and shape, it was not possible to find a correspondence with the rainfall pattern, however, their values show similarities in each setting and in the two regions, so these findings could indicate the variability of rainfall in this part of Peru. In this sense, as mentioned by Guillén-Oviedo et al. (2020) and Wang & Xuan (2022) as there is seasonality in the analysis of rainfall in a geographic

area, the scale and shape parameters will assume a certain tendency to statistical dispersion with respect to extreme rainfall. Then, based on these results, the distribution maps of each GEVD parameter were generated with the adjustment to ordinary moments (Figure 3) and with the adjustment to linear moments (Figure 4), using the inverse distance weighted procedure, commonly known as IDW, that determines the values of each point without data, but at the same time, they are based on the records available in the climatic stations that do have values, being in this case the data of the location, scale, and shape parameters of the GEVD, as recommended by Adeola et al. (2021) and Arriola et al. (2022).

Regarding the spatial distribution of the GEVD parameters with ordinary moments (Figure 3) and with linear moments (Figure 4) for the study area, it can be observed that in terms of the location parameter. The smallest values are they mostly in the Pacific 5 hydrological region and the highest ranges are found in the Pacific 6 hydrological region, especially in the northwest of Peru, this effect is mainly due to the alteration of rainfall by the El Niño Phenomenon during the periods 1982-1983, 1997-1998 and the first months of 2017.

In relation to the scale parameter (Figure 3b and Figure 4b), it is shown that the smallest values are oriented towards the coast and the highest values tend to move away from this area. Regarding the shape parameter (Figure 3c and Figure 4c), it had a different pattern, that is, the low values move away from the coast and the high values tend to approach the Peruvian coast. From the foregoing, it can be inferred that in terms of these last two parameters of the GEVD, there is some variability of rainfall in this area, due to the behavior of extreme rainfall and altitude.

The results of the hypothesis tests applied to the hydrological regions are shown in Table 2, obtaining a significant difference between the two regions for the location parameter, since the null hypothesis was rejected, which is interpreted as a variation in the rainfall regime extreme between the two study areas. Null hypotheses were accepted for the scale and shape parameters. Subsequently, the correlations of the three parameters of the GEVD with respect to altitude, average rainfall and maximum rainfall of each hydrological region were made, applying ordinary moments (Figure 5), and linear moments (Figure 6).

**Table 2.** Hypothesis test for the three parameters of the GEVD based on the total number of climatic stations of both hydrological regions

GEVD parameter	Type of statistical adjustment				Type of validated hypothesis
	With ordinary moments		With linear moments		
	Bootstrap	T-test for two samples of equal variances	Bootstrap	T-test for two samples of equal variances	
Location	$5.3 \times 10^{-10}$	$1.4 \times 10^{-10}$	$3.4 \times 10^{-10}$	$1.1 \times 10^{-10}$	$H_{1-\xi}: \xi_5 \neq \xi_6$
Scale	0.975	0.647	0.803	0.277	$H_{0-\theta}: \theta_5 = \theta_6$
Shape	0.692	0.400	0.588	0.330	$H_{0-\gamma}: \gamma_5 = \gamma_6$

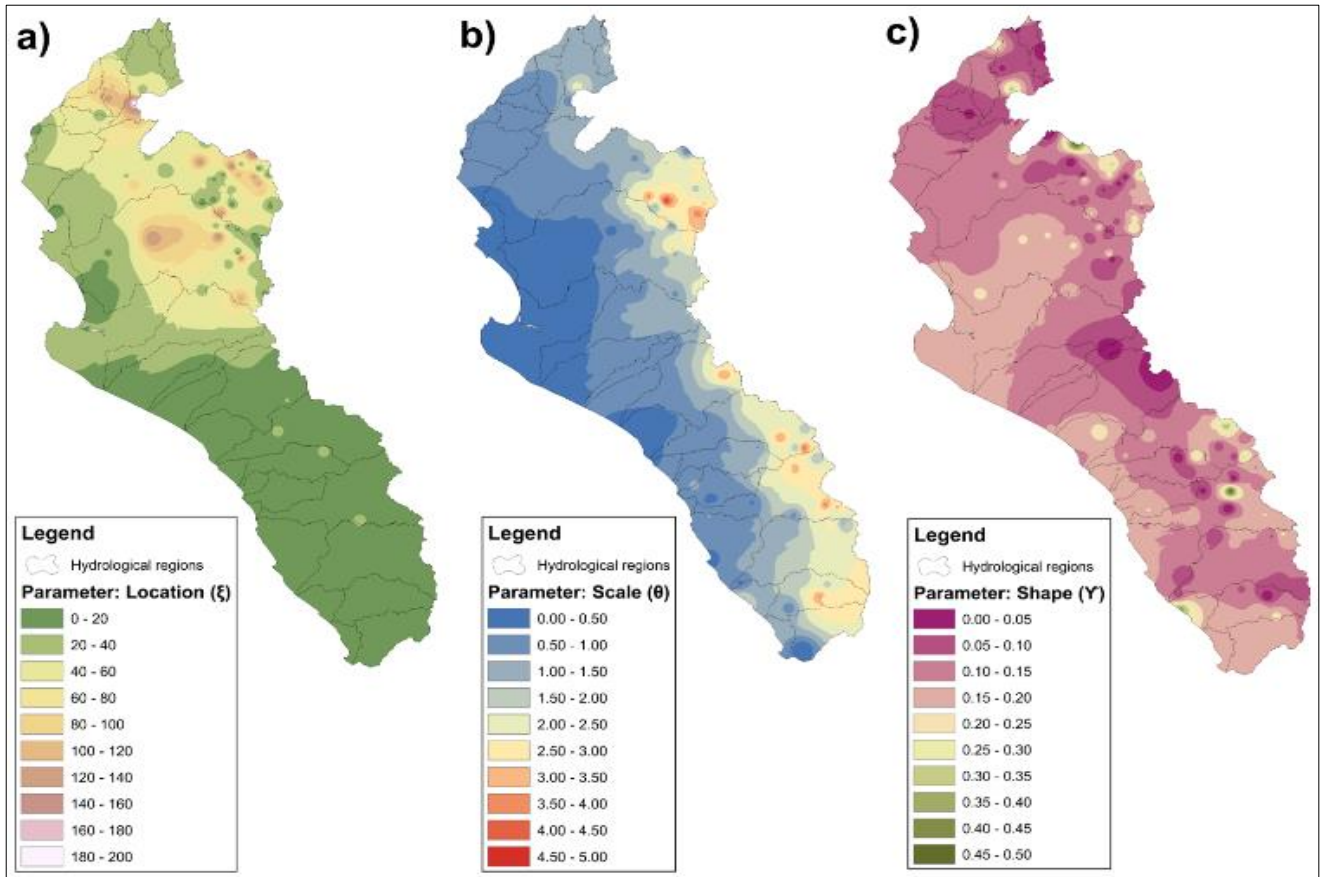


Figure 3. Spatial distribution of the parameters: a) location, b) scale and c) shape for the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions of Peruvian north with adjustment to ordinary moments

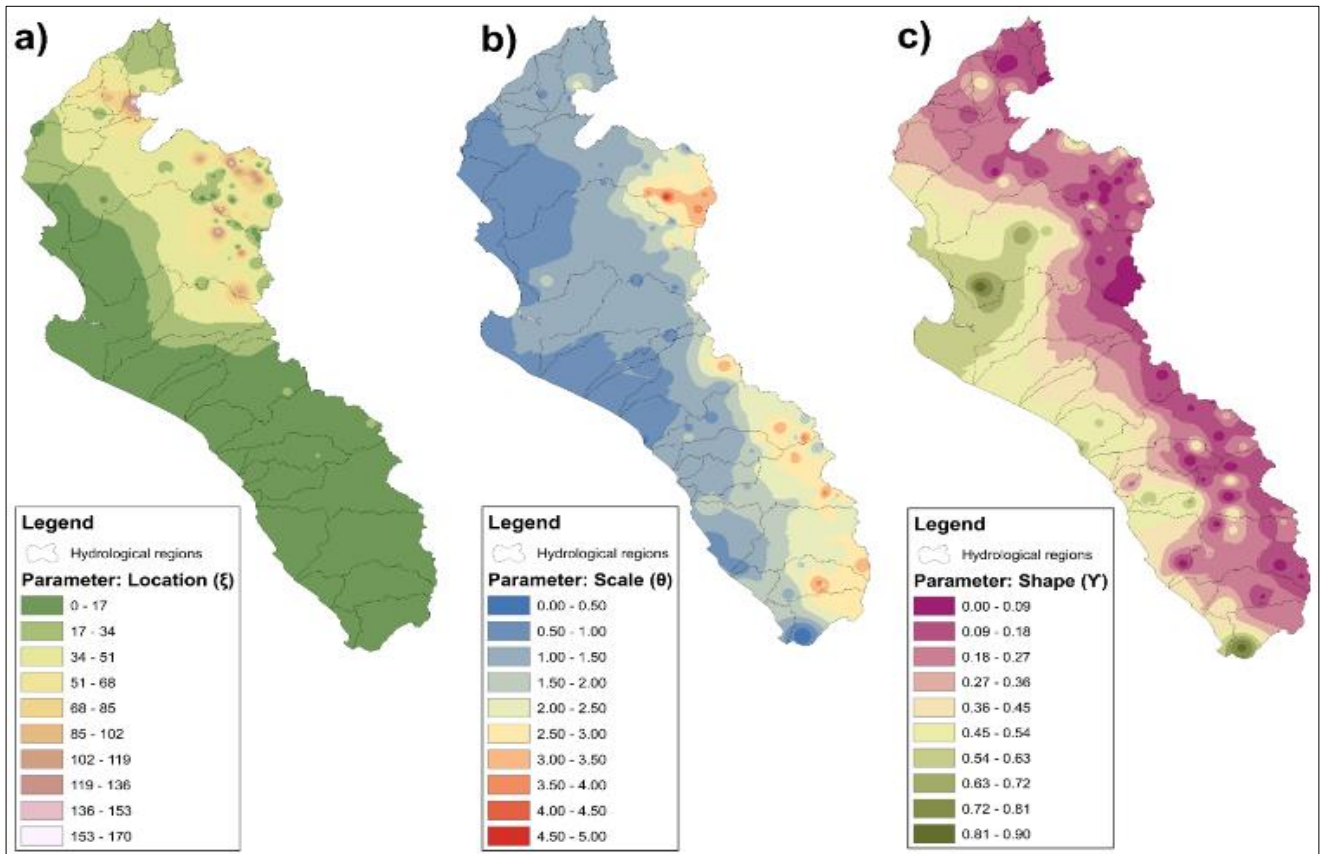


Figure 4. Spatial distribution of the parameters: a) location, b) scale and c) shape for the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions of Peruvian north with the adjustment to linear moments

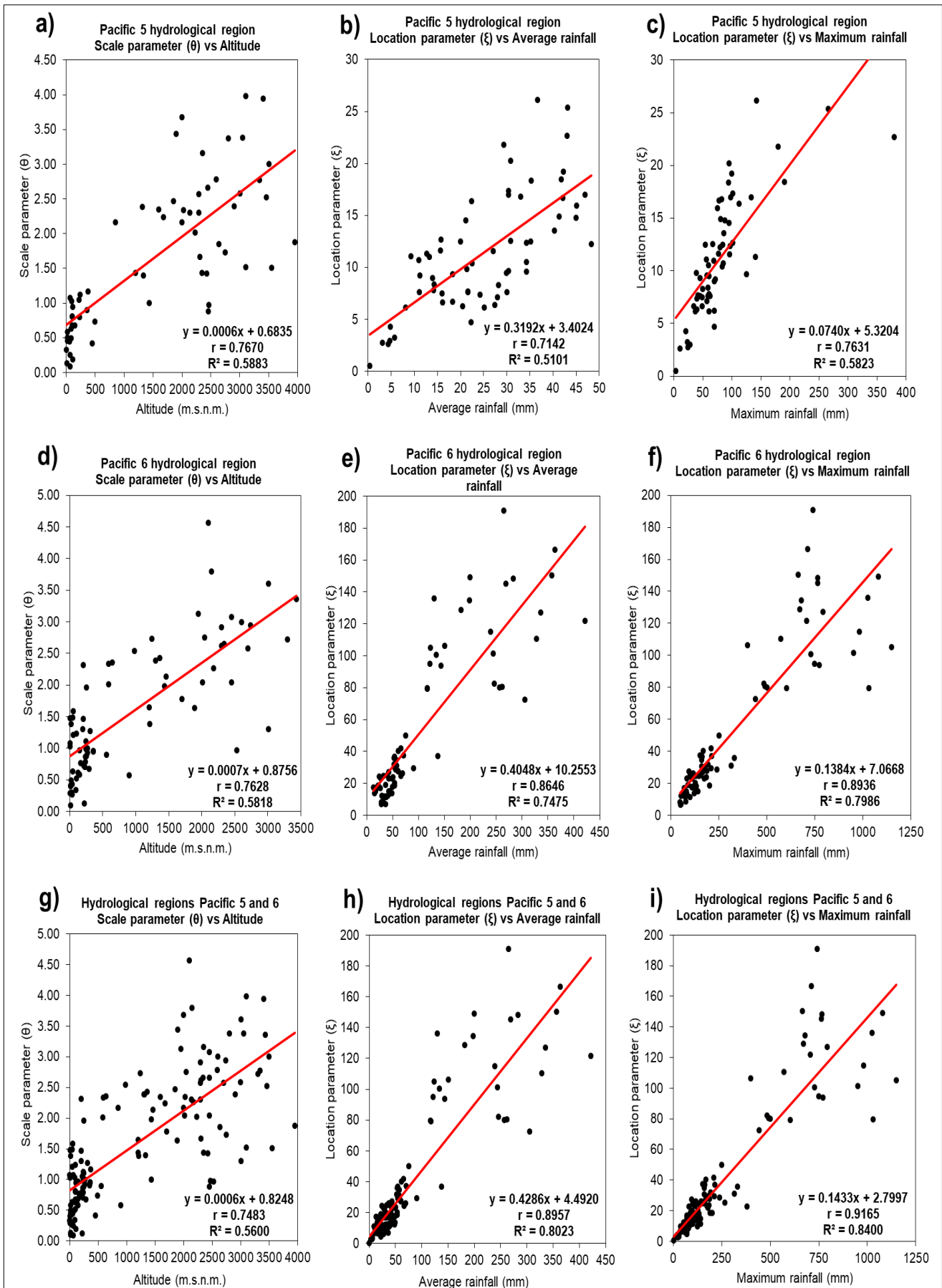


Figure 5. Correlations of the location, scale and shape parameters for the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions of Peruvian north with the adjustment to ordinary moments

These results show only the best correlations, that is, with  $r \geq 0.60$  (Herrera et al., 2017), given that in the other cases the correlations were very low and null, as happened with the shape parameter, since in none of the relationships was there a correspondence with any of these variables.

In the same way, with the adjustment of linear moments for the location parameter in the Pacific 5 hydrological region, regarding its correlation with the maximum rainfall (Figure 6i), it did not show correspondence ( $r = 0.4354$ ), while for the ordinary moments it was the opposite, since that  $r = 0.7631$  was determined (Figure 5c).

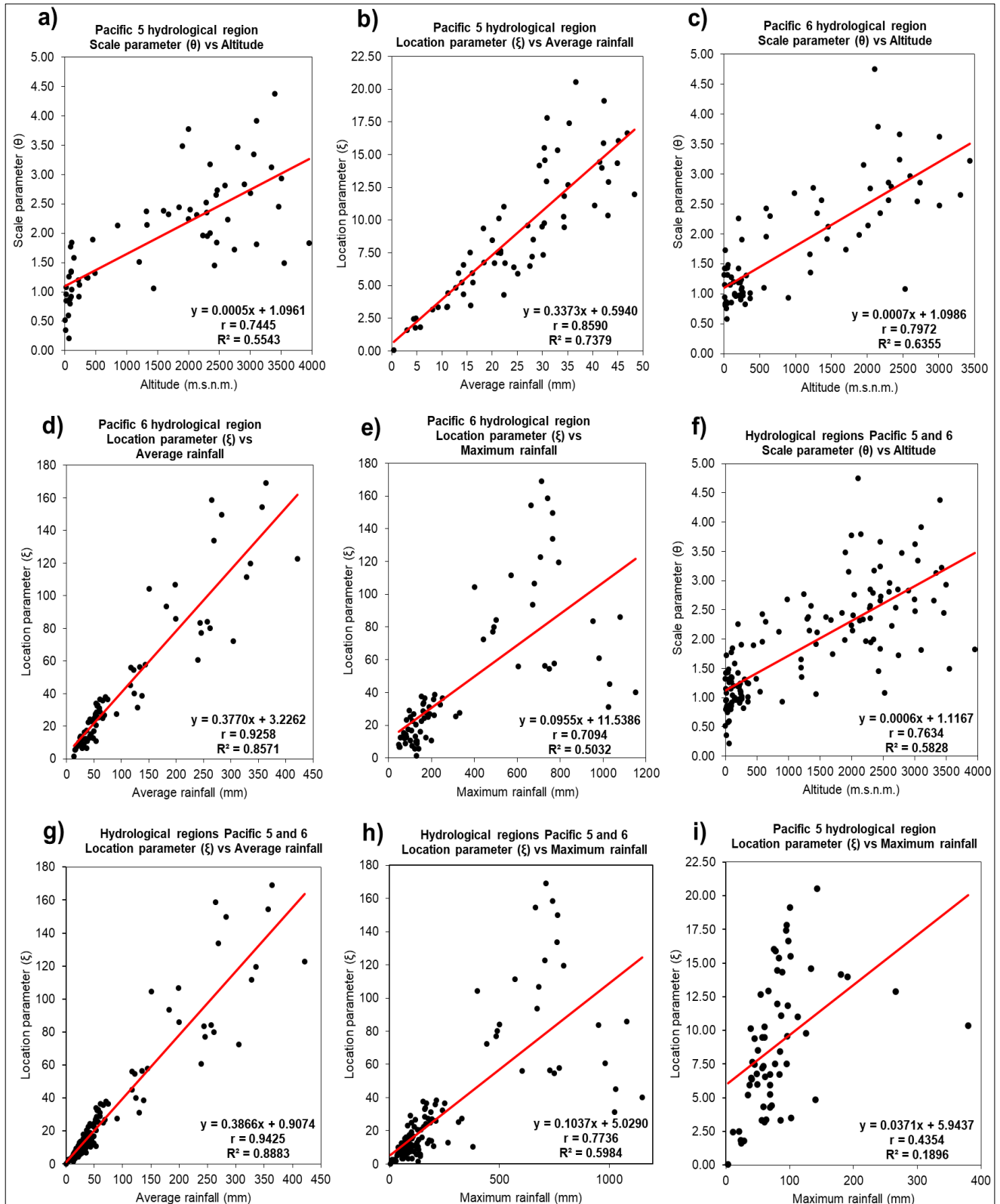


Figure 6. Correlations of the location, scale and shape parameters for the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions of Peruvian north with the adjustment to linear moments

For these reasons, when contrasting the altitude, average rainfall and maximum rainfall of each hydrological region and with the application of both adjustments with respect to each parameter of the GEVD, it was possible to determine that there are high correlations with the parameters of location and scale.

The case of the location parameter (Figure 5f) stands out, since it was obtained that the highest correlation was with the maximum rainfall in the Pacific 6 hydrological region ( $r = 0.8936$ ) and by joining both hydrological regions and then correlating them with the maximum rainfall an  $r = 0.9165$  was achieved (Figure 5i), in both cases it was with the adjustment to ordinary moments (Figure 5). While with the adjustment to linear moments (Figure 6d) the best correlation of the location parameter of the Pacific 6 hydrological region was obtained with respect to the average rainfall ( $r = 0.9258$ ) and the same happened when the two regions were combined to correlate them with the average rainfall, since its  $r = 0.9425$  (Figure 6g).

In this sense, and according to these results, the setting that best suits the study area is the GEVD with ordinary moments, since the best correlations of the location parameter with respect to maximum rainfall were achieved, as justified by Mohamed & Adam (2022), since they indicate that the GEVD is one of the distributions that best fits extreme rainfall events and for the subsequent determination of their magnitude and frequency, despite this Nerantzaki & Papalexiou (2022), together with Vivekanandan (2022) maintain that other adjustments should be examined, such as that of linear moments of the GEVD, for which reason the comparison of both adjustments in both hydrological regions in the present investigation is justified.

Lastly, and as a complementary part to the results obtained in this investigation, the maximum rainfall of hydrological regions 5 and 6 of Peruvian north were determined for various return periods, as shown in Figure 7, also using the inverse distance weighted procedure, commonly known as IDW.

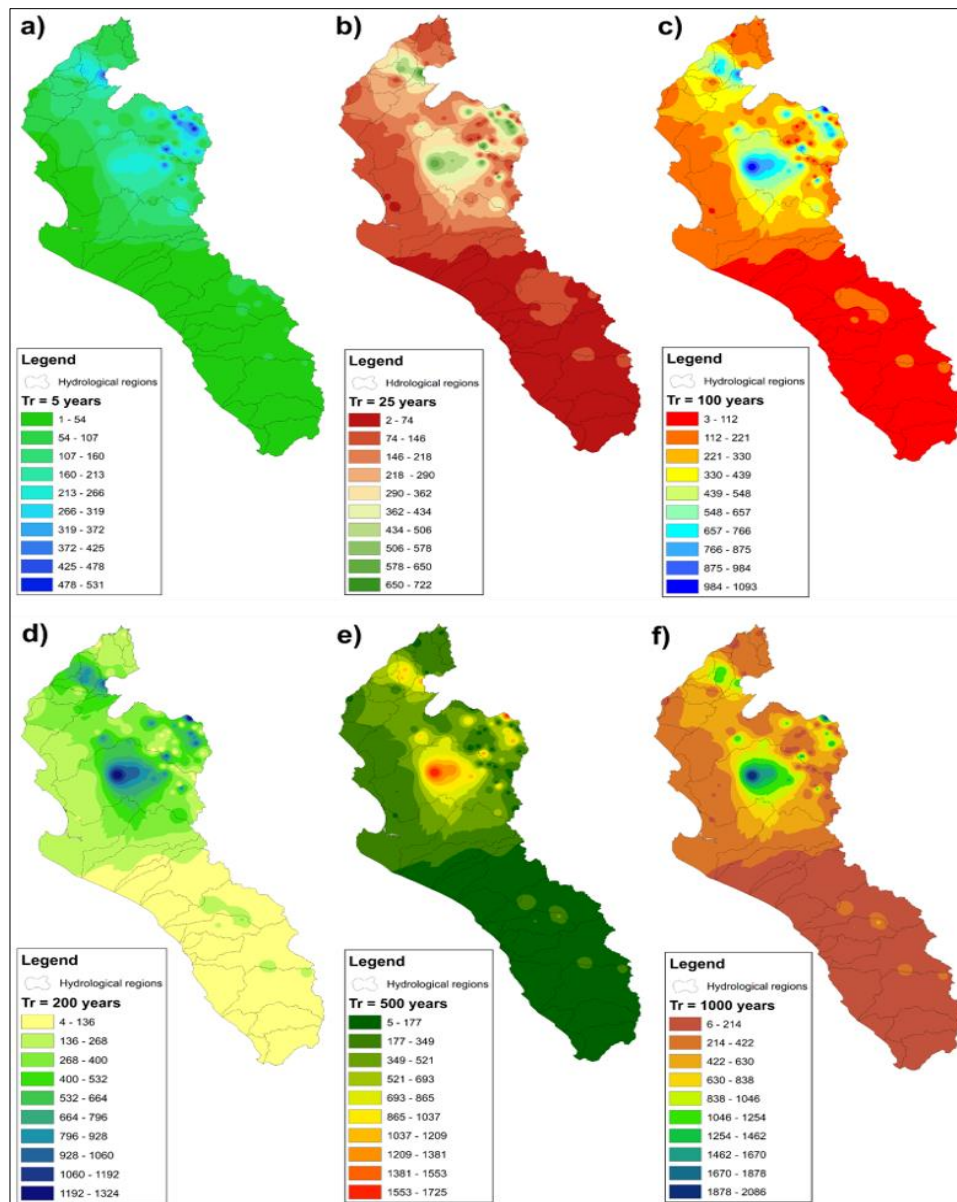


Figure 7. Maximum rainfall of hydrological regions 5 and 6 of Peruvian north for return periods of: a) 5 years; b) 25 years; c) 100 years; d) 200 years; e) 500 years and f) 1000 years

It should be noted that these rainfalls were estimated with the application of the GEVD through ordinary moments, since as the findings of this investigation indicate, this adjustment achieved the best correlation in terms of maximum rainfall in both hydrological regions.

As expected, the greatest accumulation of rainfall occurs in the Pacific 6 hydrological region than in the Pacific 5 hydrological region, for example, in Figure 7c for a return period of 100 years, in region 6 the rainfall reached exceed 1000 mm, while region 5 reached a maximum of 330 mm, this same behavior occurred with all return periods, which also corroborates the hypothesis obtained that the location parameter of both hydrological regions are different.

#### 4. CONCLUSIONS

There are few studies related to the determination of maximum rainfall in northern Peru, so this research contributes not only to the analysis of the GEVD, but also to the evaluation of the location, scale, and shape parameters in the Pacific 5 and Pacific 6 hydrological regions, as well as their distribution in this area of Peru, considering a total of 138 climatic stations with a minimum record of 15 years.

The scale and shape parameters of both hydrological regions show a good performance for the adjustment both with ordinary moments and with linear moments, which could be demonstrated by applying the respective hypotheses, since for these two parameters the null hypotheses were accepted, for what we know it can be inferred that in both hydrological regions there is variability in the rainfall pattern, however in terms of correlations with altitude, average and maximum rainfall, only the scale parameter was the one that presented the best performance with respect to these climatic variables.

The location parameter showed that the Pacific 6 hydrological region is rainier than the Pacific 5 hydrological region, since the average value of this parameter in region 5 was much lower than region 6; likewise, it is justified with the contrasting of the hypothesis, because the null hypothesis was rejected and according to the best correlations achieved with the maximum rainfall, they suggest that the adjustment of the GEVD with ordinary moments is adequate for both hydrological regions. However, it is recommended to study this type of adjustment in the other hydrological regions of the Pacific of Peru to help validate the findings achieved in this research.

#### REFERENCES

- Abreu, M., de Souza, A., Lyra, G., de Oliveira-Júnior, J., Pobocikova, I., de Almeida, L., de Souza, F., Aristone, F., & Cecílio, R. (2023). Assessment and characterization of the monthly probabilities of rainfall in Midwest Brazil using different goodness-of-fit tests as probability density functions selection criteria. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(1-2), 491-513. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04286-z>
- Adeola, O., Masinde, M., Botai, J., Adeola, A., & Botai, C. (2021). An analysis of precipitation extreme events based on the SPI and EDI values in the Free State province, South Africa. *Water (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/w13213058>
- Alahmadi, F., & Rahman, N. (2020). Climate change impacts on extreme rainfall frequency prediction. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 935-943. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.138>
- Back, Á., & Bonfante, F. (2021). Evaluation of generalized extreme value and Gumbel distributions for estimating maximum daily rainfall. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, 56(4), 654-664. <https://doi.org/10.5327/Z217694781015>
- Alfaro, E., Chourio, X., Muñoz, Á., & Mason, S. (2018). Improved seasonal prediction skill of rainfall for the primera season in Central America. *International Journal of Climatology*, 38, e255-e268. <http://doi.org/10.1002/joc.5366>
- Arriola, G. (2021). Uso del software libre como aporte al sílabo hidrología de la Universidad Señor de Sipán en tiempos de Covid-19. *Revista Hacedor*, 5(2), 10-18. <https://doi.org/10.26495/rch.v5i2.1923>
- Arriola, G., Villegas, L., Marín, N., Idrogo, C., Piedra, J., & Arbulú, J. (2022). Assessment of climatic aggressiveness and precipitation concentration in the Chancay-Lambayeque basin, Peru. *Revista Politécnica*, 50(2), 15-22. <https://doi.org/10.33333/rp.vol50n2.02>
- Bowman, K., & Shenton, L. (2014). Estimation: Method of moments. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat01679>
- Campos-Aranda, D. (2018). Fitting with mobile L moments of the GEV distribution with variable location and scale parameters. *Agrociencia*, 52(7), 933-950. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1714>
- Campos-Aranda, D. (2019). Fitting with L-moments of the non-stationary distributions GVE1 and GVE2 to PMD series. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(5), 75-103. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-03>
- Campos-Aranda, D. (2021). Flood frequency analysis with the GEV distribution for r-annual events. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(4), 163-218. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-04-04>
- Diriba, T., & Debusho, L. (2021). Statistical modeling of spatial extremes through max-stable process models: Application to extreme rainfall events in South Africa. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002123](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002123)
- Efron, B. (1979). Bootstrap methods: Another look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7(1), 1-26. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344552>
- Fernandez-Palomino, C., Hattermann, F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2022). A Novel high-resolution gridded precipitation dataset for Peruvian and Ecuadorian watersheds: Development and hydrological evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, 23(3), 309-336. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0285.1>



- Flores-Rojas, J., Silva, Y., Suárez-Salas, L., Estevan, R., Valdivia-Prado, J., Saavedra, M., Giraldez, L., Piñas-Laura, M., Scipión, D., Milla, M., Kumar, S., & Martínez-Castro, D. (2021). Article analysis of extreme meteorological events in the central andes of Peru using a set of specialized instruments. *Atmosphere*, *12*(3). <https://doi.org/10.3390/atmos12030408>
- Guillén-Oviedo, H., Cid-Serrano, L., & Alfaro-Martínez, E. (2020). Comparison of parameters of the generalized extreme value distribution associated with extreme rainfall events in Central America. *Uniciencia*, *34*(1), 111-128. <http://dx.doi.org/10.15359/ru.34-1.7>
- Halim, S. (2019). Delta change method with cyclic covariate generalized extreme value model for downscaling extreme rainfall. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, *8*(2S2), 158-161. <https://doi.org/10.35940/ijrte.B1029.0782S219>
- Herrera, C., Campos, J., & Carrillo, F. (2017). Estimación de datos faltantes de precipitación por el método de regresión lineal: Caso de estudio Cuenca Guadalupe, Baja California, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, *25*(71), 34-44. <https://doi.org/10.33064/iycuaa201771598>
- Hosking, J. (1990). L-Moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, *52*(1), 105-124. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x>
- Hossain, I., Khastagir, A., Aktar, M., Imteaz, M., Huda, D., & Rasel, H. (2021). Comparison of estimation techniques for generalised extreme value (GEV) distribution parameters: a case study with Tasmanian rainfall. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*(8), 7737-7750. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03693-5>
- Juma, B., Olang, L., Hassan, M., Chasia, S., Bukachi, V., Shiundu, P., & Mulligan, J. (2021). Analysis of rainfall extremes in the Ngong River Basin of Kenya: Towards integrated urban flood risk management. *Physics and Chemistry of the Earth*, *124*. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102929>
- Kozanis, S., Christofides, A., Mamassis, N., Efstratiadis, A., & Koutsoyiannis, D. (2010). Hydrognomon - Open source software for the analysis of hydrological data. *Conference: European Geosciences Union General Assembly 2010*, *12*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21350.83527>
- Klassou, K., & Komi, K. (2021). Analysis of extreme rainfall in Oti river basin (West Africa). *Journal of Water and Climate Change*, *12*(5), 1997-2009. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.154>
- Lavado, W., Labat, D., & Ronchail, J. (2013). Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965-2007). *Hydrological Processes*, *27*(20), 2944-2957. <https://doi.org/10.1002/hyp.9418>
- Lee, S., & Kim, H. (2023). Two tests using more assumptions but lower power. *Communications for Statistical Applications and Methods*, *30*(1), 109-117. <https://doi.org/10.29220/CSAM.2023.30.1.109>
- Lima, A., Lyra, G., Abreu, M., Oliveira-Júnior, J., Zeri, M., & Cunha-Zeri, G. (2021). Extreme rainfall events over Rio de Janeiro State, Brazil: Characterization using probability distribution functions and clustering analysis. *Atmospheric Research*, *247*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105221>
- López, J., Delgado, O., & Campo, M. (2018). Determinación de las curvas IDF en Igueldo-San Sebastián. Comparación de diferentes métodos. *Ingeniería del Agua*, *22*(4), 209-223. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.9480>
- Luna-Romero, A., Ramírez, I., Sánchez, C., Conde, J., Agurto, L., & Villaseñor, D. (2018). Distribución espacio-temporal de la precipitación en la cuenca del río Jubones, Ecuador: 1975-2013. *Scientia Agropecuaria*, *9*(1), 63-70. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.01.07>
- Mashishi, D., Maposa, D., & Lesaoana, M. (2020). Comparative analysis of the 100-year return level of the average monthly rainfall for South Africa: Parent distribution versus extreme value distributions. *Applied Mathematics and Information Sciences*, *14*(5), 801-807. <https://doi.org/10.18576/amis/140507>
- Min, J., & Halim, S. (2020). Rainfall modelling using generalized extreme value distribution with cyclic covariate. *Mathematics and Statistics*, *8*(6), 762-772. <https://doi.org/10.13189/ms.2020.080617>
- Mohamed, J., & Adam, M. (2022). Modeling of magnitude and frequency of extreme rainfall in Somalia. *Modeling Earth Systems and Environment*, *8*(3), 4277-4294. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01363-0>
- Nerantzaki, S., & Papalexioiu, S. (2022). Assessing extremes in hydroclimatology: A review on probabilistic methods. *Journal of Hydrology*, *605*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127302>
- Oruc, S. (2021). Non-stationary investigation of extreme rainfall. *Civil Engineering Journal (Iran)*, *7*(9), 1620-1633. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091748>
- Padiyedath-Gopalan, S., Kawamura, A., Amaguchi, H., Takasaki, T., & Azhikodan, G. (2019). A bootstrap approach for the parameter uncertainty of an urban-specific rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, *579*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124195>
- Peleg, N., Marra, F., Fatichi, S., Paschalis, A., Molnar, P., & Burlando, P. (2018). Spatial variability of extreme rainfall at radar subpixel scale. *Journal of Hydrology*, *556*, 922-933. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.033>
- Rollenbeck, R., Orellana-Alvear, J., Bendix, J., Rodriguez, R., Pucha-Cofrep, F., Guallpa, M., Fries, A., & Célleri, R. (2022). The Coastal El Niño event of 2017 in Ecuador and Peru: A weather radar analysis. *Remote Sensing*, *14*(4). <https://doi.org/10.3390/rs14040824>
- Rollenbeck, R., Orellana-Alvear, J., Rodriguez, R., Macalupu, S., & Nolasco, P. (2021). Calibration of X-band radar for extreme events in a spatially complex

- precipitation region in north peru: Machine learning vs. empirical approach. *Atmosphere*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/atmos12121561>
- Roslan, R., Na, C., & Gabda, D. (2020). Parameter estimations of the generalized extreme value distributions for small sample size. *Mathematics and Statistics*, 8(2), 47-51. <https://doi.org/10.13189/ms.2020.081308>
- Samantaray, S., & Sahoo, A. (2020). Estimation of flood frequency using statistical method: Mahanadi River basin, India. *H2Open Journal*, 3(1), 189-207. <https://doi.org/10.2166/h2oj.2020.004>
- Seo, J., Won, J., Choi, J., Lee, J., Jang, S., & Lee, O. (2021). Uncertainty of rate of change in Korean future rainfall extremes using non-stationary GEV model. *Atmosphere*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/atmos12020227>
- SENAMHI. (2017a). *Estudio: Regionalización de las precipitaciones máximas del Perú*. Lima, Perú: Dirección de Hidrología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/239>
- SENAMHI. (2017b). *Nota técnica N° 002: Atlas de erosión de suelos por regiones hidrológicas del Perú*. Lima, Perú: Dirección de Hidrología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/261>
- SENAMHI. (2018). *Estudio: Estimación de umbrales de inundación en la Región Hidrográfica del Pacífico*. Lima, Perú: Dirección de Hidrología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/241>
- Ulrich, J., Fauer, F., & Rust, H. (2021). Modeling seasonal variations of extreme rainfall on different timescales in Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(12), 6133-6149. <https://doi.org/10.5194/hess-25-6133-2021>
- Vavrus, S., Wang, F., & Block, P. (2022). Rainy season precipitation forecasts in coastal Peru from the North American multi-model ensemble. *International Journal of Climatology*, 42(12), 6221-6234. <https://doi.org/10.1002/joc.7586>
- Vivekanandan, N. (2018). Comparison of probability distributions in extreme value analysis of rainfall and temperature data. *Environmental Earth Sciences*, 77(5). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7356-z>
- Vivekanandan, N. (2022). Intercomparison of estimators of extreme value family of distributions for rainfall frequency analysis. *Mausam*, 73(1), 59-70. <https://doi.org/10.54302/MAUSAM.V73I1.5080>
- Wang, H., & Xuan, Y. (2021). Spatial variation of extreme rainfall observed from two century-long datasets. *Geophysical Research Letters*, 48(8). <https://doi.org/10.1029/2020GL091933>
- Wang, H., & Xuan, Y. (2022). Spatial variation of catchment-oriented extreme rainfall in England and Wales. *Atmospheric Research*, 266(2022), 105968. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105968>

- Yeo, M., Nguyen, V., & Kpodonu, T. (2021). Characterizing extreme rainfalls and constructing confidence intervals for IDF curves using Scaling-GEV distribution model. *International Journal of Climatology*, 41(1), 456-468. <https://doi.org/10.1002/joc.6631>

## BIOGRAPHIES



**Guillermo, Arriola**, Civil Engineer from the Señor de Sipán University, Peru and with studies completed for a Master's degree in Road Engineering at the Ricardo Palma University, Peru. He's a designer and consultant in civil engineering projects with an emphasis on hydrology and hydraulic engineering. He has experience

in the calculation and design of works of art for roads, bridges, hydraulic works, hydrological and hydraulic modeling. Researcher and thesis advisor in hydraulic engineering, hydrology and related branches for undergraduates.



**Luis, Villegas**, Civil Engineer from the Pedro Ruiz Gallo National University, Peru. Master's Degree in Public and Educational Management from the Cesar Vallejo University, Peru. He has experience in Supervision and Residence of Civil Construction works, Designer and Consultant in civil engineering projects with an

emphasis on buildings and road works. Also, he has experience in the public sector as assistant manager in the Urban-Rural area. Researcher, advisor and jury of undergraduate and postgraduate theses in road engineering, sanitation and construction.



**Joseph, Fernandez**, Civil Engineer from the Señor of Sipán University, Peru. He's a designer and consultant in civil engineering projects with an emphasis on hydraulic engineering. He has experience in the calculation and design of works of art for roads, bridges, hydraulic works, hydrological

and hydraulic modeling.



**Jheny, Vallejo**, Graduated from the Professional School of Civil Engineering, from the Señor de Sipán University, Peru. She has extensive knowledge in research on issues related to Civil Engineering, she acquired in the years of professional training, as well as practical experiences.



**Cesar, Idrogo**, Civil Engineer from the Señor de Sipán University, Peru. Master in Education Sciences with a mention in Teaching and University Management from the Pedro Ruiz Gallo National University, Peru. Degree in Education, specialty Natural Sciences from the Pedro Ruiz Gallo National University. Full-time professor at the Señor de Sipán University, Peru.



## INDEXACIONES

Scopus®

SciELO

redalyc.org UAEM

latindex  
catálogo  
2.0

DOAJ  
DIRECTORY OF  
OPEN ACCESS  
JOURNALS

REDIB  
Red Iberoamericana  
de Innovación y Conocimiento Científico



REVISTA  
POLITÉCNICA

MIAR  
Matriz de Información para el  
Análisis de Revistas

CiteFactor  
Academic Scientific Journals

BASE  
Bielefeld Academic Search Engine

Google  
Scholar

[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)

Academic  
Resource  
Index  
ResearchBib

INDEX COPERNICUS  
INTERNATIONAL

Crossref  
doi DIGITAL  
OBJECT  
IDENTIFIER



# REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA  
POLITÉCNICA  
NACIONAL

ISSN: 1390-0129  
eISSN: 2477-8990

Volumen 52, Nro. 2, Noviembre 2023 - Enero 2024





[revistapolitecnica.epn.edu.ec](http://revistapolitecnica.epn.edu.ec)  
[www.epn.edu.ec](http://www.epn.edu.ec)