



**Uptc**<sup>®</sup>  
Universidad Pedagógica y  
Tecnológica de Colombia



# INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

# REVISTA I2+D

## Ingeniería, Investigación y Desarrollo

Vol. 21 - No. 2 Julio - Diciembre 2021

### RECTOR

*Óscar Hernán Ramírez*

### VICERRECTOR ACADÉMICO

*Manuel Humberto Restrepo Domínguez*

### VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

*Enrique Vera López*

### VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO

*Eduardo Avendaño Fernández*

### DECANO FACULTAD

*Luis Ángel Lara González*

### DIRECTOR / EDITOR

*Jorge Enrique Espíndola Díaz*

### COMITÉ EDITORIAL Y CIENTÍFICO

*Ph.D. Pedro Fabián Cárdenas Herrera*  
Universidad Nacional de Colombia

*Ph.D. Gabriel Peña Rodríguez*  
Universidad Francisco de Paula Santander

*MSc. Andrés Fernando Jiménez López*  
Universidad de los Llanos

*Ph.D. Jorge Julián Moreno Rubio*  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

*Ph.D. Juan María Menéndez Aguado*  
Universidad de Oviedo

### COMITÉ DE ARBITRAJE

*Ph.D. Alexander Pérez Ruiz*  
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

*MSc. Francisco Javier Ibargüen Ocampo*  
Universidad del Quindío

*MSc. Heiner Castro Gutiérrez*  
Universidad del Magdalena

*MSc. Nelson Javier Escobar Mora*  
Universidad Pontificia Bolivariana

*MSc. Luis Carlos Olmos Villalba*  
Institución Universitaria Pascual Bravo

*Ph.D. Carlos Arturo Ávila*  
Universidad de los Andes

*Ph.D. José Ignacio Marulanda Bernal*  
Universidad EAFIT

*Ph.D. Jeison Marín Alfonso*  
Universidad Pontificia Bolivariana

*MSc. Ramiro Alejandro Plazas Rosas*  
Universidad del Valle

*Esp. Carlos Gabriel Correa Chaparro*  
Fundación Universidad de América

*MSc. Christian Ricardo Zea Forero*  
Pontificia Universidad Javeriana

*MSc. Andrés Fernando Jiménez López*  
Universidad de los Llanos

*MSc. William Fernando Álvarez Castañeda*  
Universidad Santo Tomás

*MSc. Oscar Oswaldo Rodríguez Díaz*  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

*MSc. Andrea Catalina Alvarado Fajardo*  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

*MSc. Edgar Absalón Torres Barahona*  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

*MSc. Luis Ariel Mesa Mesa*  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

### ASISTENTE EDITORIAL / CORRECTOR DE ESTILO

*Lic. Giseth Alexandra López López*

### DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

*Esp. Vivian Espíndola Carvajal*

### Correspondencia Canje y Suscripciones a nombre

**de:** Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo UPTC  
Sogamoso-Boyacá, Colombia Calle 4 Sur N° 15-134  
Edificio Administrativo - Tercer Piso

**Tel:** (57+8) 770 5450 Ext. 2606

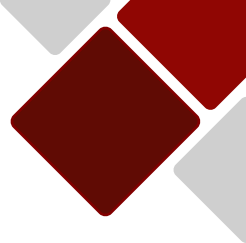
**E-mail:** [revistaiid@uptc.edu.co](mailto:revistaiid@uptc.edu.co)

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.19053/issn.1900-771X>

Los conceptos expresados en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen a la publicación.

ISSN 1900-771X e-ISSN 2422-4324

Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo



## TABLA DE CONTENIDO

WATER QUALITY INDICES IN MÉXICO AND COLOMBIA, EVOLUTION, CRITERIA AND CHALLENGES <i>Índices de calidad de agua en México y Colombia. Evolución, criterios y cambios</i> Ana Patricia Gaytán Alarcón, M. Socorro González Elizondo, Inés Vergara Gómez, Mercedes Díaz Lagos, María Teresa Alarcón Herrera .....	5
CRONOESTRATIGRAFÍA DEL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA: UNA REVISIÓN <i>Cronoestratigraphy of the Aburrá Valley: a review</i> Santiago Noriega Londoño, Mateo Arboleda Giraldo, Sergio Andrés Restrepo Moreno, María Isabel Marín Cerón .....	23
METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE AMENAZA POR FLUJO TORRENCIAL DETONADA POR LLUVIA, EN LA MICROCUENCA EL ROLLO MUNICIPIO DE SAN BERNARDO, NARIÑO <i>Methodology for mudflow hazard assessment triggered by rainfall, in El Rollo Watershed, San Bernardo, Nariño</i> Álvaro Camilo Cordoba Pazos, Francisco Ricardo Maffla Chamorro .....	35
ENSAYO DE PENETRACIÓN DINÁMICA SÚPER PESADA (DPSH): EQUIVALENCIA PARA EL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT) EN COLOMBIA <i>Dynamic Probing Super Heavy (DPSH): Equivalence for the Standard Penetration Test (SPT) in Colombia</i> Edgar Leonardo Salamanca Medina, Juan José López Domínguez .....	47
LA INOCUIDAD EN LA ELABORACIÓN DE ALIMENTOS EN RESTAURANTES DE COMIDA PERUANA PARA EMPRENDEDORES <i>Food safety in Peruvian food restaurants for entrepreneurs</i> Jorge Paucar Luna, Lida Vásquez Pajuelo, Mayra Elizabeth Navarrete Ormeño .....	57
NANOPARTÍCULAS DE ORO FUNCIONALIZADAS CON L-CISTEINA PARA DETECCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA <i>L-Cysteine functionalized gold nanoparticles for Arsenic detection in water</i> Edgar González, Yesid Acuña, Ana Quiroz .....	66
LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF POWER GENERATION EXPANSION: THE CURRENT AND FUTURE SCENARIOS IN BRAZIL <i>Análisis de sostenibilidad del ciclo de vida de la expansión de energía en Brasil</i> João Gabriel Lasso, Denise Matos, David Castelo Branco, Alessandra Magrini .....	73

## EDITORIAL

Presentamos el segundo número del volumen veintiuno de Ingeniería Investigación y Desarrollo. Esta revista, editada y patrocinada por la Facultad Seccional Sogamoso de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, surge con la percepción de que la investigación relacionada con la ingeniería y las ciencias administrativas, necesitan otros medios de divulgación científica.

Esta es una publicación semestral cuyo objetivo es difundir el conocimiento a nivel nacional e internacional en el área de las ciencias administrativas y la ingeniería y la investigación, a través de la publicación de artículos científicos inéditos que presenten aportes originales, tanto empíricos como teóricos.

En los últimos años nuestra revista ha publicado sin interrupciones y semestre a semestre, artículos recibidos y evaluados por pares académicos destacados en las áreas del conocimiento que pretendemos abarcar, permitiendo darle continuidad a un trabajo comenzado en el año 2005 por un grupo de docentes encabezados por la profesora Aura Leticia Chaves Romero, esta primera edición se le denominó “No es tan complicado” y desde ese mismo momento no se ha detenido la producción investigativa de nuestra Facultad.

Hoy que la Escuela de Ingeniería de Minas y por tanto nuestra Facultad cumplen 50 años del inicio de sus labores, me permito presentar y después de estos 17 años una nueva edición de nuestra revista, en esta ocasión encontramos artículos como: “Índices de calidad de agua en México y Colombia. Evolución, criterios y cambios” del Instituto Politécnico Nacional de México de la ciudad de México DF; “Cronoestratigrafía del Valle de Aburra, Colombia: Una Revisión” de la EAFIT de Medellín; “Metodología para evaluación de amenaza por flujo torrencial detonado por lluvia, en la Microcuenca El Rollo, Municipio de San Bernardo, Nariño”, de la Universidad Mariana de San Juan de Pasto; “Ensayo de penetración dinámica súper pesada (DPSH): equivalencia para el ensayo de penetración estándar (SPT) en Colombia”, del Departamento de Geología y Geotecnia de la empresa Zofre SAS de la ciudad de Bogotá; “La inocuidad en la elaboración de alimentos en restaurantes de comida peruana para emprendedores”, de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú; “Nanopartículas de oro funcionalizadas con l-Cisteína para detección de arsénico en agua”, de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá; “Análisis de Sostenibilidad del Ciclo de Vida de la expansión de energía en Brasil”, de la Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil.

Se debe destacar en esta edición, la participación de investigadores de diversas nacionalidades como México, Perú, Brasil y por supuesto Colombia, a quien agradecemos por sus valiosos aportes tanto a esta revista como a la comunidad académica.

Por último, quiero destacar que ese “no es tan complicado” de la primera edición, refleja lo que hemos hecho en estos años en cuanto a la divulgación de estos temas, hoy se puede afirmar que “cuando hay talento no es tan complicado asumir retos”.

**Jorge Enrique Espíndola Díaz, PhD.**  
**Profesor Titular**  
**Editor**

## WATER QUALITY INDICES IN MÉXICO AND COLOMBIA. EVOLUTION, CRITERIA AND CHALLENGES

### Índices de calidad de agua en México y Colombia. Evolución, criterios y cambios

Ana Patricia Gaytán Alarcón<sup>1</sup>, M. Socorro González Elizondo<sup>2</sup>, Inés Vergara Gómez<sup>3</sup>, Mercedes Díaz Lagos<sup>4</sup>, María Teresa Alarcón Herrera<sup>5</sup>

<sup>1-2</sup>Instituto Politécnico Nacional (IPN), Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango, <sup>3-4</sup>Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Geológica, Grupo de Investigación CITESA, Colombia. <sup>5</sup>Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV-Durango). Email: <sup>1</sup>ana.ga@vguardiana.tecnm.mx, <sup>2</sup>herbario\_ciidir@yahoo.com.mx, <sup>3</sup>ines.vergara@uptc.edu.co, <sup>4</sup>mercedes.diaz@uptc.edu.co, <sup>5</sup>teresa.alarcon@cimav.edu.mx

(Recibido septiembre 30 de 2021 y aceptado noviembre 12 de 2021)

#### Resumen

El Índice de Calidad del Agua (WQI) es una herramienta simple y fácil de entender para analizar y reportar tendencias de calidad. La calidad del agua no es estática y depende de múltiples factores, por lo que se han desarrollado varios índices a nivel mundial teniendo en cuenta los criterios locales de calidad del agua. Este documento explora y analiza los pasos de evaluación de la calidad del agua basados en los modelos de índices ampliamente utilizados en el mundo. Estos pasos incluyen la selección de los parámetros, la generación de subíndices, las ponderaciones de los parámetros y la agregación de subíndices. Se identificaron las ventajas y desventajas de cada índice y se detectaron las principales limitaciones que surgen en el cálculo de las diferentes metodologías. Estas limitaciones son la subjetividad en la selección y ponderación de los parámetros y la ambigüedad y enmascarado en la etapa de agregación. Las herramientas metodológicas objetivas para resolver estas limitaciones consideran el uso de técnicas estadísticas y de lógica difusa. El CCMEWQI se identifica como un índice de calidad del agua versátil ya que permite determinar las condiciones temporales y espaciales para los diferentes usos de manera específica, cumpliendo con la normativa, y con base en el análisis de los datos de seguimiento de cada región.

**Palabras clave:** Agregación, parámetros, calidad, agua superficial, uso del agua, WQI

#### Abstract

The Water Quality Index (WQI) is a simple and easy-to-understand tool for analyzing and reporting quality trends. Water quality is not static and depends on multiple factors, in this sense; globally various indices have been developed based on local water quality criteria. This paper explores and discusses about water quality assessment and their steps taking into account the widely used index models in the world. These steps include selecting the parameters, sub-index generation, weightings of the parameters, and sub-indices aggregation. The advantages and disadvantages of each index identified, and the main limitations that arise in the calculation of the different methodologies detected. These limitations are the subjectivity in selecting and weighing the parameters and the ambiguity and eclipsing in the aggregation stage. Objective methodological tools to solve these limitations consider the use of statistical and fuzzy logic techniques. The CCMEWQI is a versatile water quality index, since it allows the determination of the temporal and spatial conditions for the different uses in a specific way, achieving with regulations, and based on the analysis of monitoring data for each region.

**Key words:** Aggregation, parameters, quality, surface waters, water use, WQI.

## 1. INTRODUCTION

Water availability is linked directly to human well-being, and at the same time, plays a significant role in the landscape system [1]. Despite its great value, its current patterns of consumption are ecologically and socially unsustainable. The hydrological cycle balance has been altered, with sensitive changes in evaporation rates and consequent alteration of water quality, which ultimately causes its deterioration and accentuates availability problems [2]. Hence, proper management and constant monitoring of quality and quantity of water play an essential role in the integrated management of this resource [3].

Given that natural and anthropogenic activities change the characteristics of water and its different uses do not require the same conditions, water quality represents the condition associated with the physicochemical and biological factors used for its intended purpose. Usually, evaluating the quality of a body of water is carried out by monitoring and analyzing individual parameters of three broad categories: physical, chemical, and biological. However, this is a highly laborious and costly process without providing a whole picture of the water quality. Furthermore, many scientists and researchers often find it challenging to define and present it in a consolidated and straightforward way [4,5] Therefore, different calculation methodologies have emerged whose main objective is to identify the significant parameters for representing water quality according to the uses intended and communicate it to decision-makers.

Water quality indices (WQIs) emerge as simple and easily understandable tools for analysing and reporting quality trends. Through a dimensionless number, they reduce the multivariate nature of the data, allowing them to communicate their status in a more efficient way to stakeholders [5-6]. This valuable tool has proven to be the most effective technique and has played a key role in water resources management. So that currently, developing countries have been actively working on research in this field [7].

Four typical steps have been identified in the WQIs calculation approaches: parameter selection, sub-index generation, weight allocation, and sub-index aggregation for a final index determination [6, 8-9, 5]. However, there is no globally accepted method for implementing these steps, corresponding to the WQI processors applying their expertise and knowledge to select the most appropriate method. Numerous models with variations in their calculation's four typical steps have been developed [10-13]. Exploring and modifying the indices will help to select the most appropriate index to apply in a particular study. This paper aims to present a critical analysis of the different WQIs most commonly used worldwide. Looking specifically at the indices developed and applied in Colombia and Mexico.

## 2. METHODS

This document includes an overview of the concept and history of different models of WQIs developed worldwide. Afterward, the development and methodologies for the most widely used WQIs worldwide summarized, and their main challenges and limitations addressed, including some studies aimed to reduce these limitations. For this purpose, several journal articles and reports from government agencies were reviewed. Some of the terms used to perform this search were: water quality, water quality indices, surface water quality, and water parameters. Bibliographies from these articles were searched to identify any additional relevant studies that were not found or missed through the main research. This research was conducted between August and October 2021.

## 3. RESULTS

*3.1. Importance and evolution of the water quality index*  
WQIs result from mathematical simplification exercises, based on some physicochemical and microbiological parameters, selected and transformed into a dimensionless number. They describe the state of the water according to its degree of purity or pollution regarding natural water quality, human health, and

intended uses, allowing it to be communicated to a target audience or general [8-9, 5].

They are considered critically important tools. The information obtained from WQIs is used for different purposes such as resource management, area classification, regulatory enforcement, and scientific research [14, 4]. They also keep the public informed and help motivate their participation to support awareness and actions to conserve and improve water quality.

The concept of water quality has a long history. Dates back to 1848, when in Germany, some attempts were made to relate it to the presence or absence of specific biological organisms [6, 15]. In 1908, one of the first WQIs, the Saprobic Index (SI), used to estimate the level of easily degradable organic matter in water, being insufficient and leading to the search for better indices in the following decades [15].

In 1965, Horton presented a simple but scientifically defensible mathematical method for rating water quality [8]. This method based on integrating eight significant parameters: wastewater treatment, dissolved oxygen, pH, fecal coliforms, specific conductance, carbon chloroform extract, alkalinity, chlorides. Each parameter was transformed by assigning it a rating scale from 0 to 100 and then a weight from 1 to 4, giving 4 to the most significant parameter based on his judgment and a few associates. The final index score was composed of the weighted sum of the sub-indices, divided by the sum of weights and multiplied by two coefficients, dependent on temperature and water pollution level [16, 8].

Since Horton's first modern WQI, researchers have developed numerous indices applied by different government agencies in studies worldwide. During the 1970s and 1980s, various indices were developed: National Sanitation Foundation Index (NSF-WQI), Dinius Indexes (1972, 1988), the original Oregon Quality Index (O-WQI), Prati Index, Bhargava Index, Bascaran Index, and the Index of the Environmental Company of Sao Paulo State (CETESB) [17-23]. In the 1990s, Smith developed

a WQI for four uses of water, which was used in water quality legislation and for the diffusion of water quality information in New Zealand [24]. In Canada, a significant development was the British Columbia Water Quality Index (BCWQI), used to assess water quality in that province [25].

In Colombia, Rojas (1991) proposed an index, adapted to the context of the Cauca River. In the late 1990s; by the other side, in Mexico, the Secretariat of Urban Development and Ecology of Jalisco (INDIC-SEDUE) and the León Index were proposed [26, 27]. In the first decade of the 21st century, the Canadian Council of Ministers of the Environment Index (CCME-WQI) was approved [28]. Recent models correspond to Argentina's Almeida Recreation Index (RWQI), Brazil Bathing Conditions Index (ICB), Malaysian Index, and West Java Index (WJWQI).

### 3.2. Indices used worldwide

In Table 1, the countries, methodologies, and references of studies using various water quality indices worldwide are presented. Among the variety of WQIs, the application of NSF-WQI in its geometric and arithmetic form, O-WQI and CCME-WQI stand out. Their descriptions are introduced later, and a summary of their advantages and disadvantages (Table 2).

NSF-WQI. This index intended for a general water evaluation. It emerged as an improved version of Horton's index. The professional opinion of a panel of 142 water quality experts for parameter selection used, who also defined the weighting of each parameter and set the classification on a scale, from excellent to very bad. Brown, et al. (1970) proposed the first version of the NSF index by on the arithmetic form; subsequently, in 1973, geometric aggregation considered better, being more sensitive when a single variable exceeds the regulation, because if anyone sub-index exhibits poor water quality, the overall index will display poor water quality.

The sub-indices values are obtained by constructing water quality valuation curves for each parameter with a range of 0 to 100 on the vertical axis and the different levels of

the variables along the horizontal axis. This index uses the Delphi methodology, an iterative process involving many experts and questionnaire opinion-gathering techniques, allowing feedback to refine assessments and allow consensus [6, 29-30]. It is one of the most widely used

WQIs by agencies and institutions in the United States and is commonly used in the world, being validated and adapted in different studies [27], it is applied in countries such as Brazil, Mexico, Iraq, Croatia, Colombia, and Costa Rica, among others [31-33, 15].

**Table 1.** Water quality indices and countries in which they were developed.

Index	Country	No. of Parameters	Weight	Aggregation	References
NSF index	United States of America	9	Different weights	Geometric and arithmetic	Akkoyunlu and Akiner, 2012; Effendi et al., 2015; Darvishi et al., 2016; Ewaid, 2017; Gupta et al., 2017; Barakat et al., 2018; Fathi et al., 2018; Mena-rivera et al., 2018; Rimoldi et al., 2018; Lopes et al., 2020; Torres et al., 2010; Zotou et al., 2020
Prati Index	Italy	13	Different weights	Arithmetic	Prati et al., 1971
Dinius index (1972)	United States of America	11	Different weights	Arithmetic	Dinius, 1972
CETESB	Brazil	9	Different weights	Geometric	Medeiros et al., 2017; Lopes et al., 2020
Oregon index	United States of America	8	Unweighted	Harmonic square mean	Dunnette, 1979; Cude, 2001; Lumb et al., 2011; Dede et al., 2013; Darvishi et al., 2016; Hamlat et al., 2017; Zotou et al., 2019
Bhargava index	India	According to the use. Four categories: coliform organisms, metals, physical parameters, and organic and inorganic parameters	Different weights	Modified geometric	Bhargava, 1983, 1985
Dinius index (1988)	United States of America	12	Different weights	Geometric	Dinius, 1988



Smith index	New Zealand	4-6-7 (According to the use)	Unweighted	Minimum operator	Smith, 1989, 1990 four suitability-for-use water quality indexes have been developed. The water users are: General, Bathing, Supply, and Fish Spawning although in the Bathing and Supply Indexes protection of aquatic life is also considered. To ensure that they tell us something useful and do not 'hide' important information as current indexing systems tend to do, the Minimum Operator has been employed as the sub-index aggregation mechanism. This is a robust, sensitive, and flexible method and seems more appropriate for this type of index than the more commonly used techniques (e.g. additive and multiplicative)
Bascaron index (BWQI)	Spain	26	Different weights	Modified arithmetic	Bascaran, 1979; Lopes et al., 2020
Rojas index	Colombia	6	Different weights	Geometric	Rojas, 1991
INDIC-SEDUE	Mexico	18	Different weights	Arithmetic	Montoya, 1997
Leon index	Mexico	15	Different weights	Geometric	León-Vizcaíno, 1999
Pesce and Wunderlin index	Argentina	3	Different weights	Arithmetic	Pesce and Wunderlin, 2000
CCME index	Canada	Open choice	Unweighted	Mathematical formula composed of 3 factors	Lumb et al., 2006, 2011b; Espejo et al., 2012; Hurley et al., 2012; CCME, 2017; Bilgin, 2018; Chacón et al., 2018; Gikas et al., 2020; Lopes et al., 2020; Zotou et al., 2020
Nagels index	New Zealand	7	Unweighted	Minimum operator	Nagels et al., 2001
ICAUCA River index	Colombia	10	Different weights	Geometric	CVC, 2004; Ocampo-Duque et al., 2013
Department of Environment Malaysia index (DOE-WQI)	Malaysia	6	Different weights	Arithmetic	Suratman et al., 2015; Naubi et al., 2016

Universal Water Quality index (UWQI)	Turkey	12	Different weights	Arithmetic	Boyacioglu, 2007; Dede et al., 2013 salts and total parameters were selected as index components. Threshold values were assigned to seven water-quality classes as defined by the legislation and were used to develop mathematical equations to convert observed values to index scores. Depending on the ecological importance of the parameters, weights were assigned to each variable and then a weighted sum method was performed to aggregate sub-indices. The applicability of the method was demonstrated in two basins located in Turkey. Factor analysis was applied to optimize the index component selection process. Several alternatives were tested to comprise at least one variable from each defined factor class (e.g. salinity content)
RWQI	Argentina	9	Different weights	Geometric	Almeida et al., 2012
Overall Index of Pollution (OIP)	India	13	Unweighted	Arithmetic	Sargaonkar and Deshpande, 2003; Hamlat et al., 2017
ICB	Brazil	4	Unweighted	Minimum operator	Azevedo Lopes et al., 2016 especially where the climate is favorable. Water resources with appealing conditions for primary contact recreational activities include rivers, waterfall plunge pools, dams and lakes, as well as sea coasts. Recreational use has specific demands for water quality, particularly as regards risks to human health such as exposure to pathogenic organisms, toxic substances, and submerged hazards. In Brazil, there is insufficient monitoring of bathing water conditions and currently used methodology has some limitations particularly the lack of guidance on interpretation of variables other than faecal bacterial indicators. The objectives of this study were: (1).

Medeiros index	Brazil	11	Different weights	Geometric	Medeiros et al., 2017
WJWQI	Indonesia	13	Different weights	Geometric	Sutadian et al., 2018
Ecosystem specific water quality index (ES-WQI)	Mexico	14	Different weights	Arithmetic	Gradilla-Hernández M.S et al., 2020 which is frequently used to assess chemical, physical, and microbiologic features of waterbodies in temperate latitudes. In this work, a well-structured method, completely based on multivariate statistical methods and historical data distributions, was used to develop an ecosystem specific water quality index (ES-WQI)
Santiago- Guadalajara River index (SGR-WQI)	Mexico	17	Different weights	Arithmetic	Casillas-García et al., 2021; Gradilla-Hernández M.S. et al., 2020

OWQI. This index supports the assessment of water quality for general recreational uses. Its first version was a branch of the NSFQI, developed by the Oregon Department of Environmental Quality, United States of America (USA), and it is used in various documents to report water quality status and trends. The Delphi methodology used to select six parameters, non-linear transformations for sub-index

generation, and an arithmetic average aggregation formula weighted in the final index calculation. It was updated in 1995 using logarithmic transformations to calculate sub-indices and add temperature and total phosphorus parameters. The aggregation method was modified through the unweighted harmonic square mean formula (Table 4) [20-34].

**Table 2.** Advantages and disadvantages of the most widely used indices around the world.

<b>NSFWQI</b>	
<b>Advantages</b>	<b>Disadvantages</b>
Simple and concise method, easy to understand.	Some information is lost when multiple water quality parameters are included.
Allows evaluation between areas and identifying changes in water quality.	Fixed established parameters.
Facilitates and enhances communication with users who have limited technical capabilities.	Cannot determine water quality for specific uses
It is one of the most used indices by agencies and institutions in the United States.	Cannot evaluate every single health risk.
	Sensibility and subjectivity issues present in complex environmental issues.

---

### OWQI

---

Simple and concise method, easy to understand.  
 Allows evaluation between areas and to identify changes in water quality.  
 Facilitates and enhances communication with users who have limited technical capabilities .  
 It has been used in several briefs and reports to inform about the state and tendencies of water quality in Oregon.  
 Enables the expression of water quality for recreational uses in general, including fishing and swimming.  
 Its formula allows the most deteriorated variable to impart the most significant influence on the water quality index and recognizes that the different water quality variables will have a different meaning for overall water quality at other times and places.

Some information is lost when multiple water quality parameters are included.  
 Fixed established parameters.  
 Cannot determine water quality for specific uses, e.g., irrigation or potable.  
 Cannot evaluate every single health risk.  
 Precaution required if applying to other geographical zones or different water bodies.  
 Subjectivity issues present in complex environmental issues.

---

### CCMEWQI

---

Flexible in terms of the type and number of water quality parameters, application period, and type of water body.  
 Allows the evaluation of water quality for general uses as for specific uses.  
 Flexibility in the absence of parameter data.  
 Compares observations with a benchmark (water quality standards); therefore, there is no sub-index generation, or weighting put in place.  
 Identifies parameters that do not meet the set levels and frequency of occurrence.  
 Easy to calculate. A simple mathematical framework for adding the value of the final index.  
 It can be used both to track changes at a site over time and for direct comparisons between sites.

Some information is lost when multiple water quality parameters are included.  
 It is solely up to the user's professional judgment to determine what and how many variables should be included in the index.  
 It requires a period of at least three years for the calculation  
 The selection of regulations influences the results. Therefore, the regulations must be equivalent for comparisons to be valid .  
 Factor F1 has a more significant influence on the final value of the index, creating a sensitivity problem.  
 It is recommended to use at least eight but no more than 20 parameters.

CCMEWQI. Through the Canadian Environmental Sustainability Indicators (CESI) initiative, the government focused on key environmental indicators of great concern in Canada. Water quality is one of them, address through CCMEWQI [35]. This index is based on a different concept from those of NSFQI and OWQI. Developed from BCWQI by the Canadian Council of Ministers of the Environment, it was oriented to assessing the ecological quality of water based on measures to comply with or divert from established water quality standards. The model adds the index through a three-component non-linear formula (1,

2, 3): scope (F1); Which represents the percentage of parameters that do not meet the guidelines, at least once during the considered period, relative to the total number of measured parameters, frequency (F2). In addition, it represents the percentage of individual tests that do not meet the guidelines, and amplitude (F3), which means the value by which failed test values do not meet the above guidelines. The specific parameters, policies, and periods used in the CCMEWQI are not specified and may vary from region to region, depending on local conditions, purpose of index use, and water quality problems [36, 37].

The formulas for calculating F1, F2, and F3 are as follows:

$$F_1 = \left( \frac{\text{Number of parameters which did not meet desirable levels}}{\text{Total number of parameters}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$F_2 = \left( \frac{\text{Number of tests that did not meet desirable levels}}{\text{Total number of tests}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$F_3 = \left( \frac{nse}{0.01(nse) + 0.01} \right) \quad (3)$$

(*nse*) represents the magnitude which water quality diverts from the conformity criteria. It is calculated dividing the sum of the magnitude of each of the deviations observed in the tests that were out of conformity (*nse*), by the total number of tests:

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n nse_i}{\text{Total number of tests}} \quad (4)$$

For cases in which the test values should not exceed the desirable level:

$$nse_i = \left( \frac{\text{Value of the conformity level}_i}{\text{Desirable level}_i} \right) - 1 \quad (5)$$

For cases in which the test values should not go below the desirable level:

$$nse_i = \left( \frac{\text{Desirable level}_i}{\text{Out-of-conformity test value}_i} \right) - 1 \quad (6)$$

### 3.3. Indices developed in Mexico

In Latin America, the development and implementation of WQIs boomed in Mexico [38]. Different studies have developed and applied WQIs in groundwater and surface water bodies. Most studies have focused on surface water bodies, such as rivers, lakes, and dams [39-42]. However, recent studies have applied WQIs in groundwaters [43-44].

Moreover, the indices developed in Mexico, the first and most notorious works are the WQIs developed by Montoya (1997) and León (1999) [45, 31]. Both indexes based on the Dinius work [19, 46]. Dinius (1972). This index can be considered the predecessor of the planning or decision-making indexes. The sub-indices of the index

were developed from a review of the published scientific literature. The following categories were established for the selection of 11 parameters: amount of organic material, coliform bacteria, ionic material, and physical characteristics. Eleven parameters were selected. Equations were generated for the sub-indexes. Finally, the index was calculated as the weighted arithmetic average of the subindices.

Subsequently, Dinius (1988) developed a new WQI under reference water quality standards defined by a panel of seven experts under the Delphi methodology instead of the reference values used in the first index. It uses a multiplicative index and incorporates nitrates as an additional parameter. Evaluate the water quality considering six water uses: public water supply, recreation, aquatic life (fish), aquatic life (shellfish), agriculture, and industry.

INDIC-SEDUE. The Montoya index (INDIC-SEDUE) was the first to be developed and applied in Mexico and Jalisco [47]. It was based on the work of Dinius in 1972; it is made up of 18 physicochemical and microbiological parameters, uses functions for generating the sub-indexes, assigns weights from 0.5 to 5 on a scale of relevance, additive aggregation formulas, and considers six water uses. CONAGUA used the INDIC-SEDUE to evaluate water quality at the national level between 1990 to 2001 [27] León Index.

The Mexican Institute of Water Technology adapted the model proposed by Dinius (1988). The León index considers 15 water quality parameters, uses functions to generate the sub-indices, weights between 0 and 1, multiplicative aggregation formulas. This index classifies water uses into five groups: drinking water, agriculture, fishing and aquatic life, industrial, and recreational [27].

CONAGUA currently determines water quality in Mexico through surface and groundwater monitoring networks. There are 3,493 monitoring sites for surface water and 1,068 for groundwater. The analysis of surface water quality considers eight indicators: BOD5, COD, TSS, fecal

coliforms (FC), *Escherichia coli* (E COLI), Enterococci (ENTEROC), oxygen saturation percentage (OD%), and toxicity (TOX). The results of these indicators are integrated to determine three colors: green, yellow, and red (CONAGUA, 2021) [49]. Failure to comply with one or more of the BOD<sub>5</sub>, COD, TOX, and ENTEROC indicators automatically qualifies the water as red, classifying it as polluted or heavily polluted. For groundwater, fourteen indicators are considered: fluorides (F), fecal coliforms (CF), nitrate-nitrogen (N-NO<sub>3</sub>), total arsenic (As), total cadmium (Cd), total chromium (Cr), total mercury (Hg), total lead (Pb), alkalinity (ALC), conductivity (CONDUCT), hardness (DUR), total dissolved solids (TDS), total manganese (Mn) and total iron (Fe). Failure to comply with one or more of the indicators of F-, CF, N-NO<sub>3</sub>, As, Cd, Cr, Hg, and Pb automatically qualifies the water as red [49].

The water quality index for specific uses is determined with the historical information available from the monitoring networks to assess the degree of contamination and, if necessary, restoration measures. An example of this is the Santiago River index (SGR-WQI), developed as an integral part of the study carried out for the restoration and protection of the aquatic life of this river and proposed as a calculation methodology [50]. The index was developed based on 11 years of data from 13 monitoring stations. It is based on the NSF index and the CCME criteria. The methodology includes Principal Component Analysis (PCA) and consideration of the maximum permissible limits reported in Mexican regulations for selecting 17 parameters with the highest relevance for the intended use. In the generation of sub-indices, rating curves were developed based on the historical distributions and considering the permissible limits of these parameters. Subsequently, the weighting is assigned using multivariate statistical methods (PCA and Discriminant Analysis). Aggregation is performed using the additive method [30, 50].

Most of the methodologies used for developing and determining WQIs for the specific uses of public supply, agricultural irrigation, and protection of aquatic life

have been based on the Dinius, NSF, and CCME models. Statistical methods based on Principal Component Analysis (PCA) and Pearson correlations were considered to reduce the subjectivity of traditional methodologies [42, 44, 30].

#### 3.4. Water quality indicators in Colombia

In Colombia, there is also a great variety of indicators proposed to measure the quality and contamination of water. It was proposed by several authors that include multivariate analysis methods of principal components by using mainly in monitoring of the oil industry [51-52]. Also, these include indicators of contamination by mineralization -ICOMI-, by organic matter -ICOMO-, by suspended solids -ICOSUS-, by trophy -ICOTRO-, by temperature -ICOTEMP-, by pH -ICOPH [53], as well such as the creation of specific indicators for oil activity [54]. Among which the Aromatic Hydrocarbon Pollution Index in fish and sediments -ICOARO, the aliphatic hydrocarbon contamination index in pees and sediments -ICOALRE, the Pollution index by unresolved aliphatic hydrocarbons in fish -ICOALNORE-P [53].

Currently, the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies -IDEAM- as the government entity in charge. This Institution adopts a system of water indicators to explain the status of the quantity and quality of water [55]. At the same time, includes indicators associated with the natural regime (Aridity index IA, water retention and regulation index -IRH, to anthropic intervention (IUA water use index, vulnerability index to shortage IVH, the Potential Threat index due to alteration to water quality -IACAL and index of Water Quality -ICA.

The Water Quality Index -ICA- is a numerical expression obtained from a calculation formula that includes the weighting of six parameters: dissolved oxygen -OD- Total suspended solids -SST, Chemical Oxygen Demand - COD, Electrical Conductivity -CE, Nitrogen Total and pH [56-57]. Each variable is calculated using reference equations that enter the concentration of the water quality variable in the corresponding functional curve to estimate its corresponding value [58].

The Index of Potential Alteration of the Quality of the Water (IACAL) is also a numerical value that qualifies in one of five categories. The existing ratio between the pollutant load in a hydrographic subzone, in a period of time and the surface water supply for mean year and dry year [58] and indicates the vulnerability to contamination to which a hydrographic subzone may be subjected.

The indicator is calculated from variables such as Biochemical Oxygen Demand -DBO- Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solids (SST9, Total Phosphorus (PT) and Total Nitrogen-NT [55-58].

Likewise, the monitoring of the average of Total Phosphorus, Total Nitrogen, Dissolved Oxygen, Hydrogen Potential and Total Suspended Solids is used [58].

### 3.5. Specific uses of indices

In developing an index, it is necessary to consider their specific purpose since the different objectives will lead to a diverse selection of parameters and permissible threshold concentrations. Some indices currently do not consider the end-use of water, which are commonly used, and those where water is directed to a specific type of demand such as drinking, recreation, irrigation, etc. Among the indices reviewed, those are developed to applicate into specific water uses include: RWQI [59], the Nagels Index [60], the ICB [61], and the index for Colina Lake in Mexico [39] which assess suitability for recreational use of freshwaters. UWQI [62] and the Bhargava Index [63] used to determine the suitability of drinking water supplies; IWQI [64], and the Misaghi Index [65], allow water to be evaluated for agricultural irrigation use. The CCMEWQI, which uses standards as a benchmark, estimates the general water quality and different specific uses, such as agricultural use, water supply, recreational, protection of aquatic life among others [66, 67].

### 3.6 Different methodologies in water quality indices

In the selection and weighting of parameters of traditional indices, usually, the Delphi methodology is used. However, statistical methods such as Principal Component Analysis

(PCA), Factorial Analysis (FA), and Hierarchical Cluster Analysis (HCA) have been used to reduced subjectivity in several studies [68-69,42,64,30,70-71], as they allow to group parameters that have similar characteristics and thus reduce the number of parameters for the index.

The Analytical Hierarchy Process (AHP) is a multicriteria, mature, easy-to-understand, and implement decision analysis method. Studies such as those of Misaghi et al. (2017) have used this method to establish the weights of parameters (individual and grouped) in the water quality index. In the case of the CCMEWQI, to address the increased contribution of frequency to the final value, studies have been made modifying its original aggregation formula [72]. Finally, fuzzy logic allows combining qualitative and quantitative data, so that researchers have used this approach to develop new water quality indices [73-76].

## 4. CHALLENGES AND PERSPECTIVES OF THE USE OF WATER QUALITY INDICATORS

The use of indicators to visualize the quality of a body of water has great advantages, among other aspects, to show the temporal and spatial variation of quality, identify quality trends and visualize contamination problems, as well as prioritize areas for evaluations, more detailed and help to define priorities for integral water management purposes. However, they are still not enough to reflect the complexity of the phenomena and give a more precise vision of the state of the water.

The use of various statistical methods, as well as the inclusion of qualitative and quantitative parameters weighting, contribute to reduce the subjectivity of the indicators, but they are still insufficient to reflect the state of water quality.

At a general level, the indicators have evolved over time, and the trend includes integrating variables that allow not only the use of physicochemical parameters, but also, biological parameters and recently hydromorphological

indices such as those established by the Water Framework Directive –DMA. Moreover, the integration of biological indicators, it is also necessary to have indicators for different approaches to water quality: planning, statistical and use indicators, among others.

Among the challenges to be achieved is to obtain indicators that reduce or eliminate subjectivity in such a way that they allow to assess the real state of the water, diagnose, and carry out adequate planning aimed at protecting and recovering the ecosystems dependent on these water bodies.

## 5. CONCLUSIONS

Concluding this review, it is recognizable that to date, there is difficulty in defining a single water quality index as a definitive solution. Biological and physicochemical evaluations are necessary and are not interchangeable, insofar as the biological evaluations show the degree to which the ecological balance has been disturbed, meanwhile, the physicochemical variables show the chemical measurement of the concentrations of the pollutants used to identify the sources. However, institutions, agencies, as well as water safety researchers, should try to develop an unique method.

Developing, arranging and maintaining an index can be costly and time consuming, yet it is the best opportunity to succeed in water management and administration.

## REFERENCES

- [1] Falkenmark, M., Mikulski, Z. The Key Role of Water in the Landscape System. *GeoJournal*, 33(4), 1994, pp. 355–363. <https://doi.org/10.1007/BF00806417>
- [2] Oki, T., Kanae, S. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313(5790), 2006, pp.1068–1073. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
- [3] Monforte García, G., Martínez Cantú, P.C. Escenario del agua en México (Water scenario in Mexico). *Cult. Científica y Tecnológica*, (30), 2015, 31–40.
- [4] Rodríguez Miranda, J.P., Serna Mosquera, J.A., Sánchez Céspedes, J.M. Índices De Calidad En Cuerpos De Agua Superficiales En La Planificación De Los Recursos Hídricos (Quality Indices In Surface Water Bodies In Water Resources Planning). *Revista Logos Ciencia y Tecnología*, 8(1), 2016, pp.159–167. <https://doi.org/10.22335/rlct.v8i1.306>
- [5] Sutadian, A.D., Muttill, N., Yilmaz, A.G., Perera, B.J.C. Development of river water quality indices — a review. *Environmental Monitoring Assessment*, 188(1), 2016, pp.58. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>
- [6] Lumb, A., Sharma, T.C., Bibeault, J.-F. A review of genesis and evolution of Water Quality Index (WQI) and some future directions. *Water Quality, Exposure and Health*, 3(1), 2011a, pp.11–24. <https://doi.org/10.1007/s12403-011-0040-0>
- [7] Dash, S., Kalamdhad, A., Understanding the dynamics of heavy metals in a freshwater ecosystem through their toxicity and bioavailability assay. *Environment, Development and Sustainability: A Multidisciplinary Approach to the Theory and Practice of Sustainable Development*, vol. 23, issue 11, No 32, 2021, 16409. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01349-5>
- [8] Abbasi, T., Abbasi, S.A. *Water Quality Indices*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 2012. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-54304-2.00001-4>
- [9] Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., Dobhal, R. Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources*, 1(3), 2013, pp. 34–38. <https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3>
- [10] Darvishi, G., Kootenaie, F.G., Ramezani, M., Lotfi, E., Asgharnia, H. Comparative investigation of river water quality by OWQI, NSFQI and Wilcox indexes (Case study: The Talar River–Iran). *Archives of Environmental Protection*, 42(1), 2016, pp.41–48. <https://doi.org/10.1515/aep-2016-0005>
- [11] Bilgin, A. Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI)



- method and discriminant analysis method: a case study Coruh River Basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190 (9), 2018, pp. 1-11.
- [12] Lopes, O.F., de Jesus, R.M., de Sousa, L.F., Rocha, F.A., da Silva, D.M.L., Amorim, A.F., da Silva, V.H.C., Navoni, J.A. Comparison between water quality indices in watersheds of the Southern Bahia (Brazil) with different land use. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10), 2020, pp.12944-12959. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10941-7>
- [13] Zotou, I., Tsihrintzis, V.A., Gikas, G.D. Water quality evaluation of a lacustrine water body in the Mediterranean based on different water quality index (WQI) methodologies. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 55(5), 2020, pp. 537–548. <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1710956>
- [14] Gitau, M.W., Chen, J., Ma, Z. Water Quality Indices as Tools for Decision Making and Management. *Water Resources Management*, 30(8), 2016, pp. 2591–2610. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1311-0>
- [15] Medeiros, A.C., Freitas Faial, K.R., Freitas Faial, K. do C., da Silva Lopes, I.D., de Oliveira Lima, M., Guimarães, R.M., Mendonça, N.M. Quality index of the surface water of Amazonian rivers in industrial areas in Pará Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 123(1-2), 2017, pp. 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.002>
- [16] Horton, R.K. An index number system for rating water quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 37 (3), 1965, pp.300-306.
- [17] Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. A water quality index- do we dare?. *Water Sewage Works*, 117(10), 1970, pp.339-343.
- [18] Prati, L., Pavanello, R., Pesarin, F. Assessment of surface water quality by a single index of pollution. *Water Research*, 5(9), 1971, pp. 741–751. <https://doi.org/10.1177/1541931213601570>
- [19] Dinius, S.H. Social accounting system for evaluating water resources. *Water Resources Research*, 8(5), 1972, pp. 1159–1177. <https://doi.org/10.1029/WR008i005p01159>
- [20] Dunnette, D.A. A geographically water quality used variable index in Oregon. *Journal Water Pollution Control Federation*, 51(1), 1979, pp. 53–61.
- [21] Martínez de Bascaran, G. El índice de calidad del agua. *Ingeniería Química*, 1976 pp. 45- 49
- [22] Bhargava, D.S. Use of water quality index for river classification and zoning of Ganga River. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, 6(1), 1983, pp. 51–67. [https://doi.org/10.1016/0143-148X\(83\)90029-0](https://doi.org/10.1016/0143-148X(83)90029-0)
- [23] CETESB 2017. Índice de Qualidade das Águas (Water Quality Index). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/> (accessed 19/10/2020).
- [24] Smith, D.G. A better water quality indexing system for rivers and streams. *Water Research*, 24(10), 1990, pp. 1237–1244. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(90\)90047-A](https://doi.org/10.1016/0043-1354(90)90047-A)
- [25] Lumb, A., Halliwell, D., Sharma, T. Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River basin, Canada. *Environmental Monitoring Assessment*, 113(1), 2006, pp. 411–429. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9092-6>
- [26] Cisneros, J. Información y calidad de agua en México (Information and water quality in Mexico). *Trayectorias*, 9(24), 2007, pp. 45–56.
- [27] Samboni Ruiz, N.E., Carvajal Escobar, Y., Escobar, J.C. Revisión de parámetros físicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua (Review of physicochemical parameters as indicators of water quality and contamination). *Ingeniería e Investigación*, 27, 2007, pp. 172–181. <https://doi.org/10.1002/cber.19911241016>
- [28] CCME 2001. Directrices canadienses de calidad ambiental para la protección de la vida acuática, índice CCME de calidad del agua: informe técnico, 1.0. [https://www.ccme.ca/files/Recursos/calculators/soqi\\_tech\\_report\\_e\\_1.1.pdf](https://www.ccme.ca/files/Recursos/calculators/soqi_tech_report_e_1.1.pdf) (accessed 20/10/2020).
- [29] Hamlat, A., Guidoum, A., Koiulala, I. Status and trends of water quality in the Tafna catchment:

- a comparative study using water quality indices. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 7(2), 2017, pp. 228–245. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.155>.
- [30] Gradilla-Hernández, M. S., de Anda, J., Garcia-Gonzalez, A., Montes, C. Y., Barrios-Piña, H., Ruiz-Palomino, P., & Díaz-Vázquez, D. Assessment of the water quality of a subtropical lake using the NSF-WQI and a newly proposed ecosystem specific water quality index. *Environmental monitoring and assessment*, 192(5), 2020, pp. 1-19.
- [31] Torres, P., Cruz, C.H., Patiño, P., Escobar, J.C., Pérez, A. Applying water quality indexes (WQI) to the use of water sources for human consumption. *Ingeniería e Investigación*, 30(3), 2010, pp. 86–95.
- [32] Ewaid, S.H. Water quality evaluation of Al-Gharraf river by two water quality indices. *Applied Water Science*, 7(7), 2017, pp.3759–3765. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0523-z>
- [33] Mena-Rivera, L., Vásquez-Bolaños, O., Gómez-Castro, C., Fonseca-Sánchez, A., Rodríguez-Rodríguez, A., Sánchez-Gutiérrez, R. Ecosystemic Assessment of Surface Water Quality in the Virilla River: Towards Sanitation Processes in Costa Rica. *Water*, 10(7), 2018, pp. 1–16. <https://doi.org/10.3390/w10070845>
- [34] Cude, C.G. Oregon water quality index: A tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(1), 2001, pp.125–137
- [35] CESI 2008. Water quality: national perspective. Environment Canada. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/environmental-indicators.html> (accessed 28/10/2020).
- [36] Lee, G. A sensitivity analysis of the Canadian Water Quality Index. Report for the Canadian Council of Ministers of the Environment prepared by Gartner Lee Limited Markum, on, Canada. 2006. [https://www.ccme.ca/files/Resources/water/water\\_quality/pn\\_1355\\_wqi\\_sensitivity\\_analysis\\_rpt.pdf](https://www.ccme.ca/files/Resources/water/water_quality/pn_1355_wqi_sensitivity_analysis_rpt.pdf) (accessed 25/10/2020)
- [37] CCME 2017. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index, User's Manual 2017 Update, Canadian Council of Ministers of the Environment. [https://www.ccme.ca/files/Resources/calculators/soqi\\_tech\\_report\\_e\\_1.1.pdf](https://www.ccme.ca/files/Resources/calculators/soqi_tech_report_e_1.1.pdf) (accessed 20/10/2020)
- [38] Deeksha, K. Water quality indices used for surface water vulnerability assessment. *International Journal of Environmental Sciences*, 2(1), 2011, pp. 154–173.
- [39] Rubio Arias, O., Ortiz Delgado, C.R., Quintana Ramirez, R.M., Saucedo Terán, R.A., Ochoa Rivero, J.M., Rey Burciaga, N.I. Índice de Calidad de Agua (ICA) en la presa la boquilla en Chihuahua, México (Water Quality Index (WQI) at la boquilla dam in Chihuahua, Mexico). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 1(2), 2014, pp. 139–150.
- [40] Sedeño-Díaz, J.E., López-López, E. Water quality in the Río Lerma, Mexico: An overview of the last quarter of the twentieth century. *Water Resources Management*, 21(10), 2007, pp. 1797–1812. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9128-x>
- [41] De La Mora-Orozco C., Flores-Lopez H., Rubio-Arias H., Chavez-Duran A. and Ochoa-Rivero J. Developing a Water Quality Index (WQI) for an Irrigation Dam. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14, 2017, 439, doi:10.3390/ijerph14050439 [www.mdpi.com/journal/ijerph](http://www.mdpi.com/journal/ijerph).
- [42] Quevedo Castro A. Bandala E.R., Rangel Peraza J.G., Amabilis Sosa L.E. Developing a water quality index in a tropical reservoir using multiparameter meter. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 8(4), 2018. DOI:10.2166/washdev.2018.049
- [43] Salcedo, E., Hoyos, S., Esteller, M., Morales, M. Application of water quality index to evaluate groundwater quality (temporal and spatial variation) of an intensively exploited aquifer (Puebla valley, Mexico). *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. 188. DOI:10.1007/s10661-016-5515-9.
- [44] Rivera-Rodríguez, D.A., Beltrán-Hernández, R.I., Lucho-Constantino, C.A. et al. Water quality indices for groundwater impacted by geogenic background and anthropogenic pollution: case study in Hidalgo,

- Mexico. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 16, 2019, pp. 2201–2214. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1852-2>
- [45] Samboni Ruiz, N.E., Carvajal Escobar, Y., Escobar, J.C. Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua (Review of physicochemical parameters as indicators of water quality and contamination). *Ingeniería e Investigación*, 27, 2007, pp. 172–181. <https://doi.org/10.1002/cber.19911241016>
- [46] Dinius, S.H. Desing of an index of water quality. *Journal of the American Water Resources Association*, 23, 1988, pp. 833–843
- [47] Guzmán, A.M. Las Aguas Superficies. Diagnóstico. Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial del Estado de Jalisco. Marco Físico. Instituto de Limnología. Universidad de Guadalajara. Guadalajara. 1997. 125 pp. [En línea] Disponible en: <http://www.acude.udg.mx/jalisciencia/diagnostico/fisico/fisag-sup.pdf>
- [48] León Vizcaíno, L.F. Indices de Calidad del Agua (ICA), Forma de Estimarlos y Aplicación en la Cuenca Lerma-Chapala (Water Quality Indices (WQI), How to Estimate Them and Application in the Lerma-Chapala Watershed). *Water Resource* 20, 36, 1974.
- [49] Gobierno de México. Comisión Nacional del Agua. Portal de Sistemas de Información del Agua. Retrieved from: <https://app.conagua.gob.mx/sistemasdeagua/> (accessed 25/10/2020).
- [50] Casillas-García, L.F.; de Anda, J.; Yebra-Montes, C.; Shear, H.; Díaz-Vázquez, D.; Gradilla-Hernández, M.S. Development of a specific water quality index for the protection of aquatic life of a highly polluted urban river. *Ecol. Indic.*, 129, 2021, 107899.
- [51] Ramírez, A., Restrepo, R. y Viña, G., Cuatro índices de contaminación para caracterización de aguas continentales. *Formulaciones y aplicación, Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1 (3), 1997, pp. 135- 153.
- [52] Ramírez, A. y Viña, G. *Limnología colombiana. Aportes a su conocimiento y estadísticas de Análisis*, BP Exploration - Univ. Jorge Tadeo Lozano, Santafé de Bogotá. 1998.
- [53] Fernández, N. Solano, F. Ramos, G. Physico-chemical water quality indexes- a comparative review *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 2, núm. 1, 2004, pp. 19-30.
- [54] Ramírez, A. *Ecología aplicada. Diseño y análisis estadístico*, Univ. Jorge Tadeo Lozano, Santafé de Bogotá. 1999.
- [55] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM 2018. Estudio Nacional del Agua. Bogotá:Ideam:452, 2018.
- [56] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM 2020. Hoja metodológica del Promedio de Sólidos Suspendidos Totales (PSST) (Versión 1,1). 2020, 7 p.
- [57] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM 2020. Hoja metodológica del Índice de calidad del agua (Versión 1,1). 2020, 12 p.
- [58] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM 2020. Hoja metodológica del Índice de alteración potencial de la calidad del agua (Versión 1,1). 2020, 16 p.
- [59] Almeida, C., González, S.O., Mallea, M., González, P. A recreational water quality index using chemical, physical and microbiological parameters. *Environmental Science Pollution Research*, 19(3), 2012, pp. 3400–3411. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0865-5>
- [60] Nagels, J.W., Davies-Colley, R.J., Smith, D.G. A water quality index for contact recreation in New Zealand. *Water Science and Technology*, 43(5), 2001, pp. 285–292. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0307>
- [61] Azevedo Lopes, F.W., Davies-Colley, R.J., Von Sperling, E., Magalhães, A.P. A water quality index for recreation in Brazilian freshwaters. *Journal of Water and Health*, 14(2), 2016, pp. 243–254. <https://doi.org/10.2166/wh.2015.117>
- [62] Boyacıoglu, H. and Boyacıoglu, H. Ecological water quality index associated with factor analysis to classify surface waters. *Water Supply*, 20(5), 2020, pp. 1884–1896. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.096>
- [63] Bhargava, D.S. Expression for drinking water supply standards. *Journal of Environmental Engineering*, 111(3), 1985, pp. 304–316. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1080-4267\(1985\)111:3\(304\)<1.0.TX:1;1-304::AID-JEE1113043040>3.0.CO;2](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1080-4267(1985)111:3(304)<1.0.TX:1;1-304::AID-JEE1113043040>3.0.CO;2)

- org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1985)111:3(304)
- [64] Jahin, H.S., Abuzaid, A.S., Abdellatif, A.D. Using multivariate analysis to develop irrigation water quality index for surface water in Kafr El-Sheikh Governorate, Egypt. *Environmental Technology and Innovation*, 17, 2020, 100532. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100532>
- [65] Misaghi, F., Delgosha, F., Razzaghmanesh, M., Myers, B. Introducing a water quality index for assessing water for irrigation purposes: A case study of the Ghezel Ozan River. *Science of the Total Environment*, 589, 2017, pp.107–116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.226>
- [66] Guzmán-Colis, G., Thalasso, F., Rodríguez-Narciso, S., Guerrero-Barrera, A.L., Avelar-González, F.J. Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, México (Spatio-temporal evaluation of the water quality of the San Pedro River in the State of Aguascalientes, Mexico). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(2), 2011, pp. 89–102.
- [67] Chacón, L., Arias, V., Barrantes, K., Beita-Sandí, W., Reyes, L., Achí, R. Enterococci as a key parameter for water quality index: Purires River, Costa Rica. *Journal of Water and Health*, 16(6), 2018, pp.1007–1017. <https://doi.org/10.2166/wh.2018.087>
- [68] Koçer, M.A.T., Sevgili, H. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms. *Ecological Indicators*, 36, 2014, pp. 672–681. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.09.034>
- [69] Sun, W., Xia, C., Xu, M., Guo, J., Sun, G. Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River. *Ecological Indicators*, 66, 2016, pp. 306–312. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.054>
- [70] Tripathi, M., Singal, S.K. Use of Principal Component Analysis for parameter selection for development of a novel Water Quality Index: A case study of river Ganga India. *Ecological Indicators*, 96, 2019a, pp. 430–436. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.025>
- [71] Tripathi, M., Singal, S.K. Allocation of weights using factor analysis for development of a novel water quality index. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 183, 2019b, pp. 109510. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109510>
- [72] Dao, V., Urban, W., Hazra, S.B. Introducing the modification of Canadian Water Quality Index. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 2020, 100457. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100457>
- [73] Lermontov, A., Yokoyama, L., Lermontov, M., Machado, M.A.S. River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil. *Ecological Indicators*, 9(6), 2009, pp. 1188–1197. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.02.006>
- [74] Gharibi, H., Sowlat, M.H., Mahvi, A.H., Mahmoudzadeh, H., Arabalibeik, H., Keshavarz, M., Karimzadeh, N., Hassani, G. Development of a dairy cattle drinking water quality index (DCWQI) based on fuzzy inference systems. *Ecological Indicators* 20, 2012, pp. 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.02.015>
- [75] Choupina, A., Pereira, E.T., Soares, S.S., Arruda, P., Ribeiro, F.L., Scalize, P.S. Water Quality Index: is it Possible to Measure with Fuzzy Logic? *Optimization Engineering Problems*, 2018, pp. 131–159.
- [76] Nayak, J.G., Patil, L.G., Patki, V.K. Development of water quality index for Godavari River (India) based on fuzzy inference system. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 2020, 100350. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100350>
- [77] Birk S., Bonne, W., Borja, A., Brucet, S., Courrat, A., Poikane, S., Solimini, A., van de Bund, W., Zampoukas, N., Hering, D. Three hundred ways to assess Europe's surface waters: An almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive, *Ecological Indicators*, 18, 2012, pp. 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.10.009>
- [78] Akkoyunlu, A., Akiner, M.E. Pollution evaluation in streams using water quality indices: A case study from Turkey's Sapanca Lake Basin. *Ecological*

- Indicators, 18, 2012, pp. 501–511. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.12.018>
- [79] Effendi, H., Romanto, Wardiatno, Y. Water Quality Status of Ciambulawung River, Banten Province, Based on Pollution Index and NSF-WQI. *Proc,edia Environmental Sciences*, 24, 2015, pp. 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.030>
- [80] Gupta, N., Pandey, P., Hussain, J. Effect of physicochemical and biological parameters on the quality of river water of Narmada, Madhya Pradesh, India. *Water Science*, 31(1), 2017, pp. 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2017.03.002>
- [81] Barakat, A., Meddah, R., Afdali, M., Touhami, F. Physicochemical and microbial assessment of spring water quality for drinking supply in Piedmont of Béni-Mellal Atlas (Morocco). *Physics and Chemistry of the Earth*, 104, 2018, pp. 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.01.006>
- [82] Fathi, E., Zamani-Ahmadmahmoodi, R., Zare-Bidaki, R. Water quality evaluation using water quality index and multivariate methods, Beheshtabad River, Iran. *Applied Water Science*, 8(7), 2018, 210. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0859-7>
- [83] Rimoldi, F., Peluso, L., Bulus Rossini, G., Ronco, A.E., Demetrio, P.M. Multidisciplinary approach to a study of water and bottom sediment quality of streams associated with mixed land uses: Case study Del Gato Stream, La Plata (Argentina). *Ecological Indicators* 89, 2018, pp. 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.063>
- [84] Dede, O.T., Telci, I.T., Aral, M.M. The use of water quality index models for the evaluation of surface water quality: a case study for Kirmir Basin, Ankara, Turkey. *Water Quality, Exposure and Health*, 5(1), 2013, pp. 41–56. <https://doi.org/10.1007/s12403-013-0085-3>
- [85] Zotou, I., Tsihrintzis, V.A., Gikas, G.D. Performance of Seven Water Quality Indices (WQIs) in a Mediterranean River. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(8), 2019, pp.1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7652-4>
- [86] Smith, D.G. A new form of water quality index for rivers and streams. *Water Science and Technology*, 21(2), 1989, pp.123–127. <https://doi.org/10.2166/wst.1989.0038>
- [87] Bascarán, G. Establecimiento de una metodología para conocer la calidad del agua. *Bol. Inf. Medio Ambiente*, 9, 1979, pp.30-51. CIMA, MOPU, Madrid.
- [88] Rojas O. Índices de Calidad del agua en Fuente de Captación, en Seminario Internacional sobre calidad del agua para consumo, Cali. 1991.
- [89] Montoya, M., Contreras, C., García, V. Estudio Integral de la Calidad del Agua en el Estado de Jalisco. (Integral Study of Water Quality in the State of Jalisco), Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Lerma-Santiago. México: Guadalajara. 1997.
- [90] Pesce, S.F., Wunderlin, D.A. Use of Water Quality Indexes To Verify the Córdoba City (Argentina) on Suquía River. *Water Research*, 34(11), 2000, pp.2915–2926.
- [91] Lumb, A., Sharma, T.C., Bibeault, J.F., Klawunn, P. A Comparative Study of USA and Canadian Water Quality Index Models. *Water Quality, Exposure and Health*, 3(3-4), 2011b, pp.203–216. <https://doi.org/10.1007/s12403-011-0056-5>
- [92] Espejo, L., Krestchmer, N., Oyarzún, J., Meza, F., Núñez, J., Maturana, H., Soto, G., Oyarzo, P., Garrido, M., Suckel, F., Amezaga, J., Oyarzún, R. Application of water quality indices and analysis of the surface water quality monitoring network in semiarid North-Central Chile. *Environmental Monitoring Assessment*, 184(9), 2012, pp. 5571–5588. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2363-5>
- [93] Hurley, T., Sadiq, R., Mazumder, A. Adaptation and evaluation of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality. *Water Research*, 46(11), 2012, pp.3544–3552. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.061>
- [94] Gikas, G.D., Sylaios, G.K., Tsihrintzis, V.A., Konstantinou, I.K., Albanis, T., Boskidis, I. Comparative evaluation of river chemical status based on WFD methodology and CCME water quality index. *Sciences of the Total Environment*

- 745, 2020, 140849. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140849>
- [95] Ocampo-Duque, W., Osorio, C., Piamba, C. Schuhmacher, M. Domingo, J. Water quality analysis in rivers with non-parametric probability distributions and fuzzy inference systems: Application to the Cauca River, Colombia. *Environment international*. 52C. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.11.007>
- [96] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, 2004. Plan de Manejo integral de la Cuenca del Río Cauca. 2004. Retrieved from: <https://ecopedia.cvc.gov.co/rios/rio-cauca/plan-de-manejo-integral-de-la-cuenca-del-rio-cauca>, (accessed 28/10/2020).
- [97] Suratman, S., Sailan, I., Hee, Y.Y., Latif, M.T. A preliminary study of water quality index in Terengganu River basin, Malaysia. *Sains Malaysiana*, 44(1), 2015, pp.67–73. <https://doi.org/10.17576/jsm-2015-4401-10>
- [98] Naubi, I., Zardari, N.H., Shirazi, S.M., Ibrahim, N.F.B., Baloo, L. Effectiveness of Water Quality Index for Monitoring Malaysian River Water Quality. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(1), 2016. <https://doi.org/10.15244/pjoes/60109>
- [99] Boyacioglu, H. Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water Sa*, 33(1), 2007, pp.101–106
- [100] Sargaonkar, A., Deshpande, V. Development of an overall index of pollution for surface water based on a general classification scheme in Indian context. *Environmental Monitoring and Assessment*, 89(1), 2003, pp.43–67. <https://doi.org/10.1023/A:1025886025137>
- [101] Hamlat, A., Guidoum, A., Koilala, I. Status and trends of water quality in the Tafna catchment: a comparative study using water quality indices. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 7(2), 2017, pp.228–245. <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.155>
- [102] Sutadian, A.D., Muttill, N., Yilmaz, A.G., Perera, B.J.C. Development of a water quality index for rivers in West Java Province, Indonesia. *Ecological Indicators*, 85, 2018, pp. 966–982. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.049>

## CRONOESTRATIGRAFÍA DEL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA: UNA REVISIÓN

### Chronostratigraphy of the Aburrá Valley: a review

Santiago Noriega Londoño<sup>1</sup>, Mateo Arboleda Giraldo<sup>2</sup>,  
Sergio Andrés Restrepo Moreno<sup>3</sup>, María Isabel Marín Cerón<sup>4</sup>

<sup>1-2</sup>Universidad EAFIT, Departamento de Ciencias de la Tierra, Medellín, Colombia. <sup>3</sup>Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Medellín, Colombia. Department of Geological Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida, USA. <sup>4</sup>Universidad EAFIT, Departamento de Ciencias de la Tierra, Medellín, Colombia. Email: <sup>1</sup>[snoriegal@eafit.edu.co](mailto:snoriegal@eafit.edu.co), <sup>2</sup>[marbole8@eafit.edu.co](mailto:marbole8@eafit.edu.co), <sup>3</sup>[sarestrepom@unal.edu.co](mailto:sarestrepom@unal.edu.co), <sup>4</sup>[mmarince@eafit.edu.co](mailto:mmarince@eafit.edu.co)

(Recibido octubre 19 de 2021 y aceptado diciembre 02 de 2021)

#### Resumen

El Valle de Aburrá (VA), localizado en la porción norte de la Cordillera Central de Colombia, se encuentra cubierto por extensas formaciones superficiales de diversos tipos. Estos depósitos registran la respuesta morfodinámica de diferentes procesos tectónicos y erosivos, gobernados por las condiciones de clima húmedo tropical y la actividad geodinámica reciente de los Andes del Norte. Este trabajo presenta una revisión del estado del arte de la cronoestratigrafía de las formaciones superficiales del VA, como una herramienta para cuantificar los procesos geomorfológicos responsables de la conformación y evolución del VA. Los datos compilados abarcan el intervalo desde el Plioceno tardío al Holoceno tardío, registrando la respuesta del paisaje a la última fase de la Orogenia Andina. Esta revisión resalta la necesidad de producir nuevos datos cronológicos y estratigráficos en el Cuaternario, como base para los modelos de evolución del paisaje de los cuales necesariamente se debe surtir la reflexión, el trabajo y la praxis sobre la evaluación de amenazas, las estrategias de gestión del riesgo y los planes de ordenamiento territorial, particularmente en el contexto de los grandes centros urbanos de la región Andina.

**Palabras clave:** *Río Medellín-Porce, Formaciones superficiales, Depósitos de vertiente, Geocronología del Cuaternario, Cordillera Central, Andes Colombianos.*

#### Abstract

The Aburrá Valley (VA), located in the Central Cordillera of Colombia, is covered by extensive surface formations of various types. These deposits record the morphodynamic response of different tectonic and erosive processes, controlled by humid tropical climatic conditions and recent geodynamic activity of the Northern Andes. This contribution presents a review of the state of the art of the chronostratigraphy of the surface formations of the VA, as a tool to quantify the geomorphological processes responsible for the conformation and evolution of the VA. The compiled data cover an interval from the late Pliocene to the late Holocene, recording the response of the landscape to the last phase of the Andean Orogeny. This review highlights the need to produce new chronological and stratigraphic data in the Quaternary, as a basis for understanding landscape evolution models, and hence procure a coherent approach to hazard assessment studies, risk management strategies and land use planning, particularly in the context of large urban centers of the Andean region.

**Key words:** *Medellín-Porce River, Surficial formations, Hillslope deposits, Quaternary geochronology, Central Mountain, Colombian Andes.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El Valle de Aburrá (VA) corresponde a un conjunto de depresiones unidas por el río Medellín, el cual drena la parte alta de la cuenca del río Porce, en la Cordillera Central de Colombia (Figura 1). En general, el VA está orientado en sentido SW-NE, segmentando el Altiplano Antioqueño en dos. Topográficamente se caracteriza por un fondo de valle relativamente estrecho (~2 km) situado a elevaciones entre 1300 y 1900 m, y confinado por flancos montañosos y de pendientes altas que alcanzan los 3000 m (i.e., relieve relativo de más de ~1500 m).

Desde el punto de vista litológico, el VA está desarrollado sobre rocas metamórficas e ígneas del Macizo Central Antioqueño [1]. Estas rocas exhiben en su mayoría un alto grado de meteorización, con coberteras de sarcolitos de espesores variables, que poseen alta susceptibilidad a la remoción y transporte de sedimentos sobre las laderas y los canales fluviales, generando un sistema complejo de depósitos de vertiente y depósitos aluviales [2]–[5], simplificados aquí bajo la denominación de formaciones superficiales.

Estas formaciones han sido interpretadas como producto de los cambios en los niveles base y los avances de los frentes de erosión que desencadenan procesos de producción y transporte de sedimentos [3], [6]. Estos procesos se asocian al levantamiento de la superficie topográfica y la respuesta del paisaje durante los paroxismos morfotectónicos del Cenozoico tardío [7], [8]. Sin embargo, las formaciones superficiales del VA se encuentran parcialmente cartografiadas, y su marco geocronológico se desconoce aún con detalle a pesar de los datos existentes [2], [4], [9]–[15].

En las últimas décadas, la aplicación de técnicas de datación del Cuaternario ha tomado relevancia debido a su capacidad para estimar la cronología y las tasas de variación de los procesos geomorfológicos registrados en las formaciones superficiales [16]–[20]. Sin embargo, en Colombia, el uso de estas técnicas es aún embrionario. En este sentido, la importancia de entender la distribución,

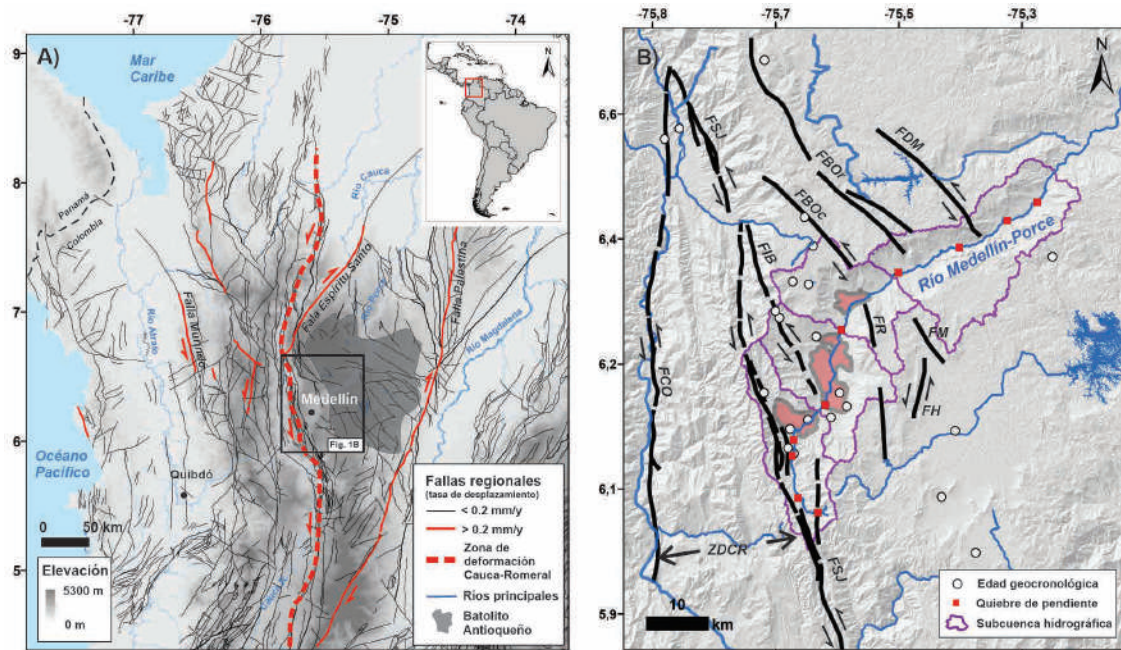
origen y cronología de estas formaciones es insoslayable, puesto que se requiere cuantificar los procesos responsables de la transformación del paisaje, y por tanto del territorio, en el tiempo, y a partir de esto evaluar los roles relativos de los diferentes procesos en la evolución del paisaje. Esta información es fundamental para estimar las relaciones de magnitud-frecuencia de los procesos geomorfológicos.

Conocer la cronoestratigrafía de una región permite estimar tasas de recurrencia de diferentes amenazas naturales como base del ordenamiento territorial [20], [21]. En efecto, si se conoce la edad de un conjunto de terrazas aluviales, es posible estimar las tasas de incisión fluvial [22]–[24], mientras que documentar la temporalidad de un depósito es útil para estimar la edad máxima de fallas activas, o la respuesta morfodinámica a las variaciones climáticas durante el Holoceno [25]–[27]. También es posible estimar la frecuencia de eventos de inundación, grados de meteorización y movimientos en masa [16], [28]. En síntesis, se dificulta generar una aproximación confiable al conocimiento de las tasas de recurrencia de las amenazas naturales (relaciones de magnitud-frecuencia), sin tener un marco temporal bien establecido [29], [30].

Este trabajo presenta una revisión de las edades geocronológicas reportadas en el VA con el objetivo de documentar el estado actual de la cronoestratigrafía de las formaciones superficiales en el contexto geográfico-geológico de los Andes colombianos, y así establecer los vacíos de conocimiento para direccionar la generación de nuevos datos cronoestratigráficos.

El VA además alberga un Área Metropolitana con 10 municipios (Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Itagüí, Envigado, Sabaneta, La Estrella, y Caldas), y una población estimada de ~4 millones de habitantes [31], bajo unas condiciones medioambientales que favorecen la ocurrencia de amenazas naturales de tipo hidrometeorológico y/o geofísico, [32], y un grado de exposición/vulnerabilidad que impacta directamente en las condiciones socioeconómicas de la población [33].





**Figura 1.** Marco tectónico simplificado del VA. (A) Mapa de localización del VA en la transición entre el Batolito Antioqueño y la zona de deformación Cauca-Romeral. (B) Mapa simplificado de las fallas que controlan el VA, las tres cuencas tectónicas asociadas, y la porción norte del VA en sentido NE.

## 2. SÍNTESIS DE LA GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA DEL VALLE DE ABURRÁ

El VA se localiza en la porción noroccidental de la Cordillera Central de los Andes colombianos, específicamente sobre el Macizo Central [1], [34] y la zona de deformación de Cauca-Romeral [35], [36] (Figura 1). Este valle tiene orientación SSW-NNE a SW-NE y separa las superficies de erosión del Altiplano antioqueño en dos: Altiplano Norte (Santa Rosa, Llanos de Cuivá) y Altiplano Sur (Rionego-La Unión).

En el VA el régimen de precipitación es bimodal con picos en los periodos marzo, abril, mayo (MAM) y septiembre, octubre, noviembre (SON), intervalos que coinciden con los registros de movimientos en masa [37]. Registros máximos de lluvia de ca. 3609 mm fueron reportados en 1999, y valores mínimos de 2352 mm en 1991 [32]. Tectónicamente, esta porción de los Andes del Norte es producto de la convergencia entre las placas de Nazca-

Farallón, Caribe y Suramérica que han generado un complejo sistema subductivo-acrecional [36], [38]–[41] (Figura 1). La deformación está particionada por bloques litotectónicos, separados por fallas regionales con orientación predominante Norte-Sur (e.g. Cauca-Romeral, Palestina, Otú-Pericos, etc.). Esta característica de orden regional condiciona la morfología y distribución de cadenas montañosas, altiplanos, cañones y valles interandinos [6], [42]–[44].

Litológicamente, el VA está conformado por rocas metamórficas Permo-Triásicas, intruidas por cuerpos graníticos Cretácicos de afinidad continental al oriente, puestas en contacto fallado con rocas ígneas ultramáficas y secuencias vulcano-sedimentarias de edad Cretácica y afinidad oceánica al occidente [45]–[47]. Las laderas y los fondos de los drenajes en el VA se encuentran cubiertos por diversos niveles de depósitos de vertiente y depósitos aluviales con edades entre el Plioceno tardío y el Holoceno [2], [4], [6], [12].

Basados en información geofísica, geomorfológica, estratigráfica y geocronológica, autores como [2], [4], [6], plantean un modelo acoplado entre procesos tectónicos y erosivos, demostrando la ocurrencia de al menos tres cuencas tectónicas tipo *pull-apart* en el VA. Así, las cuencas Itagüí, Medellín y Bello, presentan características morfométricas y estratigráficas diferentes, en un ambiente de deformación transpresiva de escala regional, y un relleno sedimentario controlado por un clima húmedo tropical.

En términos de geología estructural el VA presenta una influencia directa de la zona de deformación del Sistema Cauca-Romeral a través de las fallas San Jerónimo (FSJ), la Iguaná-Boquerón (FIB), Belmira (FB), Don Matías (FDM) (Figura 1). Estas fallas de orientación preferencial N-S a N30W marcan un desplazamiento lateral izquierdo y afectan el basamento del VA mostrando una fuerte expresión geomorfológica en los ancones Norte y Sur y quiebres de pendiente del perfil longitudinal del río Medellín [3], [6] (Figura 2).

Adicionalmente el carácter erosivo del valle de Aburrá es innegable teniendo en cuenta que actualmente el río principal y su amplia red de tributarios (quebradas) enlaza las diferentes cuencas tectónicas, además de conectar, vía incisión fluvial y en numerosos quiebres de pendiente las extensas y bien preservadas superficies de erosión de la Cordillera Central con el fondo del VA [6], [43], [44]. Estas superficies de erosión que conforman el amplio dominio geográfico del Altiplano Antioqueño, en el que el VA está inserto, se distribuyen de manera escalonada entre 2600 y 700 m [6], [43], [48] y constituyen importantes marcadores morfotectónicos y cronoestratigráficos para documentar la evolución del paisaje [7], [49], a lo largo de los eventos de levantamiento tectónico de las fases morfotectónicas Proto-Andina, en la transición Oligo-Mioceno, y Eu-Andinas, del Mioceno temprano al tardío (*sensu* [50]).

En este trabajo se parte de la propuesta de tres sub-cuencas tectónicas que conforman el VA planteadas por [6], y adicionalmente incluye la porción norte del VA

moldeada sobre rocas graníticas del Batolito Antioqueño, llamada sub-cuenca Barbosa (ver [51]) (Figura 3).

### 3. CRONOESTRATIGRAFÍA DE LAS FORMACIONES SUPERFICIALES EN EL VA

#### 3.1. Revisión de edades absolutas reportadas en el VA

Con el objetivo de actualizar el estado del conocimiento sobre la cronoestratigrafía del VA, en este trabajo se realizó una compilación y revisión de las edades absolutas de formaciones superficiales reportadas en la literatura, teniendo en cuenta el método geocronológico y el tipo de mineral o material analizado. Esta revisión abarca las publicaciones disponibles en las bases de datos académicas, revistas nacionales e internacionales, bibliotecas, y centros de información en el intervalo 1963 y 2021.

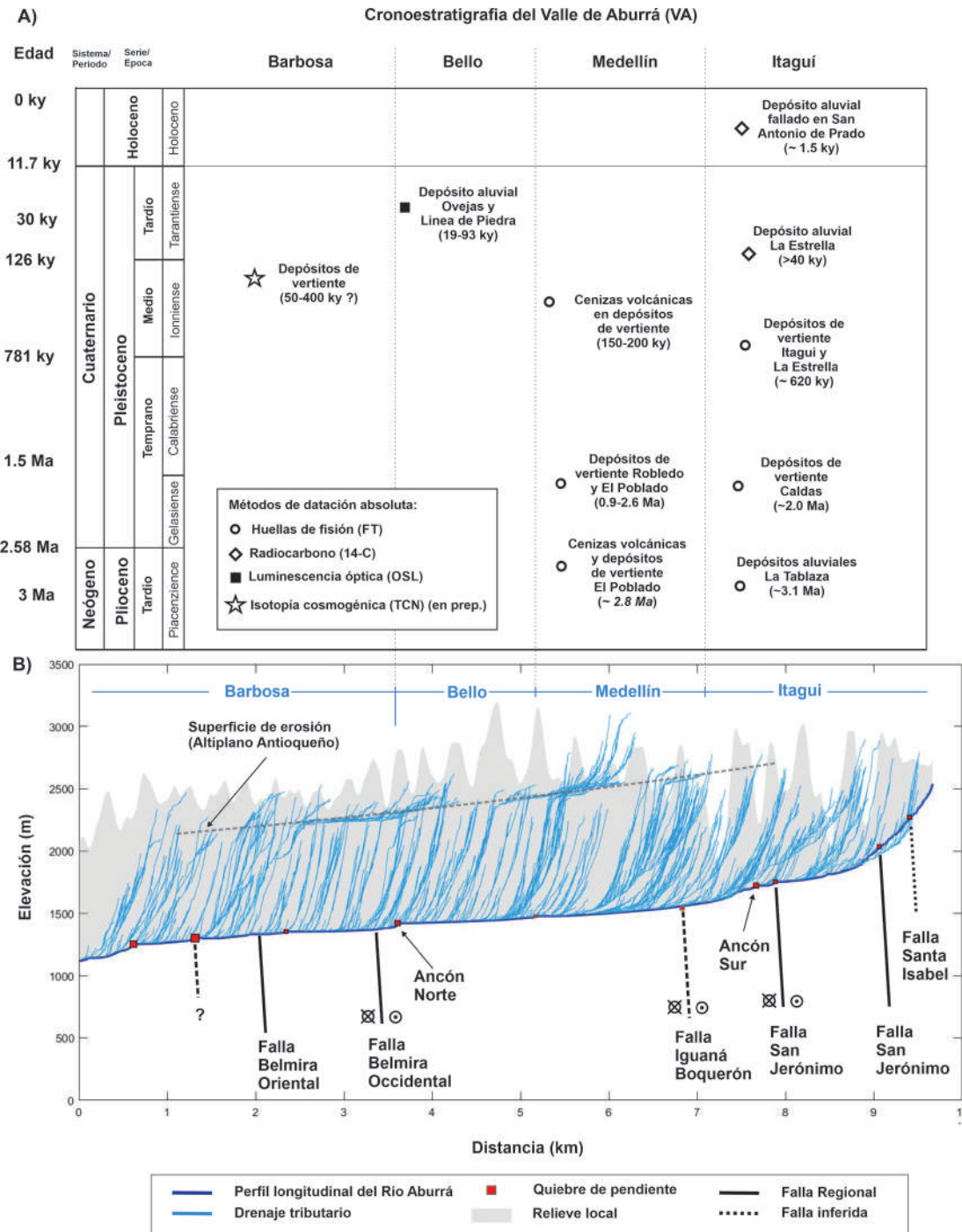
En la revisión se reportan un total de 24 edades absolutas. De estas, 16 fueron medidas con el método de huellas de fisión en circones obtenidos a partir de material volcánico intercalado en algunos depósitos de vertiente [2], [4], [9]–[11], [13], [14], [52], 2 edades se reportan utilizando el método de radiocarbono  $^{14}\text{C}$  [4], [11], y 6 con el método de fotoluminiscencia óptica [53]. Un conjunto de datos preliminares obtenidos mediante técnicas de isotopía cosmogénica [15], también han sido incluidos aquí. Detalles de los datos geocronológicos compilados se presentan en la Tabla 1.

#### 3.2. Cronoestratigrafía del VA por cuencas tectónicas

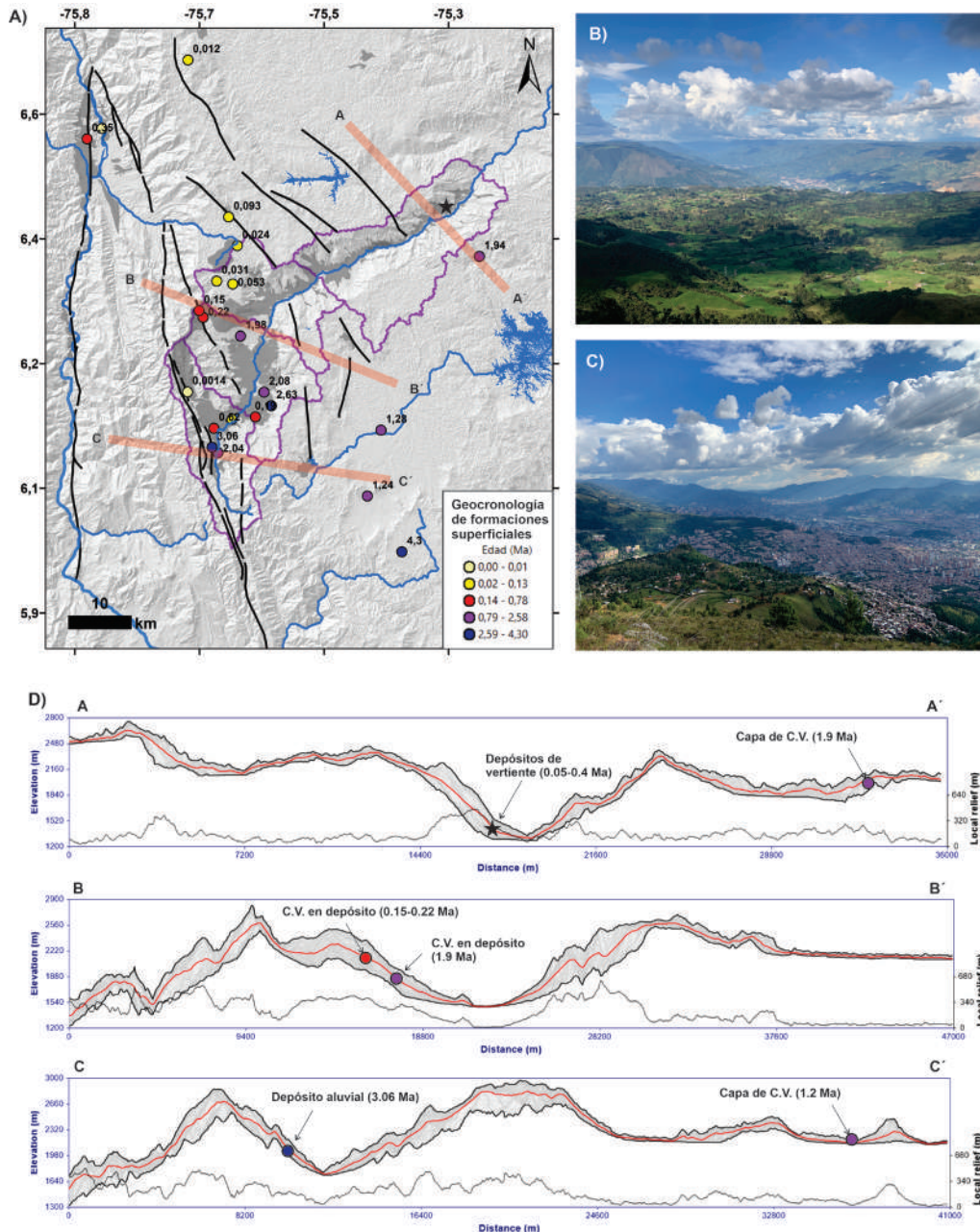
La cronoestratigrafía de cada sub-cuenca permite identificar y comparar las características de cada uno de los sectores del VA. En cada una de estas se presenta una agrupación de formaciones superficiales las cuales podrían estar relacionadas entre sí, pero también presentan una considerable variación según su ubicación espacial y altitudinal dentro del VA. La Figura 2 resume la distribución espacial de las formaciones superficiales presentes en el VA a lo largo del perfil longitudinal del Río Medellín-Porce.

**Tabla 1.** Datos geocronológicos compilados y revisados en este artículo.

Cuenca tectónica	Ubicación	Geoforma/Material	Método	Edad (Ma)	Error (Ma)	Referencia
Itagüí	Caldas, Sur	Circones de terrazas aluviales deformadas	Huellas de fisión	3.06		[13]
Itagüí	Caldas, Sur	Circones de terrazas aluviales deformadas	Huellas de fisión	2.04	±0.12	[13]
Itagüí	La Estrella, Sur	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	0.62		[14]
Itagüí	Montesacro, Sur	Turba en depósitos aluviales	Radiocarbono	> 0.040		[4]
Itagüí	de Prado, Suroccidente	Paleosuelo en depósito aluvial	Radiocarbono	0.0014	±0.00005	[11]
Medellín	Robledo, Occidente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	1.98	±0.42	[9]
Medellín	El Poblado, Oriente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	0.19	±0.02	[4]
Medellín	Boquerón, Occidente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	0.22	±0.05	[4]
Medellín	Boquerón, Occidente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	0.15		[14]
Medellín	El Poblado, Suroriente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	1.46	±0.08	[2]
Medellín	El Poblado, Suroriente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	1.84	±0.12	[2]
Medellín	El Poblado, Suroriente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	2.33	±0.13	[2]
Medellín	El Poblado, Suroriente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	2.63	±0.16	[2]
Medellín	El Poblado, Suroriente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	1.45	±0.13	[2]
Medellín	El Poblado, Suroriente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	2.09	±0.11	[2]
Medellín	El Poblado, Suroriente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	2.6	±0.17	[2]
Medellín	Envigado, Suroriente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	1.78	±0.08	[2]
Medellín	Envigado, Suroriente	Circones de cenizas volcánicas en depósitos de vertiente	Huellas de fisión	0.94	±0.05	[2]
Bello	Ovejas, Noroccidente	Cuarzo (línea de Piedra)	Luminiscencia óptica	0.024	±0.004	[53]
Bello	Ovejas, Noroccidente	Cuarzo (línea de Piedra)	Luminiscencia óptica	0.031	±0.005	[53]
Bello	Ovejas, Noroccidente	Cuarzo (línea de Piedra)	Luminiscencia óptica	0.019	±0.002	[53]
Bello	Ovejas, Noroccidente	Cuarzo (línea de Piedra)	Luminiscencia óptica	0.093	±0.01	[53]
Bello	Ovejas, Noroccidente	Cuarzo (depósito aluvial)	Luminiscencia óptica	0.036	±0.005	[53]
Bello	Ovejas, Noroccidente	Cuarzo (depósito aluvial)	Luminiscencia óptica	0.053	±0.006	[53]
Barbosa	Barbosa, Norte	Cuarzo (Bloque de roca en depósito de vertiente)	Isotopía cosmogénica <sup>10</sup> Be	0.05-0.40		[15]



**Figura 2.** Perfil longitudinal Río Medellín-Porce y distribución espacial y temporal de las formaciones superficiales para las cuatro sub-cuencas del VA. (A) Tabla cronoestratigráfica compilada para el VA. (B) Perfil longitudinal del río Medellín-Aburrá indicando la distribución espacial de los quiebres de pendiente y su relación con las estructuras que controlan el basamento del VA.



**Figura 3.** Síntesis de la revisión cronoestratigráfica del VA. (A) Distribución espacial de las edades geocronológicas de las formaciones superficiales del VA (polígonos grises). (B) Vista al NE desde el Alto de Baldías (~3200 msnm), al fondo se ve el VA en su sección norte (i.e., Bello-Barbosa). (C) Vista al SW desde Santa Elena (~2500 msnm), al fondo se ve la parte superior del VA, en la transición de las cuencas tectónicas de Medellín e Itagüí. (D) Morfología del VA expresada en tres perfiles topográficos transversales (*Swath profiles*) con un ancho de 2 km, indicados como líneas rojas en la Figura 3A, y el relieve relativo asociado a cada uno. Nótese también la relación de edades en cada perfil, como marcador de la historia de evolución de las formaciones superficiales dentro y fuera del VA.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos cronoestratigráficos compilados y revisados en este estudio permiten establecer el estado del arte de la cronoestratigrafía de las formaciones superficiales del VA. Los resultados muestran que la producción de edades geocronológicas en el VA se ha realizado principalmente mediante técnicas de huellas de fisión, radiocarbono, luminiscencia óptica, y recientemente edades derivadas de concentraciones  $^{10}\text{Be}$ . Estas edades abarcan un intervalo entre el Plioceno tardío (3.06 Ma), y el Holoceno tardío (1.4 ky) (Figura 2).

Las edades más antiguas se concentran en las sub-cuencas superiores (Itagüí y Medellín) sugiriendo procesos de apertura y formación de un proto-VA durante el Plioceno. Adicionalmente, estas sub-cuencas poseen un registro cronoestratigráfico que se extiende hasta el Pleistoceno tardío (Itagüí) y Pleistoceno medio (Medellín), donde los depósitos de vertiente presentan depositación telescópica y características geomorfológicas y morfoestratigráficas relativamente similares en lo que se conoce como el Valle Superior (p.e. [4], [6]). Cabe anotar que la sub-cuenca de Itagüí posee además las edades más recientes obtenidas por el método de radiocarbono.

Las edades reportadas en la sub-cuenca Bello se localizan fuera del VA y registran los procesos superficiales de finales del Pleistoceno en el Llano de Ovejas, justo al lado de las elevaciones máximas del VA que corresponden al Alto de Baldías (>3000 msnm). Por el contrario, la falta de existencia de edades geocronológicas en las sub-cuencas Bello y Barbosa, no permiten realizar una correlación cronoestratigráfica, incluso aún cuando este sector comparte características morfoestratigráficas similares entre sí (e.g., depósitos de vertiente de Copacabana, Girardota, El Hatillo, Barbosa), así como con la sub-cuenca Medellín (e.g., depósitos de vertiente derivados de rocas ultramáficas).

En la cuenca de Barbosa, edades preliminares de exposición a los rayos cósmicos usando concentraciones de  $^{10}\text{Be}$ , se han obtenido para bloques de roca inmersos

en depósitos de vertiente, con rangos que abarcan el Pleistoceno medio y tardío. Estas edades preliminares, permiten contrastar la dinámica geomorfológica de cada subcuenca, teniendo en cuenta que, a pesar de ser diferentes, cada una de estas comparte algunas características morfoestratigráficas, como el grado de incisión, el grado de meteorización y la altura relativa respecto al nivel base local [2], [4], [12], [14].

A pesar de contar con una base de datos de edades cronoestratigráficas, el VA y su Área Metropolitana, no cuenta con un conjunto de edades que le permita estimar la magnitud y frecuencia de las amenazas naturales a las que se encuentra expuesta. Sin embargo, los recientes avances en geocronología del cuaternario han permitido mejorar las hipótesis de evolución geológica y geomorfológica del VA como un paisaje que registra periodos de acoplamiento entre levantamientos tectónicos, avance de los procesos erosivos y reorganización del paisaje como consecuencia de los pulsos finales de la Orogenia Andina durante el Plioceno tardío y el Pleistoceno (p.e. [6], [54]).

Adicionalmente, se establecieron correlaciones entre la distribución espacial de las edades disponibles de las formaciones superficiales dentro del valle, con los quiebres de pendiente del perfil longitudinal del río Medellín-Porce, y las características morfotectónicas del VA. De esta forma, se evalúa la influencia de los procesos tectónicos y erosivos en el VA, y se actualiza la discusión acerca de su evolución, así como el llamado a la producción de nuevos datos geocronológicos para el entendimiento de las tasas de variación en el VA.

Desde el punto de vista de la geología aplicada, el VA cuenta solo con una edad radiocarbono en un paleosuelo desplazado por la Falla San Jerónimo, indicando actividad de esta estructura durante el Holoceno tardío. Desafortunadamente, este sector no tiene un registro detallado de la paleosismología y la geología de terremotos, como si se ha hecho en el Cañón del Río Cauca (ver [55], [56]). Es necesario establecer estrategias de caracterización de amenazas naturales incluyendo métodos de geocronología del Cuaternario para estimar

las tasas de desplazamiento y la cronología de eventos sísmicos sobre fallas activas, además de incluir estrategias para documentar la magnitud y frecuencia de los procesos de inundación y torrencialidad.

Esta revisión resalta la necesidad de producir nuevos datos cronológicos y estratigráficos en el Cuaternario, como estrategia para la construcción de modelos de evolución del paisaje y la evaluación de amenazas naturales, para las cuales, necesariamente, se debe surtir la reflexión, el trabajo y la praxis sobre, las estrategias de gestión del riesgo y los planes de ordenamiento territorial.

## 5. CONCLUSIONES

La revisión de datos cronoestratigráficos publicados en el VA realizada en este estudio permite concluir que:

Se compilaron un total de 24 edades cronoestratigráficas situadas entre el Plioceno tardío y el Holoceno tardío para las sub-cuencas Itagüí, Medellín, y Bello, edades obtenidas bajo los métodos de huellas de fisión, luminiscencia óptica, Radiocarbono.

Las edades preliminares de isotopía cosmogénica abarcan el Pleistoceno medio y tardío para la sub-cuenca Barbosa.

La distribución espacial de edades cronoestratigráficas es desigual en las cuatro sub-cuencas del VA, concentrándose en la porción superior (sub-cuencas Medellín e Itagüí), y mostrando las edades más antiguas de hasta 3.1 Ma.

La disposición escalonada de las series de depósitos de vertiente es común a lo largo de las cuatro sub-cuencas analizadas indicando una respuesta del paisaje por pulsos discretos, con expresión morfológica común en todo el VA.

Se hace necesario un estudio sistemático de los depósitos de vertiente en las principales zonas de acumulación de estos dentro del VA. La aplicación de otras técnicas cronológicas como isotopía cosmogénica, dendrocronología, paleomagnetismo, son útiles para

ampliar el panorama de evolución del VA. Esto debido a la heterogeneidad de los depósitos en todos los sectores del Valle; si bien, sus edades pueden correlacionarse, la composición y estructura son variables, y dependen de condiciones locales. Es por esto que un estudio sistemático permitirá establecer correlaciones regionales en los depósitos del Valle y sus alrededores. Entender los procesos en los depósitos a corto y mediano plazo permitirán establecer una evolución más ajustada del origen y evolución del Valle.

## REFERENCIAS

- [1] G. Botero, *Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia*. Medellín, 1963.
- [2] D. Rendon, G. Toro, and M. Hermelin, "Modelo cronoestratigráfico para el emplazamiento de los depósitos de vertiente en el Valle de Aburra," *Bol. ciencias la tierra*, vol. 18, pp. 103–118, 2006.
- [3] E. Aristizábal and S. Yokota, "Evolución geomorfológica del Valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa," *Boletín Ciencias la Tierra*, 2008.
- [4] E. Aristizabal, S. Yokota, H. Ohira, and J. Hagai, "Dating of slope sediments and alluvial deposits in the Aburra Valley, Colombia," *Geosci. Rept. Shimane Univ.*, vol. 23, pp. 85–88, 2004.
- [5] R. Shlemon, "Zonas de deslizamientos en los alrededores de Medellín, Antioquia (Colombia)," *Bol. Geol.*, vol. Publicacio, p. 45, 1979.
- [6] D. Rendon, "Tectonic and sedimentary evolution of the Aburra Valley, northern Colombian Andes.," 2003.
- [7] S. Restrepo-Moreno, D. Foster, D. Stockli, and N. Parra, "Long-term erosion and exhumation of the 'Altiplano Antioqueño', Northern Andes (Colombia) from apatite (U–Th)/He thermochronology," *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 278, no. 1–2, pp. 1–12, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.epsl.2008.09.037.
- [8] S. Zapata, M. Zapata-Henao, A. Cardona, C. Jaramillo, D. Silvestro, and F. Oboh-Ikuenobe, "Long-term topographic growth and decay constrained by

- 3D thermo-kinematic modeling: Tectonic evolution of the Antioquia Altiplano, Northern Andes,” *Glob. Planet. Change*, vol. 203, p. 103553, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103553>.
- [9] J. Restrepo, “Datación de algunas cenizas volcánicas de Antioquia por el método de trazas de fisión,” 1991.
- [10] G. Toro, M. Hermelin, E. Schwabe, B. O. Posada, D. Silva, and G. Poupeau, “Fission-track datings and geomorphic evidences for long-term stability in the Central Cordillera highlands, Colombia,” *Zeitschrift für Geomorphol. Suppl.*, 2006.
- [11] S. Yokota and E. A. Ortiz, “14C dating of an organic paleosol covering gravel beds distributed along the San Jerónimo Fault, Western Medellín, Colombia,” *Geosci. Rept. Shimane Univ.*, vol. 22, pp. 179–182, 2003.
- [12] C. García, “Estado del conocimiento de los depósitos de vertiente del Valle de Aburrá,” *Boletín Ciencias la Tierra*, 2006.
- [13] G. Toro, “Téphrocronologie de la Colombie centrale (département d’Antioquia et abanico de Pereira),” Universidad Joseph Fourier, 1999.
- [14] E. A. Ortiz, “Evaluation of Neotectonic Activity of the Cauca-Romeral Fault System near western Medellín, Colombia,” University of Shimane, 2002.
- [15] S. Noriega-Londoño, J. Rosero-Romo, J. C. Aros, S. A. Restrepo-Moreno, M. I. Marín-Cerón, and H. Estupiñám, “Quantifying weathering grade of surface deposits in Aburrá Valley, Colombia.”
- [16] J. S. Noller, J. M. Sowers, S. M. Colman, and K. L. Pierce, “Introduction to Quaternary Geochronology,” in *Quaternary Geochronology: Methods and Applications*, 2000, p. 582.
- [17] M. a. Summerfield, “The changing landscape of geomorphology,” *Earth Surf. Process. Landforms*, vol. 30, no. 6, pp. 779–781, Jun. 2005, doi: [10.1002/esp.1250](https://doi.org/10.1002/esp.1250).
- [18] J. M. Turowski and K. L. Cook, “Field techniques for measuring bedrock erosion and denudation,” *Earth Surf. Process. Landforms*, vol. 42, no. 1, pp. 109–127, 2017, doi: [10.1002/esp.4007](https://doi.org/10.1002/esp.4007).
- [19] P. W. Reiners *et al.*, *Geochronology and thermochronology*. 2017.
- [20] H. A. Viles, “Technology and geomorphology: Are improvements in data collection techniques transforming geomorphic science?,” *Geomorphology*, vol. 270, Jul. 2016, doi: [10.1016/j.geomorph.2016.07.011](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.011).
- [21] M. Böse, “De la morphostratigraphie e la chronostratigraphie. La geomorphologie quaternaire moderne comme fondement aux recherches sur le climat,” *Geomorphol. Reli. Process. Environ.*, 2014.
- [22] W. Page and M. James, “The Antiquity of the erosion surfaces and the Late Cenozoic deposits near Medellín, Colombia: implications to tectonics and erosion rates,” *Rev. CIAF*, vol. 6, no. 1–3, pp. 421–454, 1981.
- [23] A. Demoulin, A. Mather, and A. Whittaker, “Fluvial archives, a valuable record of vertical crustal deformation,” *Quat. Sci. Rev.*, 2017, doi: [10.1016/j.quascirev.2016.11.011](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.11.011).
- [24] D. Lague, “The stream power river incision model: evidence, theory and beyond,” *Earth Surf. Process. Landforms*, vol. 39, no. 1, pp. 38–61, 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/esp.3462>.
- [25] A. K. Ault, C. Gautheron, and G. E. King, “Innovations in (U–Th)/He, Fission Track, and Trapped Charge Thermochronometry with Applications to Earthquakes, Weathering, Surface-Mantle Connections, and the Growth and Decay of Mountains,” *Tectonics*, vol. 38, no. 11, pp. 3705–3739, 2019, doi: <https://doi.org/10.1029/2018TC005312>.
- [26] L. C. Benedetti and J. Van Der Woerd, “Cosmogenic nuclide dating of earthquakes, faults, and toppled blocks,” *Elements*, vol. 10, no. 5, pp. 357–361, 2014, doi: [10.2113/gselements.10.5.357](https://doi.org/10.2113/gselements.10.5.357).
- [27] S. Noriega-Londoño, M. I. Marín-Cerón, J. Carcaillet, M. Bernet, and I. Angel, “CRE Dating of Torrential Alluvial Deposits as an Approximation to Holocene Climate-Change Signatures in the Northwestern Andes of Colombia,” in *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*, 2021.
- [28] T. Pánek, “Recent progress in landslide dating: A global overview,” *Prog. Phys. Geogr.*, vol. 39, no. 2, pp. 168–198, 2015, doi: [10.1177/0309133314550671](https://doi.org/10.1177/0309133314550671).



- [29] P. P. Leahy, "Natural Hazards Identification and Hazard Management Systems." Oxford University Press, 2017, doi: 10.1093/acrefore/9780199389407.013.167.
- [30] B. J. Smith, P. A. Warke, and W. B. Whalley, "Landscape Development, Collective Amnesia and the Need for Integration in Geomorphological Research," *Area*, vol. 34, no. 4, pp. 409–418, Apr. 2002.
- [31] DANE, "Censo General de Población 2005," 2005.
- [32] K. Naranjo Bedoya, E. V. Aristizábal Giraldo, and J. A. Morales Rodelo, "Influencia del ENSO en la variabilidad espacial y temporal de la ocurrencia de movimientos en masa detonados por lluvias en la región Andina," *Ing. y Cienc.*, 2019, doi: 10.17230/ingciencia.15.29.1.
- [33] F. Coupé, E. Arboleda G., and C. García L., "Villatina : algunas reflexiones 20 años después de la tragedia," *Gestión y Ambient.*, vol. 10, no. 2 SE-, pp. 31–52, May 2007.
- [34] J. Duque-Trujillo, C. Bustamante, L. Solari, Á. Gómez-Mafla, G. Toro-Villegas, and S. Hoyos, "Reviewing the antioquia batholith and satellite bodies: A record of late cretaceous to eocene syn-to post-collisional arc magmatism in the central cordillera of Colombia," *Andean Geol.*, vol. 46, no. 1, 2019, doi: 10.5027/andgeov46n1-3120.
- [35] C. Vinasco, "The romeral shear zone," in *Frontiers in Earth Sciences*, 2019.
- [36] G. Chicangana, "The Romeral fault system: a shear and deformed extinct subduction zone between oceanic and continental lithospheres in Northwestern South America," *Earth Sci. Res. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 51–66, 2005.
- [37] E. Aristizábal and M. Arango-Carmona, "Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos," *Rev. Colomb. Geogr.*, vol. 29, pp. 242–258, 2020, doi: 10.15446/rcdg.v29n1.72612.
- [38] J. Restrepo and J. F. Toussaint, "Terranes and continental accretions in the Colombian Andes," *Episodes*, vol. 11, no. 3, pp. 189–193, 1988.
- [39] J. Restrepo, "Chapter 7 Tectonostratigraphic terranes of Colombia: An Update: Second part, Oceanic Terranes," 2020.
- [40] F. Cediél, H. Leal-Mejía, R. Shaw, J. Melgarego, and P. Restrepo-Pace, *Petroleum geology of Colombia: Regional geology of Colombia*, vol. 1. Medellín, 2011.
- [41] S. Zapata *et al.*, "Cretaceous extensional and compressional tectonics in the Northwestern Andes, prior to the collision with the Caribbean oceanic plateau," *Gondwana Res.*, vol. 66, pp. 207–226, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.gr.2018.10.008.
- [42] J. H. Caballero, A. Rendón, J. J. Gallego, and N. V. Uasapud, "Inter-Andean Cauca River Canyon," in *Landscapes and Landforms of Colombia*, M. Hermelin, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 155–166.
- [43] M. Hermelin, "Sistemas morfogénicos contrastados en el norte de la cordillera central colombiana," *Rev. la Acad. Colomb. ciencias exactas, físicas y Nat.*, 2007.
- [44] L. A. Arias, "Altiplanos y cañones en Antioquia: Una mirada genética," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, vol. 12, pp. 84–96, 1996.
- [45] A. Correa-Martínez, U. Martens, and G. García, "Collage of tectonic slivers abutting the eastern Romeral Fault System in central Colombia," *J. South Am. Earth Sci.*, vol. 104, p. 102794, 2020, doi: 10.1016/j.jsames.2020.102794.
- [46] A. M. Correa *et al.*, "U/Pb zircon ages and Nd-Sr isotopes of Altavista Stock and the San Diego Gabro: New insights of Cretaceous arc magmatism in the Colombian Andes," in *VSSAGI*, 2006.
- [47] S. Duque-Palacio, D. Seward, S. A. Restrepo-Moreno, and D. García-Ramos, "Timing and rates of morpho-tectonic events in a segment of the Central and Western cordilleras of Colombia revealed through low-temperature thermochronology," *J. South Am. Earth Sci.*, vol. 106, p. 103085, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103085>.
- [48] L. A. Arias, L. Gonzalez, and G. Arias, "Historia del Relieve y los Suelos en el Altiplano de Santa Rosa de Osos – Antioquia- Región el Vergel.," Medellín, 2000.
- [49] S. Noriega-Londoño, S. A. Restrepo-Moreno, C. Vinasco, M. A. Bermúdez, and K. Min, "Thermochronologic and geomorphometric

constraints on the Cenozoic landscape evolution of the Northern Andes: Northwestern Central Cordillera, Colombia,” *Geomorphology*, vol. 351, 2020, doi: 10.1016/j.geomorph.2019.106890.

- [50] T. Van Der Hammen, “Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y tectogenesis de los Andes Colombianos: Bol,” Bogotá D.C., 1960.
- [51] C. Arbeláez, “Contribuciones desde la geomorfometría y la geomorfología tectónica: Valle de Aburrá, Cordillera Central de Colombia,” 2019.
- [52] D. Silva, “Datación por trazas de las tefras depositadas en los alrededores del Valle de Aburrá,” Universidad EAFIT, 1999.
- [53] C. Garcia, M. Hermelin, G. Lopéz, G. Sierra, G. Toro, and W. Rink, “Datación por fotoluminiscencia de la stoneline y otras formaciones superficiales del Llano de Ovejas, Cordillera Central, Antioquia,” *Bol. Geol.*, vol. 29, no. 2, p. 31, 2007.
- [54] M. Arboleda, C. Arbelaez, S. Noriega-Londoño, M. Marín-Cerón, Evidencias del control tectónico en la evolución del Valle de Aburrá: implicaciones a partir de análisis geomorfométricos y morfoestructurales. XVII Congreso Colombiano de Geología. IV Simposio de Exploradores, Santa Marta 2019.
- [55] F. Suter, J. I. Martínez, and M. I. Vélez, “Holocene soft-sediment deformation of the Santa Fe-Sopetr??n Basin, northern Colombian Andes: Evidence for pre-Hispanic seismic activity?,” *Sediment. Geol.*, vol. 235, no. 3–4, pp. 188–199, 2011, doi: 10.1016/j.sedgeo.2010.09.018.
- [56] J. Gallego, “Assessment of recent tectonic activity of the Sabanalarga Fault System, Western Antioquia – Colombia,” University of Bern, 2018.

## METODOLOGÍA PARA EVALUACIÓN DE AMENAZA POR FLUJO TORRENCIAL DETONADO POR LLUVIA, EN LA MICROCUENCA EL ROLLO MUNICIPIO DE SAN BERNARDO, NARIÑO.

### Methodology for mudflow hazard assessment triggered by rainfall, in El Rollo Watershed, San Bernardo, Nariño.

Álvaro Camilo Cordoba Pazos<sup>1</sup>, Francisco Ricardo Maffla Chamorro<sup>2</sup>  
<sup>1-2</sup>Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Colombia,  
Email: <sup>1</sup>alvacordoba@umariana.edu.co, <sup>2</sup>fmaffla@umariana.edu.co.

(Recibido octubre 19 de 2021 y aceptado diciembre 03 de 2021)

#### Resumen

Los flujos torrenciales son procesos destructivos que se dan a lo largo de todo el mundo, estos se generan en las zonas montañosas y se depositan en abanicos o llanuras aluviales ocupadas por asentamientos humanos transportando gran cantidad de volumen de sedimentos, este es el caso de la microcuenca de la quebrada El Rollo, su red hídrica atraviesa el casco urbano de la vereda San Bernardo, por lo que esta posee una potencialidad para la generación de este tipo de eventos. En el presente trabajo se realizó una metodología para la evaluación de amenaza por flujo de lodos detonados por lluvia empleando sistemas de información geográfica. Para evaluar las características hídricas de la zona se realizó una transformación lluvia caudal, por su parte la amenaza en zona de la cuenca se evalúa a través de la modelación de un evento torrencial para diferentes escenarios planteados, para esto se emplea el modelo matemático FLO-2D, que determina para cada escenario las profundidades y velocidades máximas del flujo sobre las potenciales zonas de deposición. Con los resultados de la simulación, se realiza el mapa de amenaza en función de la intensidad del evento y la frecuencia de ocurrencia.

**Palabras clave:** *flujo de lodos, amenaza, caudal líquido, volumen de sedimentos, sistemas de información geográfica.*

#### Abstract

Torrential rainfalls are considered destructive processes that take place around the world, these are generated in mountainous areas and are deposited in alluvial fans or plains commonly occupied by human settlements, hence transporting a large volume of sediment, this case particularly applies for "El Rollo" creek micro-basin, its water network flows throughout the urban area of "San Bernardo" village, therefore, it shows a potential for the occurrence of this kind of event. In this work, a methodology was conducted by the implementation of Geographic Information Systems was carried out for the evaluation of the threat due to the flow of sludge formed under rain events. The implementation of a mathematical FLO-2D model allowed a rainfall to flow transition used to determinate the hydric characteristics on the area, subsequently, the threat level in the basin is evaluated through the modeling of a torrential event proposed for different scenarios, establishing depths and peak flow speed rates for each setting over potential deposition zones. Once the simulation results were obtained a hazard map was developed based on the event intensity and its frequency of occurrence.

**Keywords:** *sludge flow, threat, liquid flow, sediment volume, geographic information systems.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, a raíz de la variabilidad climática causada por factores naturales y antrópicos, la recurrencia de eventos asociados a fenómenos amenazantes sumada a las características biofísicas del territorio ha dejado como resultado pérdidas humanas, ambientales, económicas y culturales considerables. En este contexto, las autoridades locales, regionales y nacionales visibilizaron mejorar las políticas públicas para ajustar los parámetros de la planificación territorial a la realidad y contexto de las regiones.

Por esta razón, surgió la creación del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) a través de la Ley 1523 del 2012, que permitió a las autoridades gubernamentales aunar esfuerzos técnicos y financieros para mejorar las capacidades de gestión del riesgo por medio de áreas especializadas que se desarrollan bajo tres líneas base conocidas cómo: conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres. De este modo, el fortalecimiento institucional en el área de la Gestión del Riesgo comienza con la autoridad rectora, la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), seguida de las Direcciones Administrativas de Gestión del Riesgo Departamentales (DAGR) y los Consejos Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD), que les permiten mejorar las capacidades de riesgo desde el nivel local.

Bajo el contexto departamental, Nariño ha presentado acontecimientos socio-naturales recurrentes que han resultado catastróficos, según los datos del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar) sucesos cómo: inundaciones, movimientos en masa, avenidas torrenciales, actividades volcánicas, tsunamis, cambios bruscos de temperatura, incendios de cobertura vegetal, entre otros. Además, se han presentado históricamente, con lo cual se ha identificado que la población nariñense es altamente vulnerable a eventos catastróficos, puesto que muchos de sus centros poblados están asentados sobre abanicos de características aluviales, como lo ha identificado el POMCA del río Juanambú.

En consecuencia, se refleja la necesidad de fortalecer desde la academia por medio de investigaciones y estudios técnicos, el comportamiento de fenómenos escasamente estudiados, como son las avenidas torrenciales. Por esta razón, esta investigación está orientada a conocer el comportamiento de una posible avenida torrencial en una microcuenca que posee las características edafoclimáticas para que, fácilmente, se detone un evento torrencial y que, en consecuencia, puede afectar directamente a un centro poblado.

Es importante entender que “las avenidas torrenciales son una de las amenazas de origen hidrometeorológico de mayor capacidad destructiva en términos de vidas humanas y pérdidas económicas, especialmente en ambientes montañosos y tropicales como Colombia” [1]. Dadas estas características, la avenida torrencial se caracteriza por ser altamente peligrosa y destructiva en las zonas donde se depositan los flujos que corren aguas abajo, usualmente por el canal natural del cuerpo de agua.

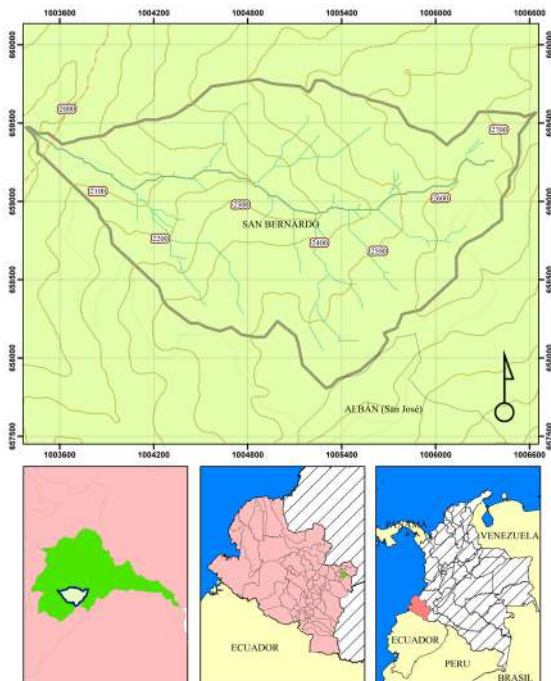
Finalmente, esta investigación representa un asidero importante y fundamental porque contribuye a la gestión del conocimiento del riesgo regional. Asimismo, es importante resaltar que estos estudios son un punto de partida para que las autoridades locales, regionales y nacionales puedan tomar decisiones trascendentales en el marco del ordenamiento territorial. Cabe resaltar que esta información es una aproximación a la realidad y que se puede mejorar con instrumentos especializados.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La microcuenca El Rollo, perteneciente al municipio de San Bernardo en el departamento de Nariño, Colombia cuenta con una extensión de 364,26 hectáreas y abastece de agua al centro urbano principal de dicho municipio. Esta se encuentra ubicada en latitud 1° 30' 52,25" Norte y longitud 77° 02' 35,40" Oeste, a una altitud de 2028 msnm. La microcuenca El Rollo es la principal abastecedora de agua para el acueducto del casco urbano de San Bernardo, se encuentra ubicado al oriente del municipio, ocupa una

superficie de 3.5 km donde se encuentra las veredas de La Florida y Los Alpes del municipio de San Bernardo y los barrios de Guadalupe, San Roque [2].

El Rollo localizada dentro de la Microcuenca del río Quiña tiene su nacimiento en la vereda La Florida, municipio de San Bernardo. Además, su cauce principal sirve de límite Inter-Veredal entre la Florida y Bello Horizonte. Esta Micro cuenca es la principal fuente abastecedora de agua para el acueducto municipal de San Bernardo, tiene un área de 3.5 km<sup>2</sup>, se ubica entre los 2.000 y 2.600 msnm, presenta un clima frío – húmedo, y predominan pendientes inferiores al 20%. Los suelos pertenecen a la clase Agrológica VII, siendo superficiales de muy poco espesor, bastante pedregosos y alcalinidad muy elevada. Estos suelos se han desarrollado a partir de materiales heterogéneos y cenizas volcánicas [3].



**Figura 1.** Ubicación de la microcuenca El Rollo.

Para dar cumplimiento al objetivo número 1 se identificó la ubicación espacial del municipio de San Bernardo, posteriormente, se hizo uso de datos abiertos como son un modelo de elevación digital con una resolución

espacial de 12.5 metros por pixel extraído de un satélite ALOS PALSAR, y usando el software cartográfico especializado ArcGIS, en su extensión ArcMAP, se realizó la digitalización y delimitación de la cuenca, tras esto se procedió a hacer la caracterización morfométrica de la microcuenca de la quebrada El Rollo, siguiendo la metodología de [4], alternando con bibliografía adicional para aquellos parámetros que no tenía la metodología en el libro antes mencionado.

En seguida, se solicitó información al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de las estación meteorológica de San Bernardo, adquiriendo una serie de datos de precipitación diaria, a estos se les realizó un arreglo con el cual se cubrió los vacíos de información que presentaban; además, se calculó las curvas IDF, para determinar los hidrogramas en diferentes periodos de retorno para esto se usó la metodología de bloque alterno, con este insumo y a través de la metodología de hidrograma unitario SCS, se calculó los caudales máximos de la cuenca para diferentes periodos de retorno.

Para llevar a cabo la modelación del flujo torrencial, se realizó una calibración del modelo, para esto se hizo una revisión bibliográfica de eventos históricos, a fin de determinar un evento guía, una vez identificado, se procedió a realizar trabajo de campo a fin de determinar mediante información primaria el efecto que este evento tuvo el día que se produjo; en esta etapa, se obtuvo información del tirante o altura que la lámina de agua alcanzó en una zona específica durante el evento guía, tras esto se solicitó al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el pluviograma correspondiente al día del evento que se analizó, con los datos que este muestra.

Con los anteriores datos, se realizó una estimación del caudal que dicho evento tuvo, para esto se introdujeron en el software HEC HMS, los datos de lluvia y las horas en las que esta se produjo, con lo cual se obtuvo el hidrograma del evento que se realizó dicho evento, también se determinaron los coeficientes de rugosidad o

n de *Manning* de la cuenca, para esto se usó el mapa de cobertura elaborado en fases previas.

A continuación, se realizó un análisis de imágenes tanto del cauce como de los sedimentos que este posee, así como de los aportantes de sedimentos que se tienen, con lo cual se determinó un coeficiente volumétrico o CV, con el que se diagnosticó el volumen de sedimentos que se dio en dicho evento.

Con estos insumos se procedió a realizar las corridas correspondientes a la calibración en el software FLO2D, para esto se realizó una transformación del modelo de elevación digital Alos *palsar* con resolución 12.5m, que se obtuvo para el área de estudio de formato *raster* a formato vector tipo punto y se proyectó al sistema de coordenadas correspondientes a la zona. En el software FLO2D se creó un nuevo proyecto desde un formato *shapefile* donde se cargaron los puntos correspondientes al modelo de elevación digital, tras esto se creó una rejilla con la misma resolución que se tiene para la topografía tipo punto, después se importó el *shapefile* correspondiente al límite de la microcuenca con la cual se logró delimitar el área de la modelación, con esto, se interpolaron los valores de la topografía con la rejilla que está dentro de la zona a modelar.

Además, se importó el *shapefile* correspondiente a los coeficientes de *Manning* y se computaron estos en la zona de estudio, se importó el *shapefile* de la red hídrica con la que se identificó el punto inicial para la modelación, se introdujeron como condiciones de entrada en este punto los valores del hidrograma del evento de calibración, es decir, el hidrograma del evento, luego se determinó las aguas abajo el lugar de salida del flujo, reflejadas en el límite inferior de la red hídrica.

Tomando en cuenta la clasificación de flujo que se obtuvo mediante la determinación de coeficiente volumétrico o CV donde se dispuso un flujo del tipo avalancha de lodos, también se seleccionó el tipo de flujo a modelar en el software FLO2D, el cual permitió determinar el valor correspondiente a la gravedad específica, y se realizó un

análisis a partir del mapa de coberturas y la granulometría de la zona para calcular el valor de resistencia del flujo laminar.

A partir de lo anterior, se tomaron los valores propuestos por [5] para la reología, realizando una corrida del modelo para cada serie de datos propuesta en este estudio. Además, se introdujeron los valores del CV identificados, estos fueron introducidos de forma similar al hidrograma teniendo su pico en el punto donde éste presentaba los caudales más altos, con esto se corrió el modelo de calibración. Así también, se realizó una comparación de los resultados obtenidos en dichas modelaciones, frente a los resultados encontrados en el levantamiento de información primaria correspondiente a ese evento en particular; una vez obtenidos todos los parámetros y calibrado el modelo, se realizaron corridas con los hidrogramas calculados para cada periodo de retorno.

Igualmente, se zonificó la amenaza por avenidas torrenciales, a partir de la modelación, teniendo en cuenta dos criterios que son la altura del flujo y la velocidad de desplazamiento del mismo, para esto se siguió la categorización planteada en [6], gracias al software Mapper pro se introdujeron los rangos de categorización y los periodos de retorno correspondientes, con lo que se zonificó la amenaza para los diferentes escenarios propuestos y, finalmente, se determinó la zonificación de la amenaza para la quebrada El Rollo.

#### *Sistemas de Información Geográfica*

Un SIG es un sistema digital para el análisis y manipulación de todo tipo de datos geográficos, a fin de aportar material útil para las decisiones territoriales [7]. Concebidos como “un sistema computarizado capaz de almacenar y utilizar datos que describen lugares de la superficie de la tierra” [8]. Por lo cual su uso es eficiente al momento de crear eventualidades sobre un lugar determinado.

Además, los SIG permiten determinar las condiciones geográficas de las cuencas y convertirlas en objetos con propiedades geométricas y atributos. Cuando las variables hidrológicas son transformadas en capas de

información georreferenciada, las funciones de análisis espacial posibilitan la ejecución operaciones de álgebra de mapas para obtener datos como las pendientes topográficas, dirección del flujo, áreas de drenaje, subcuencas, entre otros [9].

#### *Flujo Hiperconcentrado*

Los flujos hiperconcentrados se consideran intermedios entre los flujos de escombros no-cohesivos y las corrientes fluviales, los flujos de escombros no-cohesivos, pueden transformarse en flujos hiperconcentrados por dilución con agua o viceversa, estos pueden evolucionar a flujos de escombros por un incremento en la concentración de sedimento. Generalmente, presentan concentraciones bajas de sedimento, por lo que su reología es mucho más parecida a las corrientes fluviales [10].

#### *Avenidas Torrenciales*

Son un tipo de movimiento en masa el cual se desplaza por los cauces naturales y transporta grandes volúmenes de sedimentos o materiales de arrastre a altas velocidades, representando un peligro tanto para los habitantes como para la infraestructura que se encuentra ubicada en las zonas aledañas al punto de desemboque.

#### *Factores condicionantes*

Uno de los parámetros importantes para el estudio de la amenaza por flujos concentrados es el conocimiento de las características morfométricas, estas son el estudio de un conjunto de variables lineales, de superficie, relieve y drenaje; que permite conocer las características físicas de una cuenca, relevante para la interpretación de la funcionalidad hidrológica y en la definición de las estrategias para la formulación de su manejo [11].

Dichas condiciones morfométricas, geomorfológicas y climáticas permiten realizar evaluaciones de amenaza adecuadas a las condiciones particulares de los lugares de interés para que, con los pertinentes estudios, se pueda realizar una modelación ambiental, con el fin de simular el comportamiento de dichos fenómenos complejos.

#### *Morfometría*

Los flujos son condicionados por la morfología de laderas con alta pendiente (Pendientes mayores a 25° en la parte superior de la cuenca hidrográfica), que las hace potencialmente inestables al favorecer la aceleración de los deslizamientos y contribuir al escurrimiento de agua y reducción de la infiltración [9].

#### *Clima y cobertura de la tierra*

La cobertura vegetal presenta protección al impacto directo de la lluvia, reducción de la energía de las aguas de escorrentía superficial, incremento de la infiltración por acción de las raíces y el aumento de la capacidad de retención de agua [9].

#### *Curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF)*

Las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno [12]. Por otro lado, la intensidad, se define como la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/hr) [13].

En consecuencia, las determinaciones de intensidades de precipitaciones se deben hacer a partir de los registros proporcionados por los pluviógrafos [14]. Así también, existe dos principales formas de trabajar con las curvas. La primera, utiliza un análisis de frecuencia de la lluvia, considerando para ello una función de distribución de probabilidad de valor extremo como la función Gumbel. La segunda, expresa las curvas IDF como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia de diseño en una gráfica [13].

#### *Caudal Máximo*

El caudal máximo de creciente, es un valor que permite asociar la cantidad de agua que fluye en un tiempo determinado, proveniente de una cuenca hidrográfica en particular, estos se asocian a eventos de lluvia, escenarios donde los aportes hídricos son más altos sobre los cuerpos de agua.

El cálculo de caudales se realiza a través de datos históricos de precipitaciones de poca duración representativos de la cuenca y de las características geométricas de la misma: suelos, vegetación, etc. Los caudales se pueden calcular por los métodos: Racional o por el Método del hidrograma sintético SCS [9].

#### Método racional

Este caudal máximo se calcula mediante la Ecuación 1.

$$Q = 0,278 CIA \quad (1)$$

Donde

Q: Descarga máxima de diseño (m<sup>3</sup>/s)

C: Coeficiente de escorrentía

I: Intensidad de precipitación máxima horaria (mm/h)

A: Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>).

Sin embargo, “No es recomendable utilizar el método racional porque este método presenta una información parcial del escurrimiento en el punto de descarga de la cuenca” [15].

#### Hidrograma unitario del United States Soil Conservation Service, SCS

Es un modelo empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos que determina un umbral de escorrentía (Po) a través de un número hidrológico o número de curva (CN) agregado de la cuenca. El Número de Curva toma un valor de 0 a 100 según sea su capacidad de generar escorrentía superficial. Valores cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad. El caudal pico esta dado por la Ecuación 2.

$$Q_p = 0.208 * A / t_p \quad (2)$$

Donde:

Q<sub>p</sub>: Caudal pico del hidrograma unitario para 1 mm de precipitación efectiva, en metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s).

A: Área de drenaje de la hoya hidrográfica, en kilómetros

cuadrados (km<sup>2</sup>).

t<sub>p</sub>: Tiempo al pico, en horas (h).

En el método del SCS, la relación del tiempo al pico t<sub>p</sub> y el tiempo de desfase de la cuenca es:

t<sub>p</sub>/t<sub>l</sub> = 9/10, donde t<sub>l</sub> está dado por la Ecuación 3.

$$t_l = \frac{L^{0.8} (2540 - 22.86CN)^{0.7}}{14104 CN^{0.7} S^{0.5}} \quad (3)$$

Dónde: CN es el número de curva.

S es la pendiente del cauce principal.

L longitud del cauce principal.

Concentración volumétrica

La concentración volumétrica de sedimentos o CV, es la relación existente entre el volumen de sólidos y el volumen total, [5] se expresa mediante la Ecuación 4.

$$CV = \frac{\text{Volumen de sólidos}}{(\text{Volumen de sólidos} + \text{volumen de líquidos})} \quad (4)$$

#### Modelo FLO 2D

El modelo FLO-2D aplica las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento en dos dimensiones, este canaliza los flujos al predecir el movimiento del fluido viscoso en función de la concentración de sedimentos. Se hace uso de un modelo reológico cuadrático para predecir tensiones viscosas y de rendimiento en función de la concentración de sedimentos.

A medida que cambia la concentración de sedimentos para un elemento de grilla determinado, se simulan los efectos de dilución, el cese del flujo y la removilización de depósitos. El esfuerzo de corte total en flujos de sedimentos hiperconcentrados, incluyendo flujos de lodos o detritos, puede ser calculado como la suma de cinco componentes del esfuerzo de corte como se muestra en la Ecuación 5.

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (5)$$

Donde T<sub>c</sub> es el esfuerzo de fluencia, T<sub>mc</sub> Esfuerzo de corte Mohr – Coulomb, T<sub>v</sub> el esfuerzo cortante viscoso, T<sub>t</sub> el esfuerzo cortante turbulento y T<sub>d</sub> el esfuerzo cortante dispersivo.



La ecuación anterior puede ser expresada en términos de tasas de deformación ( $dv/dy$ ), con el modelo reológico cuadrático desarrollado en [5] como se muestra en la Ecuación 6.

$$\tau = \tau_y + \eta \left( \frac{dv}{dy} \right) + c \left( \frac{dv}{dx} \right)^2 \quad (6)$$

Donde  $\tau_y = \tau_c + \tau_{mc}$ ,  $\eta$  es la viscosidad dinámica del fluido,  $dv/dy$  es el Gradiente de velocidad y  $C$  el coeficiente de esfuerzo cortante inercial, calculado en función de la concentración del fluido.

Así pues, en San Bernardo la ocurrencia de este tipo de fenómenos traería efectos adversos, primordialmente, sobre la economía, la población y su infraestructura, debido a que uno de los principales inconvenientes para delimitar la amenaza por este tipo de eventos consiste en la dificultad de predecir su ocurrencia, ya que existen diferentes causas que dan origen a una avenida torrencial, como una alta precipitación que genere una serie de deslizamientos, o un deslizamiento de gran magnitud que origine represamiento en el cauce de la red hídrica generando un estancamiento de esta, la ocurrencia de sismos que produzcan deslizamientos, o la ocurrencia de erupciones volcánicas.

Por lo anterior, se evidencia que, por las condiciones geográficas, climáticas y de ocupación en el municipio de San Bernardo, existe un elevado potencial de avenidas torrenciales que pueden afectar a la población y a la infraestructura asentadas en el lugar ya que hay zonas habitadas en la parte media y baja de la cuenca que podrían presentar una amenaza considerable frente a este tipo de fenómenos.

#### *Amenaza*

Se define según la Ley 1523 de 2012, como un peligro latente de que un suceso físico de origen natural o causado por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos como pérdidas en los bienes, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

El nivel de amenaza por inundación o flujo torrencial, en un lugar específico, es una función tanto de la intensidad del evento como de la probabilidad. La intensidad del evento se define por la profundidad de flujo y velocidad. La probabilidad está inversamente relacionada con la magnitud de inundación. En este sentido, las grandes inundaciones ocurren con menos frecuencia; entonces, el nivel de amenaza por flujo de detritos se define como una función combinada discreta de la intensidad del evento (severidad del evento) y el período (frecuencia) [5].

### 3. RESULTADOS

Con la serie de datos de la estación pluviométrica San Bernardo con código de estación [52045030], se evaluó la cantidad de días que presentaron lluvia por cada año a fin de determinar el comportamiento histórico de los datos, con lo que se comprobó que la zona posee un alto régimen de precipitación, siendo estas constantes durante el año, en promedio, según la serie de datos evaluada se tiene una cantidad de 206 días de lluvia por año.

Además, la precipitación tiene un comportamiento relativamente similar, por lo que se realizó un análisis de datos faltantes en la serie, a través del método de regresión múltiple, que permitió llenar dichos datos.

Mediante la función de Gumbel la cual usa el método de los momentos [4]. Se determinaron las precipitaciones máximas diarias probables para distintas frecuencias tomando periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, así como, distintas duraciones de lluvia en horas, para lo cual se hizo uso de coeficientes a fin de determinar relaciones para una lluvia de duración de 24 horas [16].

La intensidad de lluvia es la cantidad total de agua caída por unidad de tiempo y se mide en mm/hora [17], por lo que se relaciona directamente estas dos variables, así, mediante regresiones potenciales ya que se evidencia, claramente, que la intensidad es directamente proporcional a los periodos de retorno, y que entre mayores sean estos, más altas son las intensidades de lluvia; de igual manera, estas son inversamente

proporcionales al tiempo de duración del evento, ya que entre menor es dicha duración, más alta es la intensidad; es así que, estos valores de intensidad de precipitación, se ubican en periodos de retorno alto con tiempos de duración de lluvia bajos.

Se obtuvo el valor de los coeficientes  $d$  y  $n$  para cada periodo de retorno, y se determinó el promedio de estos, siendo este coeficiente el medio que alimentó la ecuación general que modela la intensidad según su duración para los diferentes periodos de retorno.

Se realizaron las curvas IDF de la microcuenca El Rollo que se muestra en la Figura 4, para los periodos de retorno seleccionados anteriormente que corresponden a la frecuencia.

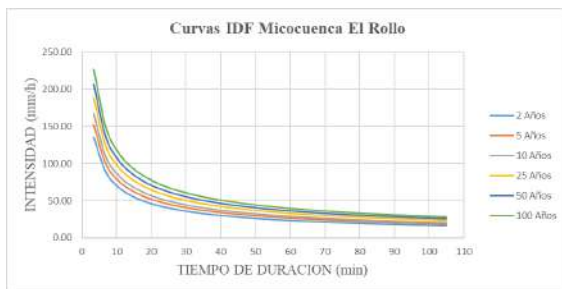


Figura 2. Curvas IDF, microcuenca El Rollo.

Los hietogramas obtenidos mediante la metodología de bloque alterno, y el mapa de coberturas gracias a la metodología *corine land cover* adaptada para Colombia, permitieron determinar las propiedades del suelo y haciendo uso de la metodología de hidrograma unitario SCS, se realizó el cálculo de los caudales máximos de la cuenca según su periodo de retorno, así pues, se obtuvieron los resultados que se ilustran en la Figura 7, donde se presentan los hidrogramas para cada periodo de retorno y se aprecia el caudal máximo que estos poseen. De la misma manera, se puede observar que entre mayor sea el periodo de retorno más alto será el valor máximo de dicho caudal.

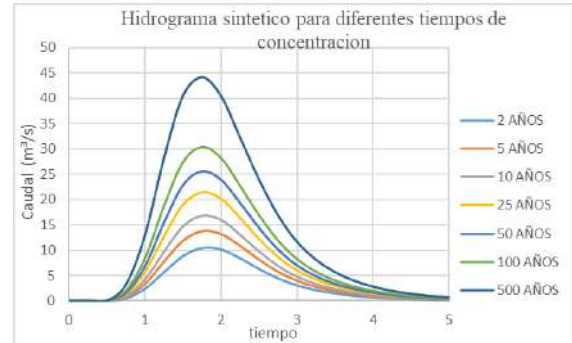


Figura 3. Caudales para diferentes periodos de retorno en la microcuenca El Rollo.

Paralelamente, se realizó el cálculo del caudal máximo por medio del método racional a fin de realizar una comparativa entre diversos métodos de estimación de caudal, esto con el fin de validar los resultados y optar por la valoración más acorde a las características del área de estudio. Resultados ilustrados en la tabla 1, en esta, se puede denotar la eficiencia de los métodos sintéticos para la estimación de caudales máximos, esto se debe a que en este tipo de metodologías se encuentran variables que en otras no, tales como abstracciones o escorrentía del sistema, de aquí, que otros métodos tiendan a sobreestimar los valores de caudales máximos, como es el caso del método racional, el cual, no tiene en cuenta las variables antes mencionadas.

Tabla 1. Comparativa de valores de caudal máximo calculado por diferentes metodologías

Periodo de retorno	Método racional m³/s	Método SCS m³/s
2	25.53	10.44
5	28.83	13.76
10	31.60	16.76
25	35.68	21.45
50	39.11	25.62
100	42.88	30.38
500	53.07	44.05

#### Modelamiento de flujo torrencial

Con el estudio hidrológico definido, se procedió a determinar aquellas variables que el modelo FLO 2D

requiere para la simulación de eventos torrenciales, para llevar esto a cabo se calcularon una serie de parámetros y se calibró el modelo haciendo uso de un evento real, con el fin de que la modelación sea lo más aproximada posible a una eventualidad real.

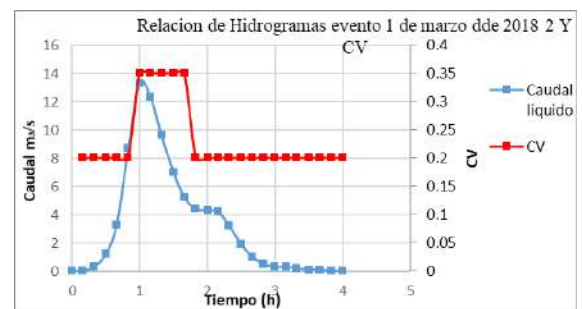
De igual modo, se analizó una serie de imágenes de la microcuenca El Rollo tomadas en las visitas de reconocimiento que se hicieron en la fase inicial de la investigación las cuales se muestran en la Figura 1. En esta se identificaron sedimentos de tipo canto rodado. A continuación, se tomó una muestra en el lecho de la microcuenca a partir de la cual se obtuvo la curva granulométrica, la cual denota el tamaño de partículas predominante en el lecho. En este caso, para el lecho de la microcuenca El Rollo predominan piedras pequeñas que proceden de la fragmentación o grava, esto debido a que el tamaño de las partículas que forman el suelo es superior a 2 mm [18].



**Figura 4.** Sedimentos presentes en la microcuenca El Rollo

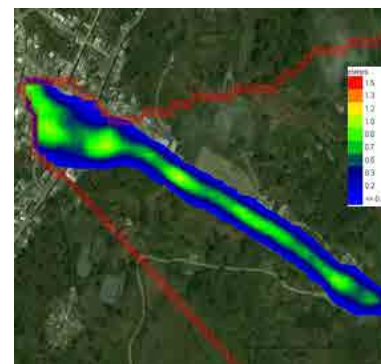
De tal manera que, se pueda calibrar el modelo, se analizó la lluvia correspondiente al día 01 de marzo de 2018; por esta razón, se solicitó el pluviograma acorde con la medición de la precipitación de este día, con lo que se hizo uso del software HEC HMS, en el cual se introdujeron los valores de lluvia correspondientes. En seguida, se realizó la transformación lluvia – caudal determinando así el hidrograma producido; los resultados obtenidos se observan en la Figura 4, en donde se aprecia la relación entre el caudal líquido con el coeficiente volumétrico, el cual está directamente relacionado con el volumen

de sólido que el flujo es capaz de transportar. Dicho coeficiente fue determinado en fases previas, acorde con lo establecido por diversos autores; de esta manera, no fue tomado como un valor constante, sino que, se varió este en función del caudal líquido, debido a que los caudales bajos no son capaces de transportar ni erosionar grandes cantidades de sedimentos, mientras que, a medida que estos crecen, la capacidad de transporte aumenta proporcionalmente.



**Figura 5.** Caudal líquido obtenido mediante el software HEC – HMS y CV correspondiente al evento del día 1 de marzo de 2018.

Con estos parámetros se realizó la corrida en el modelo FLO 2D alternando valores hasta conseguir una aproximación en cuanto a las alturas registradas en el evento guía.



**Figura 6.** Modelación en el software FLO 2D del evento registrado el día 1 de marzo de 2018.

En seguida, se usó el software Mapper pro, con el cual se determinó la amenaza para diferentes periodos de retorno como se muestra en las Figuras 7, 8 y 9, se puede observar que los resultados muestran que para periodos

de retorno bajos como es el caso de 2 años, la amenaza no es especialmente representativa, ya que las zonas correspondientes a una amenaza alta coinciden con el cauce natural de la quebrada y, las zonas con amenaza baja, corresponden a las márgenes de la fuente hídrica; así también, se encontró que para el periodo de retorno correspondiente a 10 años, hay una amenaza alta que abarca un área, la cual se concentra en el casco urbano. En consecuencia, la amenaza para eventos de este tipo tiene una mayor incidencia, igualmente en las zonas con amenaza media y baja, que abarcan un área mayor y, para el caso de la amenaza, corresponde a un periodo de retorno de 50 años.

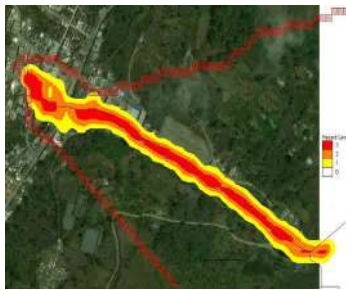


Figura 7. Amenaza para periodo de retorno 2 años

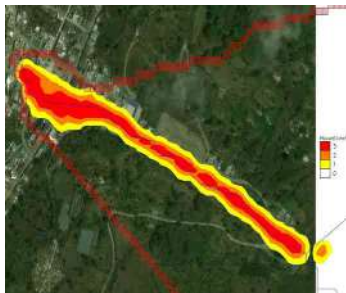


Figura 8. Amenaza para periodo de retorno 25 años

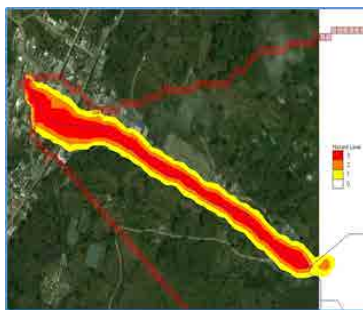


Figura 9. Amenaza para periodo de retorno 50 años

Tabla 3. Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales en la quebrada El Rollo

Amenaza Potencial	Color	Descripción
Alta.	Rojo	Las personas están en peligro tanto dentro como fuera de sus viviendas. Las estructuras están en peligro de ser destruidas.
Media.	Naranja	Las personas están en peligro fuera de sus casas. Las edificaciones pueden sufrir daños y posible destrucción dependiendo de las características de construcción.
Baja.	Amarillo	El peligro sobre las personas es bajo o inexistente. Las edificaciones pueden sufrir daños leves, pero la inundación o sedimentación puede afectar el interior de las estructuras.

Así pues, se encontró que la amenaza alta abarca gran parte del centro poblado San Bernardo, por lo cual, siguiendo lo expuesto en [5], ilustrado en la Tabla 3, se presenta una amenaza real seria y alta para los pobladores del centro urbano, tanto en espacios abiertos como en recintos cerrados, ya que en esta zona las afectaciones se darían no solo en los habitantes sino también en las edificaciones; de igual manera, la amenaza media se encontró principalmente en las márgenes del canal natural, expandiéndose en el centro poblado, en esta zona los destrozos potenciales en edificaciones es inferior, por lo que las personas amenazadas son aquellas que se encuentren al aire libre, mientras que la amenaza baja, se encuentra esencialmente en la zona aguas debajo de la quebrada. Los resultados hallados son de especial interés, debido a que se constata que el centro poblado San Bernardo se encuentra amenazado frente a un eventual fenómeno de tipo torrencial detonado por lluvia.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados indicados se obtuvieron a través del uso de herramientas SIG y un modelo especializado en diversos tipos de flujo que se desarrolla con información topográfica e hidrológica, con lo cual se concluye que este tipo de modelos se constituye como una aproximación a esta clase de fenómenos, ya que estudian el mismo, de forma íntegra, tomando una serie de variables, que permiten caracterizarlo y simularlo de forma aceptable.

En aras de mejorar los resultados obtenidos se realizó un cálculo por el método racional que permitió comprobar que la metodología SCS, que arroja resultados más aproximados a la realidad, con lo cual se comprobó que esta metodología tiene un mayor ajuste al modelo hidrológico de la quebrada El Rollo, mientras que otras metodologías como el método racional tienden a mayorar excesivamente los resultados de caudal máximo.

Se concluye que la ronda hídrica de la quebrada en estudio se encuentra comprometida, dado que la incidencia del fenómeno se desborda sobre las franjas paralelas del canal natural alcanzando su ancho máximo después del desborde, generando un riesgo directo a las zonas urbanas.

De igual manera, se concluye que para llevar a cabo una simulación idónea es necesario una óptima calibración del modelo, ya que este es la base de todas las corridas posteriores, y es bajo esta que se define como se comportará el flujo a modelar.

Asimismo, la investigación identificó los niveles de amenaza (alta, media, baja) del fenómeno estudiado en los diferentes periodos de retorno establecidos. Estos resultados se obtuvieron a través de la incorporación de información antes descrita en el software FLO2D mediante la extensión Mapper indicando claramente las zonas donde la amenaza por avenidas torrenciales tiene mayor y menor incidencia. Con lo anterior, se concluye que el casco urbano del centro poblado San Bernardo, posee una alta amenaza frente a avenidas torrenciales,

y que los habitantes de las zonas aledañas al cauce de la quebrada El Rollo, se encuentran en peligro, así como, sus viviendas, debido a la magnitud de este tipo de eventos.

Finalmente, según los resultados obtenidos mediante información recolectada y debidamente procesada, se puede concluir que el casco urbano del municipio de San Bernardo se encuentra amenazado por una eventual avenida torrencial que se presente en la quebrada El Rollo. Cabe resaltar que, ante los antecedentes presentados en el municipio por las quebradas La Mina y El Pailón, es importante prestarle atención al comportamiento de la quebrada El Rollo, especialmente, en épocas de altas precipitaciones, donde los aportes al caudal pueden llevar a presentar un evento altamente peligroso.

#### REFERENCIAS

- [1] E. Aristizábal, M. I. Arango Carmona & , I. K. García López. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. Cuadernos De Geografía: Revista Colombiana De Geografía, 29(1), 242-258. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>
- [2] CORPONARIÑO. (2008). Diagnóstico Biofísico y Socioeconómico Municipio San Bernardo (N). 1–154. Recuperado de: [http://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/DIAGNOSTICO\\_BIOFISICO\\_Y\\_SOCIO\\_ECONOMICO\\_SAN\\_BERNARDO.pdf](http://corponarino.gov.co/expedientes/intervencion/DIAGNOSTICO_BIOFISICO_Y_SOCIO_ECONOMICO_SAN_BERNARDO.pdf)
- [3] Alcaldía Municipal de San Bernardo (2012). Plan de Desarrollo Municipio de San Bernardo Nariño. Secretaria de Planeación y Desarrollo Municipal.
- [4] G. Monsalve Sáenz. (2004). Hidrología En La Ingeniería (2a. Ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- [5] J. O'Brien. (2009). User's Manual FLO-2D. Retrieved from: <https://www.flo2d.com/download/>
- [6] R. García & J. L. López (2005). "Debris Flows of December 1999 in Venezuela." Chapter 20th of Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Jakob, Matthias, Hungr, Oldrich Eds. Springer Verlag Praxis, Berlin.
- [7] J. Santos. (2004) Sistemas de información geográfica.

Unidad didáctica. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2004, 460 p. ISBN 84-362-2006-4 (código UNED: 60105UD01A01)

- [8] G. Meaden & J. Kapetsky. Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura. FAO Documento Técnico de Pesca. N° 318. Roma, FAO. 1992. 266p
- [9] A. Sepúlveda & J. Patiño. (2016). Metodología para evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia. (tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- [10] D. Sarocchi. (2007). Estudio sedimentológico del depósito de flujo de bloques y ceniza del 17 de julio de 1999 en el volcán de colima. UNAM.
- [11] F. J. Gaspari. (2012). Caracterización Morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Séptimo congreso de medio ambiente AUMG. La Plata Argentina
- [12] J. Témez. (1978). Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España. 111p.
- [13] V. T. Chow, D. R. Maidment, L. W. Mays. (1994). Hidrología aplicada. Mc Graw Hill.
- [14] V. Aros. (1997). Apuntes de Hidrología. Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción. Chile. 25- 31 p.
- [15] G. François & H. Pizarro. (2005). Distribución de Agua Potable y Colecta de Desagües y de Agua de Lluvia. Presses inter Polytechnique.
- [16] A. Campos. (1978). " Precipitación en Procesos del Ciclo Hidrológico", 1a ed., San Luis Potosí., México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí
- [17] J. Heuvelop, J. Pardo Tasies, S. Quiros Conejo & L. Espinoza Prieto. (1986). Agroclimatología Tropical. Universidad Estatal a Distancia, San José (Costa Rica).
- [18] J. Sierra, M. Navarro, G. Gómez & J. Muñoz. (2013). Optimización del análisis del tamaño de grano de arenas costeras.

## ENSAYO DE PENETRACIÓN DINÁMICA SÚPER PESADA (DPSH): EQUIVALENCIA PARA EL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT) EN COLOMBIA

### Dynamic Probing Super Heavy (DPSH): Equivalence for the Standard Penetration Test (SPT) in Colombia

Edgar Leonardo Salamanca Medina<sup>1</sup>, Juan José López Domínguez<sup>2</sup>  
<sup>1-2</sup>Departamento de Geología y Geotecnia, Zofre SAS, Bogotá DC, Colombia  
Email: [edgarleonardo.salamanca@gmail.com](mailto:edgarleonardo.salamanca@gmail.com), [juan.lopez@zofre.com.co](mailto:juan.lopez@zofre.com.co)

(Recibido septiembre 15 de 2021 y aceptado noviembre 22 de 2021)

#### Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de una serie de equivalencias directas entre el ensayo de penetración dinámica súper pesada (DPSH) y el ensayo de penetración estándar (SPT), a partir de 129 datos recolectados en distintos proyectos de exploración geotécnica ejecutados en Colombia. Las equivalencias entre los resultados de las pruebas se obtuvieron en términos de golpeo, comparando estos para distintas agrupaciones texturales de suelos con base en ensayos de laboratorio, principalmente, de clasificación. Como resultado de un análisis estadístico de estos datos se derivaron cinco equivalencias directas en función a la clasificación granulométrica del suelo, las cuales han sido comparadas con las propuestas de otros autores. Este proceso permitió ampliar el rango de uso para demás texturas de suelo que, actualmente, no habían sido correlacionadas.

**Palabras clave:** *caracterización geotécnica, correlación, ensayo de penetración dinámica super pesada (DPSH), ensayo de penetración estándar (SPT).*

#### Abstract

This paper presents the results of a series of direct equivalencies between the dynamic probing super heavy (DPSH) and the standard penetration test (SPT) based on 129 data collected from different geotechnical exploration projects carried out in Colombia. The equivalences between the results of the tests were obtained in terms of blows, comparing these for different textural groupings of soils based on, mainly, in classification laboratory tests. As a result of a statistical analysis of these data, five direct equivalences were derived formed on the granulometric classification of the soil, which have been compared with the proposals of other authors. This process allows expanding the range of use for other soil textures that had not currently been used correlated.

**Key words:** *geotechnical site characterization, correlation, dynamic probing super heavy (DPSH), standard penetration test (SPT).*

## 1. INTRODUCCIÓN

La metodología de trabajo para una correcta caracterización geotécnica del subsuelo en obras de ingeniería se soporta en dos principios fundamentales: en primer lugar, una campaña de exploración geotécnica, la cual desarrolla dentro de sus alcances la ejecución de exploración directa que permita obtener muestras representativas del subsuelo y que, simultáneamente, se acompaña de pruebas o ensayos de campo en segundo lugar, la ejecución de ensayos de laboratorio sobre las muestras recuperadas durante la campaña de exploración geotécnica.

Todo este proceso permite conocer las propiedades geotécnicas de los materiales testificados [1]. Entre las pruebas de campo para la investigación del terreno, se encuentra la llamada prueba de penetración estándar (SPT), de uso extendido en Colombia y en el mundo, ya que sobre la misma existe una extensa base de datos para estimar los parámetros de resistencia de los suelos a partir de su resultado. En la actualidad, el uso de pruebas dinámicas similares al ensayo SPT, como las pruebas de penetración dinámica ligera (DPL), mediana (DPM), pesada (DPH) y super pesada (DPSH), han aumentado permanentemente, ya que permiten conocer la sensibilidad a cambios en el perfil estratigráfico mediante registros continuos de golpeo. Además, los equipos de ejecución han tenido significativos procesos de mejora tecnológica [2]; sin embargo, en Colombia, se tiene poco conocimiento sobre las modalidades de dichas pruebas y, por lo general, se limita al uso de la prueba SPT, donde existe la tendencia a ejecutarse de manera manual [3].

La prueba de penetración dinámica super pesada (DPSH) es un ensayo *in situ* que está normalizado en Europa, el cual consiste en un penetrómetro dinámico automatizado bajo unas especificaciones de golpeo particulares, que posibilita obtener indicaciones cualitativas y cuantitativas de las características del subsuelo y que tienen una gran aplicación en la mecánica de suelos [4].

El problema que surge para su uso es que el ensayo no está normalizado en la mayoría de países de América, pero existen algunos casos de estudio de empresas europeas con sede en el continente que han usado los resultados de este ensayo con fines de reconocimiento y diseño. Por ejemplo, Jordá y Jordá [5] realizaron una nota sobre el uso de distintos penetrómetros, entre ellos el DPSH, en países como Ecuador y Perú. Por otro lado, los autores en [6] recogen dos casos prácticos de aplicación del ensayo DPSH en varios emplazamientos en la república de México. Recientemente, en [7] obtienen la resistencia dinámica de punta del ensayo DPSH asociada al límite de licuación de un suelo arenoso en la Patagonia chilena.

Por ser un ensayo que comparte algunas características similares al ensayo SPT, los valores de la prueba DPSH se pueden correlacionar de forma directa con el número de golpes/pie(ft) del SPT. De la misma manera, se han presentado algunas investigaciones en donde correlacionan esta prueba con otros tipos de ensayos de campo, como el mencionado en [8], en el cual se presentan equivalencias entre los valores de la prueba DPSH y la resistencia estática  $q_c$  de la prueba de penetración estática de cono (CPT) en ciertos suelos cohesivos de Lituania. En este mismo sentido, el trabajo desarrollado por [9] relaciona algunos resultados de la prueba de dilatómetro de Marchetti (DMT) con pruebas DPSH y SPT en suelos residuales de Portugal.

Durante los últimos 50 años, se han estudiado correlaciones entre los resultados de la prueba DPSH ( $N_{DPSH}$ ) y los resultados de la prueba SPT ( $N_{SPT}$ ) para distintos tipos de suelos. Por ejemplo, el autor [10] propone una correlación general para suelos arenosos a partir de ensayos ejecutados en Suecia. En [11] se publicó una correlación para el uso en suelos de textura finogranular en España.

Los autores en su investigación [12] obtienen distintas relaciones a partir de 139 datos en los suelos de la cuenca de Madrid (España). Así también, el trabajo de [13] comunica una relación para suelos arenosos en



Sudáfrica, aunque registrando los valores de  $N_{DPSH}$  cada 30 cm. En este sentido, [14] establece los límites máximos y mínimos de la relación  $N_{SPT}/N_{DPSH}$  obtenidos entre pruebas manuales SPT y ensayos DPSH en Brasil. Recientemente, en [15] se relaciona los resultados de 32 pares de valores DPSH – SPT obtenidos en cuatro campos experimentales en Portugal sobre suelos arenosos, y compara los resultados obtenidos con las expresiones alcanzadas en [16] para los mismos campos experimentales.

Como resultado de este rastreo, en la Tabla 1, se agrupan las correlaciones más conocidas y utilizadas para predecir el valor de  $N_{SPT}$ . De las cinco correlaciones mostradas, dos están basadas en regresiones logarítmicas y tres en regresiones exponenciales. Algunas de estas correlaciones no tienen estadísticas bien definidas o bien, se han propuesto a partir de datos de una zona en particular;

por lo tanto, su uso requiere juicio y precaución, ya que deben ser utilizadas sólo en determinadas condiciones de suelo y procedimientos definidos.

Este artículo propone equivalencias entre las pruebas DPSH y SPT a partir datos obtenidos de distintos trabajos realizados en Colombia. Esto puede significar un primer paso para establecer el grado de confianza que pueda tenerse en nuestro medio, cuando se aplique alguna de las correlaciones planteadas en este trabajo y que, como reflexión, es importante transmitirlo al gremio la necesidad de ampliar las posibilidades de investigación geotécnica, para dar mayor versatilidad a los métodos de caracterización geotécnica que actualmente se usan en Colombia.

**Tabla 1.** Relaciones entre el  $N_{SPT}$  y el  $N_{DPSH}$  propuestas por diferentes autores

Referencia	Correlación	R <sup>2</sup>	Tipo de suelo
Dahlberg [10]	$N_{SPT}=25*\text{Log}_{10}(1.22*N_{DPSH})-15.16$	-	Granulares
Dapena y Lacasa [11]	$N_{SPT}=(13*\text{Log}_{10} N_{DPSH})-2$	-	Cohesivos
	$N_{SPT}=2.24*N_{DPSH}^{0.87}$	0.84	General
López-Chinarro <i>et al.</i> [12]	$N_{SPT}=2.25*N_{DPSH}^{0.86}$	0.87	Granulares
	$N_{SPT}=2.10*N_{DPSH}^{0.90}$	0.81	Cohesivos

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de las pruebas para este estudio se han obtenido, esencialmente, de proyectos ejecutados en Colombia, entre los años 2016 a 2021, donde coincidieran proyectos de diseño que involucraran la ejecución de pruebas SPT y DPSH adyacentes; para ello, se han consultado, principalmente, exploraciones geotécnicas para proyectos de áreas de emplazamientos de zonas de vertido de materiales de excavación, cimentaciones superficiales y profundas, y en menor medida, exploración para estudios de estabilidad de taludes. En términos geológicos, las pruebas fueron realizadas sobre depósitos

aluviales finos y gruesos, depósitos de vertiente, así como, en horizontes de suelos residuales.

Las pruebas DPSH se han realizado bajo la norma española UNE-EN ISO 22476-2 [17], utilizando un equipo moderno. En relación con los útiles del ensayo, específicamente, se han usado barras de 1 m de longitud y de diámetro de 32 mm, marcadas en su periferia cada 20 cm, tal y como lo indica la citada norma. También se ha usado un sistema con puntazas perdidas (sin rosca). El conjunto ha sido golpeado continuamente mediante un martillo con dispositivo de elevación automática, con una velocidad comprendida entre 15 y 30 golpes por minuto,

registrando los golpes necesarios para hacer avanzar las barras cada 20 cm, obteniendo los valores de  $N_{20}$  ó  $N_{DPSH}$ , es decir, el número de golpes en cada serie de 20 cm de avance.

Las pruebas SPT se han realizado siguiendo las normas INV E-111-13 [18] y UNE-EN ISO 22476-3 [19]. El equipo para la ejecución del ensayo ha sido el mismo que el de la prueba DPSH, salvo que como útiles de ensayo, se ha usado tubería de 1 m de longitud y de 50 mm de diámetro, junto con la cuchara característica de este ensayo.

Ciento veintinueve pares de valores (129) de SPT y DPSH fueron considerados en este estudio, los cuales se encuentran entre profundidades de 0 a 25 m, siendo más recurrente las pruebas hasta los 10 m, y no distanciados entre sí no más de 2 m en todos los casos. Cada valor de  $N_{SPT}$  fue tomado directamente del valor obtenido en campo, por lo tanto, no se le ha aplicado las correcciones por esfuerzo efectivo, profundidad, varillaje, etc.

Para cada muestra SPT se realizaron ensayos de laboratorio de clasificación, específicamente, granulometría por tamizado [20] y límites de Atterberg [21]. La metodología de clasificación utilizada ha sido el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS [22]. De los resultados de clasificación, el 46.5% de las muestras corresponden a suelos de textura arenosa con abundantes finos, 32.6% corresponde a datos de suelos cohesivos, y, el porcentaje restante a suelos arenosos limpios y gravas.

Previo a la estimación de las correlaciones, ha sido necesario definir las agrupaciones texturales de estudio, definiendo una de manera general (sin diferenciación textural), así como agrupaciones que se han basado en la facilidad de diferenciación de suelos cohesivos (arcillas y limos) y granulares, en estos últimos para arenas relativamente limpias (<12% finos), arenas con contenidos apreciables de finos (12%<%finos<50%) y gravas. Tras el razonamiento anterior, se han graficado los pares de valores  $N_{SPT}$  y  $N_{DPSH}$  de acuerdo con dichas agrupaciones, y se determinaron los coeficientes de correlación construyendo la línea de tendencia que más

se ajustara para cada uno de los supuestos analizados, ajustando cada iteración mediante un algoritmo de regresión de distancia ortogonal (ODR).

Finalmente, se han analizado y comparado los ajustes obtenidos con las expresiones logradas por distintos autores. La Figura 1 ilustra los pasos que se siguieron para lograr el objetivo de este estudio.

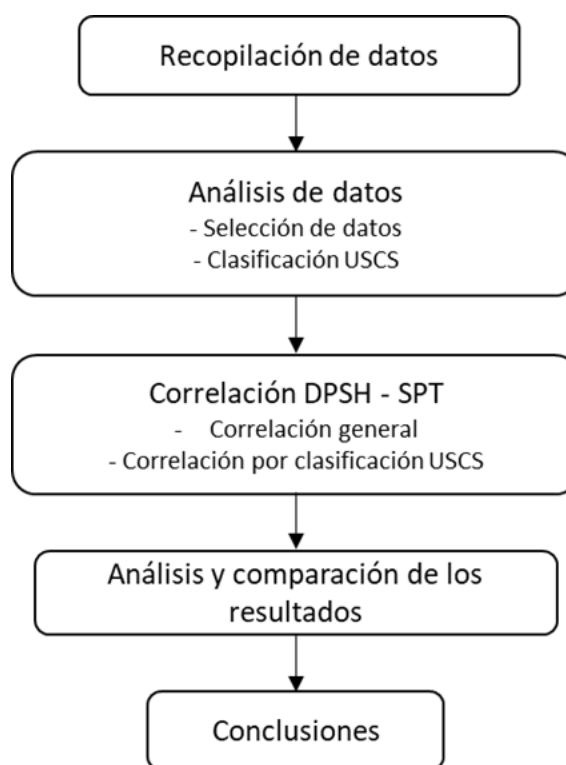


Figura 1. Diagrama de flujo metodológico seguido en el presente trabajo

### 3. RESULTADOS

Se han obtenido cinco equivalencias a manera de regresiones exponenciales. La primera equivalencia corresponde a una correlación general sin particularizar las características texturales de los suelos evaluados, mientras que las equivalencias restantes relacionan las texturas de los suelos de acuerdo con las agrupaciones que se han mencionado anteriormente. En la Tabla 2 y en la Figura 2 se muestran las expresiones y las gráficas de

cada uno de los análisis descritos.

La correlación general fue obtenida para los casos donde la caracterización del terreno incluye solamente este tipo de ensayos, desconociendo las características texturales de los suelos. La curva de regresión para todos los casos queda mejor ajustada en el entorno de 1 a 13 golpes, mientras que para golpes superiores la dispersión aumenta, con valor medio general de la relación  $N_{SPT}/N_{DPSH} \approx 1.62$ .

En los suelos finos se obtiene una regresión casi lineal, aunque con pocos datos de golpes superiores a 15. La relación media obtenida es de  $N_{SPT}/N_{DPSH} \approx 1.80$ .

Ahora bien, en suelos arenosos con apreciables contenidos de finos se observan las mayores dispersiones evaluadas, sin embargo, esta correlación presenta buena cantidad de datos introducidos que representan una regresión confiable, con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0.94 y una relación media de  $N_{SPT}/N_{DPSH} \approx 1.76$ .

De otro lado, la menor cantidad de datos están involucrados en las regresiones de suelos arenosos limpios y gravas, donde se marcan regresiones un poco más horizontalizadas con respecto a las demás regresiones, y con valores de  $R^2$  no menores a 0.88. La relación media de  $N_{SPT}/N_{DPSH}$  es de 1.35 y 1.57, respectivamente.

**Tabla 2.** Correlaciones obtenidas DPSH- SPT

Tipo de suelo	Agrupación USCS [22]	Función línea de tendencia	Ecuación obtenida	$R^2$
<b>General</b>	Todos	Exponencial	$N_{SPT}=2.29*N_{DPSH}^{0.88}$	0.95
<b>Arcillas y limos</b>	CL, CH, ML, MH	Exponencial	$N_{SPT}=2.07*N_{DPSH}^{0.95}$	0.97
<b>Arenas con finos</b>	SC, SM	Exponencial	$N_{SPT}=2.52*N_{DPSH}^{0.88}$	0.94
<b>Arenas limpias</b>	SW, SP, SW-SC, SW-SM, SP-SC, SP-SM	Exponencial	$N_{SPT}=2.72*N_{DPSH}^{0.75}$	0.91
<b>Gravas</b>	GW, GP, GW-GC, GW-GM, GP-GC, GP-GM	Exponencial	$N_{SPT}=2.75*N_{DPSH}^{0.81}$	0.88

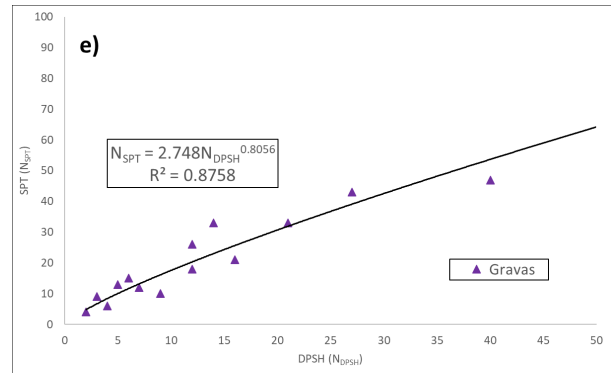
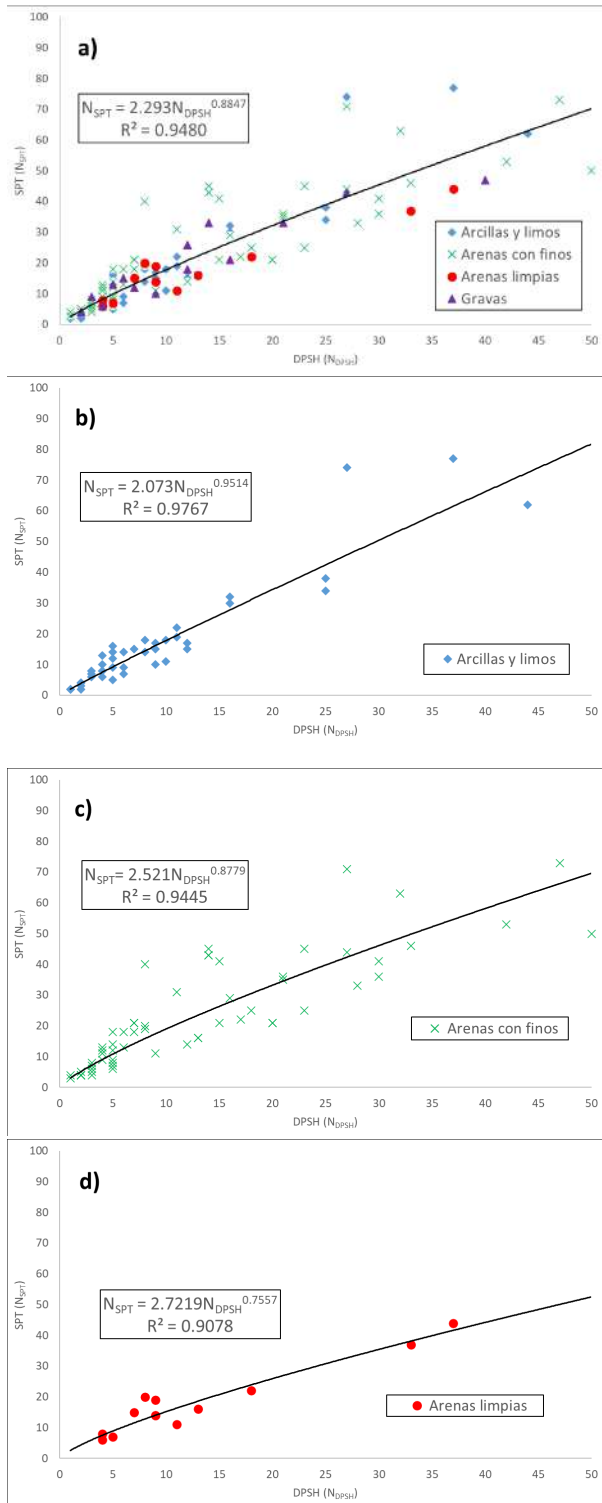
## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. Correlaciones obtenidas

Es importante anotar que las correlaciones concebidas en la Tabla 2 están orientadas a predecir un  $N_{SPT}$  de campo con sistema automático de caída, dada las características del equipo utilizado.

Como se ha mencionado anteriormente, en los suelos finos se presenta una limitante de golpes después de los 15 golpes, que tiene que ver en gran parte con las profundidades de las pruebas valoradas, la génesis geológica de los suelos evaluados y del nivel de esfuerzos a la profundidad de penetración. Es importante resaltar que, en este tipo de suelos, el rozamiento superficial a lo largo de la barra tiene una influencia considerable sobre la resistencia a la penetración; por lo cual, existe la incertidumbre sobre el porcentaje de golpeo que se le atribuye a este rozamiento [17].

Las dispersiones en los datos sobre la regresión en suelos arenosos con apreciable contenido de finos pueden acudir al contenido de partículas finas, que van desde un 12% hasta un 50%; por otro lado, cuanto mayor sea el porcentaje de finos, de igual manera, tendrá afectaciones por rozamiento en las barras de hinca. No obstante, en arenas relativamente limpias y gravas, la resistencia a la penetración aumenta con el incremento de la densidad relativa [17], en una proporción más o menos lineal.



**Figura 2.** Correlaciones para los diferentes tipos de suelos. a) Correlación general. b) Arcillas y limos. c) Arenas con finos. d) Arenas limpias. e) Gravas.

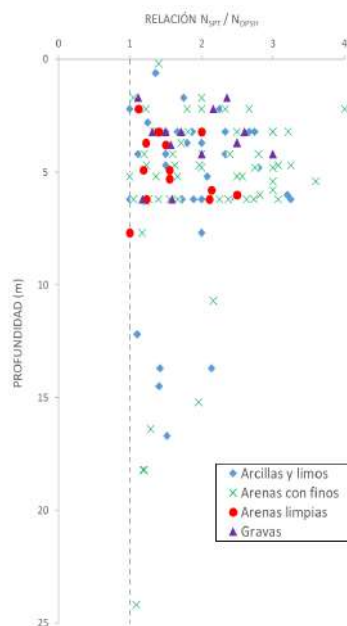
Un aspecto importante en este tipo de suelos es que la distribución y forma de las partículas (esfericidad y redondez), la selección de los mismos (coeficientes de uniformidad y de curvatura) y el grado de cementación influyen en la resistencia a la penetración [17], [19]. Por otro lado, se ha visto con la experiencia en este tipo de suelos que la resistencia a la penetración de una misma capa por debajo del nivel freático es más baja que por encima del mismo, lo cual podría relacionarse a que el esfuerzo efectivo vertical es más bajo.

En consecuencia, el rozamiento de las barras en los datos obtenidos se manifiesta en la concavidad de las curvas de regresión, es decir, a mayores golpes, la pendiente de la relación DPSH vs SPT es cada vez menor. Eso implica que a mayor profundidad harán falta, proporcionalmente, más golpes DPSH que SPT. Bajo esta situación, entran en juego dos factores: la influencia del rozamiento de las varillas y el peso de estas en la energía del golpeo.

Como resultado, al examinar la totalidad de datos del presente estudio, se ha graficado la relación  $N_{SPT}/N_{DPSH}$  en función de la profundidad, tal y como se muestra en la Figura 3, observándose que la mayoría de los datos se encuentran en profundidades entre los 0 y 7 m, con un valor promedio de  $N_{SPT}/N_{DPSH} \approx 1.62$ . Para profundidades entre los 10 a 20 m se observan valores de  $N_{SPT}/N_{DPSH}$  entre 1.40 a 1.20 para suelos cohesivos como para arenas con contenidos apreciables de finos.

Finalmente, después de los 20 m de profundidad, y aunque solo se obtuvo un dato de referencia en suelos arenosos con finos, la relación se acerca a la unidad. En cualquier caso, estos valores son muy dependientes del grado de homogeneidad del suelo a lo largo del perfil del ensayo, ya que en cierto modo algunos suelos tendrán distinto aporte por rozamiento. Con el fin de involucrar la influencia del rozamiento, se ha realizado un análisis de regresión lineal múltiple para todos los datos, obteniéndose la ecuación (1), que, de manera general, presenta la predicción del valor de  $N_{SPT}$  en función del  $N_{DPSH}$  y de la profundidad  $z$ , con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0.78.

$$N_{SPT} = 5.15 + 1.38 * N_{DPSH} - 0.21 * z \quad (1)$$



**Figura 3.** Relación  $N_{SPT}/N_{DPSH}$  con la profundidad para los datos evaluados

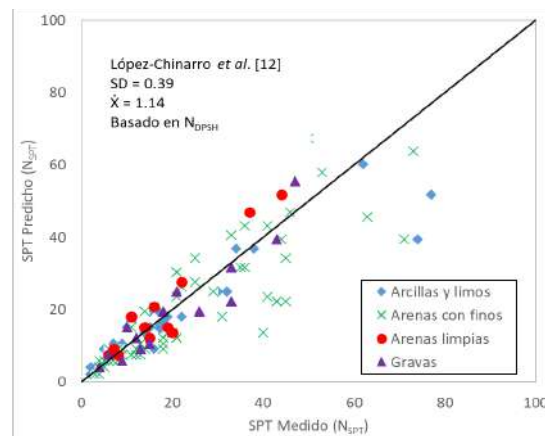
#### 4.2. Comparación

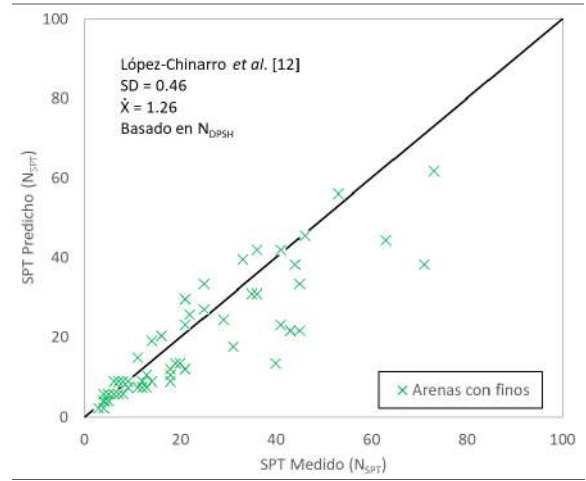
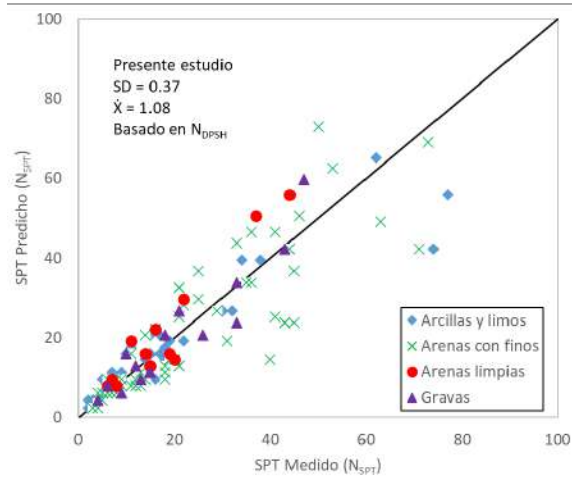
Para evaluar la confianza de las correlaciones propuestas en el presente estudio a partir de los valores  $N_{DPSH}$ , los valores de  $N_{SPT}$  medidos se graficaron con respecto a los valores de  $N_{SPT}$  predichos, y se compararon con las correlaciones obtenidas en [12], ya que este presenta

el mayor número de datos base hasta el momento publicados, los cuales no son muy distantes en cantidad a los utilizados en el presente estudio. En este sentido, y para la evaluación estadística de las correlaciones se utilizó la media estadística ( $\bar{X}$ ) y la desviación estándar (SD) con la media y la desviación estándar de la relación  $N_{SPT}$  Medido y  $N_{SPT}$  Predicho, respectivamente. La Figura 4 muestra el  $N_{SPT}$  Medido vs el  $N_{SPT}$  Predicho para las correlaciones del trabajo citado, así como para las correlaciones obtenidas en el presente estudio.

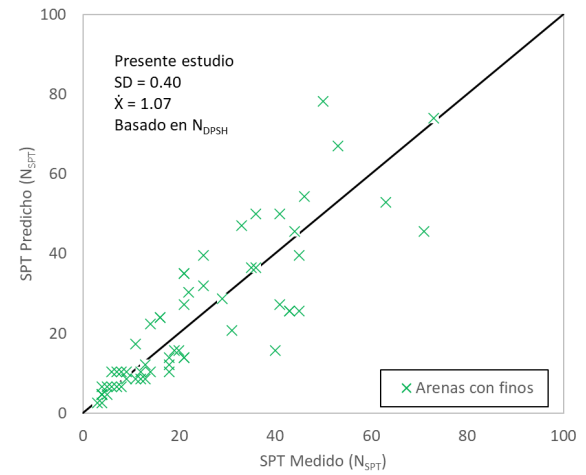
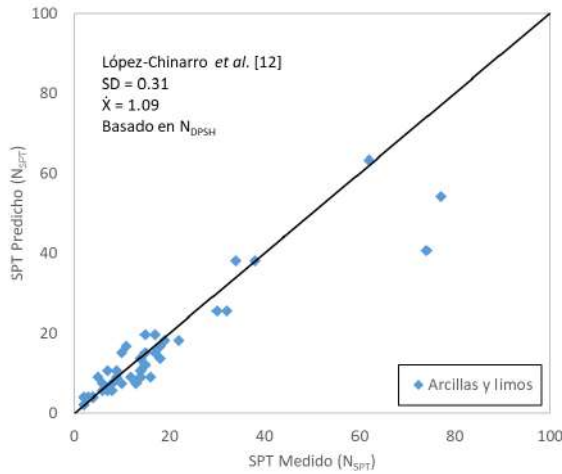
Los resultados de la comparación indicaron que las correlaciones propuestas han proporcionado una estimación acertada con respecto a los datos medidos (SD=0.37 y  $\bar{X}$ =1.08 para la correlación general, SD=0.28 y  $\bar{X}$ =1.01 para arcillas y limos, SD=0.40 y  $\bar{X}$ =1.07 para arenas con finos, y SD=0.24 y  $\bar{X}$ =1.01 para arenas limpias). Después de las correlaciones propuestas, la correlación para suelos cohesivos de [12] tuvo la mejor estimación y el error más bajo (SD=0.31 y  $\bar{X}$ =1.09).

Por otro lado, se observa que la correlación propuesta para suelos granulares de los autores citados anteriormente, en comparación con las correlaciones de suelos arenosos del presente estudio, expone mejores estimaciones y errores más bajos cuando se compara con la correlación de arenas limpias (SD=0.25 y  $\bar{X}$ =0.96), lo cual puede indicar, que esta correlación puede haberse obtenido para esta textura predominante, y tendría una leve limitante al usarla para el caso de suelos arenosos con contenidos apreciables de finos.

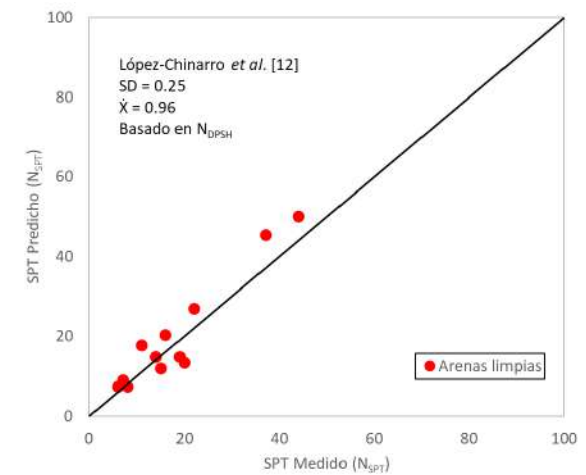
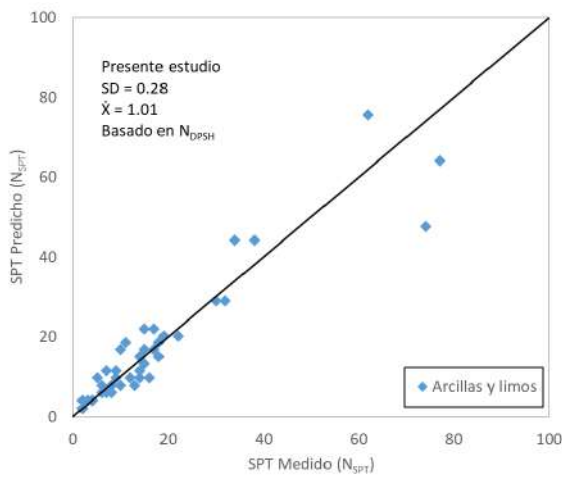




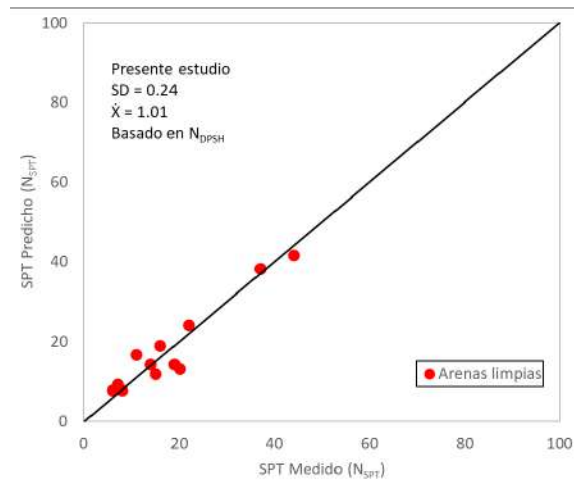
a) Correlación general



c) Correlación en arenas con finos



b) Correlación en suelos cohesivos



d) Correlación en arenas limpias

Figura 4. Valores de SPT Medidos vs SPT Predichos

## 5. CONCLUSIONES

En el presente estudio se han usado técnicas estadísticas ordinarias para correlacionar los valores de la prueba de penetración estándar (SPT) y la prueba de penetración dinámica super pesada (DPSH). Para ello, se han considerado 126 pares de valores de estos ensayos, incluyendo su clasificación granulométrica. Con este conjunto de datos se realizaron varias regresiones exponenciales y un estudio comparativo para reportar el grado de confianza de las correlaciones obtenidas con las propuestas de distintos autores.

Este estudio concluye, que si bien, las propuestas de correlación de los autores estudiados se ajustan de manera coherente a las obtenidas en el presente documento, se incluye de forma más particularizada rangos texturales que en la actualidad no habían sido correlacionados, de la misma manera, se involucran dos correlaciones generales, para cuando la incertidumbre en el tipo de material atravesado sea alta, o, para tener en cuenta el rozamiento de las barras según la profundidad del ensayo.

De manera indirecta lo que indaga este artículo, es importante destacar que la prueba DPSH es un ensayo de

campo que por su rapidez y economía resulta atractiva frente a los métodos convencionales usados en Colombia, como el ensayo SPT, que, en la mayoría de los casos, se ha visto en un atraso tecnológico en cuanto al control, forma y mecanismo de ejecución. Asimismo, la prueba DPSH se presenta como un registro directo y continuo de campo que permite valorar de manera más precisa la sensibilidad a cambios de compacidad y/o consistencia en el perfil estratigráfico de los suelos.

En consecuencia, la prueba DPSH es un método válido y automatizado para la caracterización geotécnica del terreno, entendiendo sus limitaciones, pero siempre que sea posible, deberá acompañarse de campañas geotécnicas de confirmación (sondeos, apiques, calicatas, etc.), que permitan conocer la textura del subsuelo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la empresa Zofre SAS por facilitar los registros de las pruebas y los datos de los ensayos de laboratorio.

## REFERENCIAS

- [1] J. Herrera and J. Castilla, *Utilización de Técnicas de Sondeos en estudios Geotécnicos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, 2012. Acceso: Mar. 11, 2022. [Online]. Disponible en: <https://oa.upm.es/10517/>
- [2] U. K. Jadoon, I. Khalid, S. A. Khan, W. Ullah, and W. Ullah, "Design and Simulation of Dynamic Probing Super Heavy Machine used for Geotechnical Investigation," in *1st International conference on recent advances in civil and earthquake engineering (ICCEE)*, Oct. 2021, p. 59.
- [3] A. J. González, "Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT," *X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana*, 1999.
- [4] J. Díaz-Curiel, S. Rueda-Quintero, B. Biosca, and G. Donate-Matilla, "Advance in the penetrometer test formulation to estimate allowable pressure in

- granular soils," *Acta Geotechnica*, vol. 12, no. 5, pp. 1119–1127, 2017, doi: 10.1007/s11440-017-0565-x.
- [5] R. Jordá and L. Jordá, "Notas sobre los ensayos de penetración dinámica superpesada en la zona Andina (Ecuador y Perú)," *Ingeopres: Actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*, no. 224, pp. 52–56, 2013.
- [6] Á. A. Martínez Girón, D. Martín Sánchez, D. Orbezo Parrao, and Á. Fernández Vélez, "Los ensayos 'in situ' de penetración dinámica continua y su utilización en México," *XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, Nov. 2014.
- [7] V. Peredo Andrade and R. Carrasco Poll, "Correlación entre el ensayo penetrómetro dinámico Grizzly (DPSH) y SPT en arenas potencialmente licuables del sector Punta Arenosa en la ciudad de Punta Arenas," *X Congreso Nacional Sochige Valparaíso*, 2018.
- [8] G. Žaržojus and K. Dundulis, "Problems of correlation between dynamic probing test (DPSH) and cone penetration test (CPT) for cohesive soils of Lithuania," *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 69–75, 2010, doi: 10.3846/bjrbe.2010.10.
- [9] N. Cruz and A. Viana da Fonseca, "Portuguese experience in residual soil characterization by DMT tests," *2nd Int. Conf. On Flat Dilatometer*, 2006.
- [10] R. Dahlberg, "Penetration testing in Sweden," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 13, no. 9, p. A110, 1976, doi: 10.1016/0148-9062(76)90104-2.
- [11] E. Dapena and J. G. Lacasa, "Relación entre los resultados de los ensayos de penetración dinámica Borros DPSH y el SPT en un suelo arcilloso," *Actas del Simp. sobre geotecnia de las infraestructuras lineales. Soc. Española de Mec. del Suelo e Ing. Geotécnica*, 2000.
- [12] J. A. López-Chinarro, F. P. Marín, and R. C. Pugh, "Propuesta de correlación para los suelos de la cuenca de Madrid entre el golpeo obtenido con ensayos de penetración DPSH y SPT," *Revista Digital del Cedex*, no. 146, p. 111, 2007.
- [13] C. MacRobert, D. Kalumba, and P. Beales, "Correlating standard penetration test and dynamic probe super heavy penetration resistance values in sandy soils," *Journal of the South African Institution of Civil Engineering Joernaal van die Suid-Afrikaanse Instituut van Siviele Ingenieurswese*, vol. 53, no. 1, pp. 46–54, 2011, doi: 10.10520/EJC27057.
- [14] S. F. de Carvalho, "Prova dinâmica super pesada-DPSH: uma proposta de correlação com a sondagem de simples reconhecimento SPT," Florianópolis, Brasil, 2017.
- [15] V. do C. Destéfano, "Ensaio de penetração dinâmica—correlações entre o ensaio standard penetration test (SPT) e o penetrómetro dinámico super pesado (DPSH)," Bragança, Portugal, 2021.
- [16] A. F. Afonso, "Correlações entre resultados de ensaios in situ de penetração dinâmica DP com o ensaio standard penetration test," Bragança, Portugal, 2016.
- [17] UNE-EN ISO, "22476-2: Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de campo. Parte 2: Ensayo de penetración dinámica," *AEONOR: Madrid, España*, 2008.
- [18] Instituto Nacional de Vías, "E-111: Ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido," *Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Bogotá, Colombia*, 2013.
- [19] UNE-EN ISO, "22476-3: Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de campo. Parte 3: Ensayo de penetración estándar," *AEONOR: Madrid, España*, 2006.
- [20] ASTM, "D 422: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils," *ASTM International, West Conshohocken*, 2002.
- [21] ASTM, "D 4318: Standard test methods for liquid limit, plastic limit and shrinkage limit of soils," *ASTM International, West Conshohocken*, 2017.
- [22] ASTM, "D 2487: Standard classification of soils for engineering purposes," *ASTM International, West Conshohocken*, 2011.



## LA INOCUIDAD EN LA ELABORACIÓN DE ALIMENTOS EN RESTAURANTES DE COMIDA PERUANA PARA EMPRENDEDORES

### Food safety in Peruvian food restaurants for entrepreneurs

Jorge Paucar Luna<sup>1</sup>, Lida Vásquez Pajuelo<sup>2</sup>, Mayra Elizabeth Navarrete Ormeño<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, <sup>2</sup>Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima,

<sup>3</sup>Universidad Nacional del Callao, Perú. Email: <sup>1</sup>[1jpaucarl@unmsm.edu.pe](mailto:1jpaucarl@unmsm.edu.pe), <sup>2</sup>[2lidavasquezpajuelo@gmail.com](mailto:2lidavasquezpajuelo@gmail.com)

<sup>3</sup>[3ingalimentosmayra@gmail.com](mailto:3ingalimentosmayra@gmail.com)

(Recibido octubre 29 de 2021 y aceptado noviembre 30 de 2021)

#### Resumen

El auge gastronómico en el Perú ha motivado que muchos emprendedores inviertan en restaurantes de comida peruana; a la espera de que cuando el Estado peruano la declare patrimonio cultural de la nación, se implementen las normas legales de calidad e inocuidad. En este sentido, estas deben abarcar desde la apertura y operación de nuevos locales hasta el énfasis en normatividad clara tanto para las micro como para las medianas empresas. El objetivo de esta investigación fue diseñar medidas de calidad e inocuidad centradas en la protección de la vida y la salud de los comensales en el proceso de elaboración de alimentos en restaurantes de comida peruana de medianas y pequeñas empresas. La metodología empleada es cualitativa, cuyo resultado proveniente del análisis del árbol de decisiones, la cual determinó los Puntos Críticos de Control (PCC) siendo la cocción y desinfección, [6] etapas que controlarán los peligros biológicos. Con lo anterior, se concluyó mejorar el rendimiento de costos, a través del control de mermas en el almacenamiento de materias primas y el rechazo de preparaciones, así también, asegurar la protección del consumidor, brindando alimentos inocuos que generen confianza y satisfacción.

**Palabras clave:** *inocuidad en los alimentos, auge gastronómico en Perú, restaurantes de comida peruana, puntos críticos de control.*

#### Abstract

The gastronomic boom in Peru has motivated many entrepreneurs to invest in Peruvian food restaurants; hoping that when the Peruvian State declares it a cultural heritage of the nation, the legal standards of quality and safety will be implemented. In this sense, it should be range from the opening and operation of new premises and that emphasis be placed on clear regulations for micro and medium enterprises. The objective of this research was to design quality and safety measures focused on protecting the life and health of diners in the food preparation process in small and medium-sized Peruvian food restaurants. The methodology used is qualitative, whose result of the analysis of the decision tree determined the Critical Control Points (CCP) being cooking and disinfection stages that control biological hazards. It was concluded, in improving cost performance, through the control of losses in the storage of raw materials and rejection of preparations, at the same time, it is important ensuring consumer protection, providing safe food, that generate trust and satisfaction.

**Key words:** *food safety, gastronomic boom in Peru, Peruvian food restaurants, critical control points.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La gastronomía peruana sigue conquistando los paladares atrayendo cada vez más visitantes de diferentes países interesados en deleitar nuestra amplia gama de potajes. Con base en lo anterior, los encargados de proveer alimentos han buscado la disminución de la inocuidad como un conjunto de principios definidos para orientar decisiones que llevan a alcanzar resultados medibles, es decir, es el compromiso de asumir este proceso como política para las empresas. En este sentido, la alta dirección debe establecer la política donde se compromete en la creación de un sistema de gestión con base en la identificación, evaluación de riesgos y control de peligros para asegurar la inocuidad de los alimentos.

## 2. ANTECEDENTES

En el Perú, la agenda del desarrollo sostenible vinculada al crecimiento económico, producción y consumo responsable tiene como finalidad promover un turismo sostenible, desde la cultura y sus productos locales; así como, la reducción de los desperdicios de alimentos en la cadena de producción y suministros. De esta manera, ha diseñado el proceso de elaboración de listas de preparaciones para consumo, las cuales se encuentran agrupadas por el tipo de tratamiento según “Norma Sanitaria que establece los criterios microbiológicos de calidad sanitaria e inocuidad para los alimentos y bebidas de consumo humano” R.M. 591 – 2008-MINSA, [4] siendo estas consideradas en el grupo de preparaciones con tratamiento térmico, en contraste, con las preparaciones cocidas calientes y cocidas frías y, en el grupo de preparaciones sin tratamiento térmico, a las preparaciones frías y las elaboradas a partir de productos manufacturados.

En concordancia con lo anterior, los criterios microbiológicos para los alimentos preparados están especificados según la “Norma sanitaria para restaurantes y servicios afines” R.M. 822-2018-MINSA, [4] dichos resultados se expresarán de acuerdo con el método de análisis empleado y a la cantidad de muestra analizada.

El conocimiento de estas herramientas facilitará el desarrollo de micro y medianas empresas, generando un instrumento para la planificación y uso eficiente de sus recursos. Concretamente, el objetivo de este estudio es diseñar medidas de calidad e inocuidad centradas en la protección de la vida y la salud en el proceso de elaboración de alimentos en restaurantes de comida peruana, a partir del siguiente interrogante: ¿qué importancia tiene diseñar medidas de calidad e inocuidad en la elaboración de alimentos en restaurantes de comida peruana para emprendedores? En consecuencia, la investigación debe responder a ésta cuestión con los resultados hallados y, sobre todo, gracias al aporte de mejora en calidad e inocuidad en los restaurantes.



Figura 1. Variedad de la cocina peruana [2]

## 3. METODOLOGÍA

Para asegurar la calidad e inocuidad en los buenos hábitos en la elaboración de alimentos es indispensable el apoyo por parte del sector público y privado, que puedan favorecer la reactivación económica al consumir los potajes peruanos. Al mismo tiempo, esta iniciativa brinda soporte técnico y profesional para el sector de las Mypes (Micro y Pequeña empresa). Conviene subrayar que el instrumento que asegura la calidad es el Sistema HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Points/Análisis y Puntos Críticos de Control*) [3] compuesto en 12 pasos, los cuales incluyen 7 principios (ver tabla 1). [1]

**Tabla 1.** Principios básicos del sistema HACCP [1]

Principios	Definición
Realizar un análisis de peligros e identificar las medidas preventivas respectivas	El análisis de peligros es un elemento clave en el desarrollo del plan HACCP. Es vital que este proceso se conduzca de manera apropiada, pues la aplicación de los otros principios implica tareas que utilizan los resultados del análisis de los peligros. En este sentido, las medidas de control se comprenden como cualquier acción o actividad utilizadas para evitar o eliminar un peligro a la inocuidad del alimento o reducirlo a un nivel aceptable.
Identificar los puntos críticos de control	Este principio hace referencia al PCC, según el Codex lo define como “una etapa donde se puede aplicar un control y que sea esencial para evitar o eliminar un peligro a la inocuidad del alimento o para reducirlo a un nivel aceptable”. La determinación de un PCC puede ser facilitada por la aplicación de un árbol de decisiones.
Establecer límites críticos	Un límite crítico representa los límites usados para juzgar si se trata de un producto inocuo o no, pueden establecerse límites críticos para factores como temperatura, tiempo, dimensiones físicas del producto, actividad de agua, etc.
Establecer un sistema de control para monitorear el PCC	Según el Codex definen monitoreo como “el acto de realizar una secuencia planificada de observaciones o medidas de parámetros de control para evaluar si un PCC está bajo control”. En consecuencia, monitorear es la medida programada para la observación de un PCC, con el propósito de determinar si están respetando los límites críticos.
Establecer las acciones correctivas que deben ser tomadas, cuando el monitoreo indique que indeterminado PCC no está bajo control	Según el Codex define a la acción correctora como “cualquier acción de ser tomada, cuando los resultados del monitoreo del PCC indiquen una pérdida de control”. Esta es considerada un desvío del límite crítico de un PCC. Así que, cuando ocurre un desvío, probablemente, este se registre durante el monitoreo del PCC, para que comprendan y sean capaces de ejecutar las acciones correctivas adecuadas.
Establecer procedimientos de verificación para confirmar si el sistema HACCP está funcionando de manera eficaz	Según el Codex definen verificación como “la aplicación de métodos, procedimientos, pruebas y otras evaluaciones, además de monitoreo, para determinar el cumplimiento del plan HACCP”.
Establecer documentación para todos los procedimientos y registros apropiados a esos principios y su aplicación.	Los registros son evidencias escritas que documentan un acto o hecho, son esenciales para revisar la adecuación del plan HACCP y la adhesión del sistema HACCP al plan.

Fuente: OPS/OMS (2015) [5]

Para las comidas preparadas con tratamiento térmico como son las ensaladas cocidas, guisos, arroces, guarniciones, entre otros; se evaluará los siguientes agentes microbianos; por otro lado, para las comidas preparadas sin tratamiento térmico como son las ensaladas crudas, las cremas, postres, jugos, etc. y, comidas que llevan

ingredientes con y sin tratamiento térmico, se evaluará los siguientes agentes microbianos como las ensaladas mixtas, sándwich, y demás. Según la normativa R.M. 591 – 2008, [4] se agrupan las preparaciones acordes a su tratamiento para ser consideradas aptas para el consumo humano, así:

**Tabla 2.** Lista de preparaciones según tratamiento térmico

<b>Listado de preparaciones</b>				
<b>N°</b>	<b>Cocida caliente</b>	<b>Cocida fría</b>	<b>Fria</b>	<b>Manufacturado</b>
1	Arroz chaufa de pollo	Aviador	Ensalada americana	Chilcano de maracuyá
2	Arroz con poto	Carlota de fresa	Ensalada de caihua	Chilcano de maracuyá
3	Arroz con pollo	Causa rellena	Ensalada de col	Cholo power
4	Bistec a lo pobre	Chapana	Ensalada de frutas	Coctel algarrobina
5	Camote Frito	Crema de pimiento	Ensalada de palta	Ensalada de Atún
6	Carapulcra de cerdo	Crema de rocoto	Ensalada de pepinillo	Flan de chocolate
7	Cau Cau	Empanada	Ensalada de rabanito	Flan de vainilla
8	Chicharrón de cerdo	Ensalada rusa	Ensalada de zanahoria	Gelatina de fresa
9	Chicharrones de camarones	Humita	Ensalada hawaiana	Gelatina de limón
10	Estofado de pollo	Keke de naranja	Ensalada de Kentucky	Gelatina de naranja
11	Frejoles guisados	Mousse de fresa	Ensalada mixta	Gelatina de piña
12	Locro de zapallo	Mousse de frutas	Ensalada primavera	Helado de arándano
13	Lomo saltado	Mousse de maracuyá	Ensalada tricolor	Helado de chocolate
14	Pejerrey arrebozado con huevo	Ocopa	Guacamole	Helado de fresa
15	Puré de papas	Papa a la huancaína	Jugo de guanábana	Helado de guanábana
16	Sancochado de res	Pie de manzana	Jugo de kiwi	Helado de lúcuma
17	Seco de res	Salpicón de pollo	Jugo de maracuyá	Helado de uva
18	Sopa de arvejas	salpicón de verduras	Jugo de naranja	Helado vainilla
19	Sopa de frijolitos	Solterito de habas	Jugo de piña	Helado princesa
20	Sopa seca de camarones	Solterito de queso	Nabo encurtido	Maracuyá Sour
21	Tallarín saltado	Tiramisú	Rabanito encurtido	Mojito
22	Tamales de cerdo	Torta helada	Refresco de fresa	Mojito maracuyá
23	Tamales de pollo	Torta de tres leches	Refresco de níspero	Piña colada
24	Torrijas de camarones	Turrón	Refresco de uva	Pisco sour
25	Tuca	Wantán con tamarindo	Salsa Criolla	Pudin de chocolate

Diagrama de flujo de proceso

El diagrama de flujo de proceso para las preparaciones

entregadas en el sector de mediana y pequeña empresa se ilustra en 03 procesos fundamentales (ver figura 1).

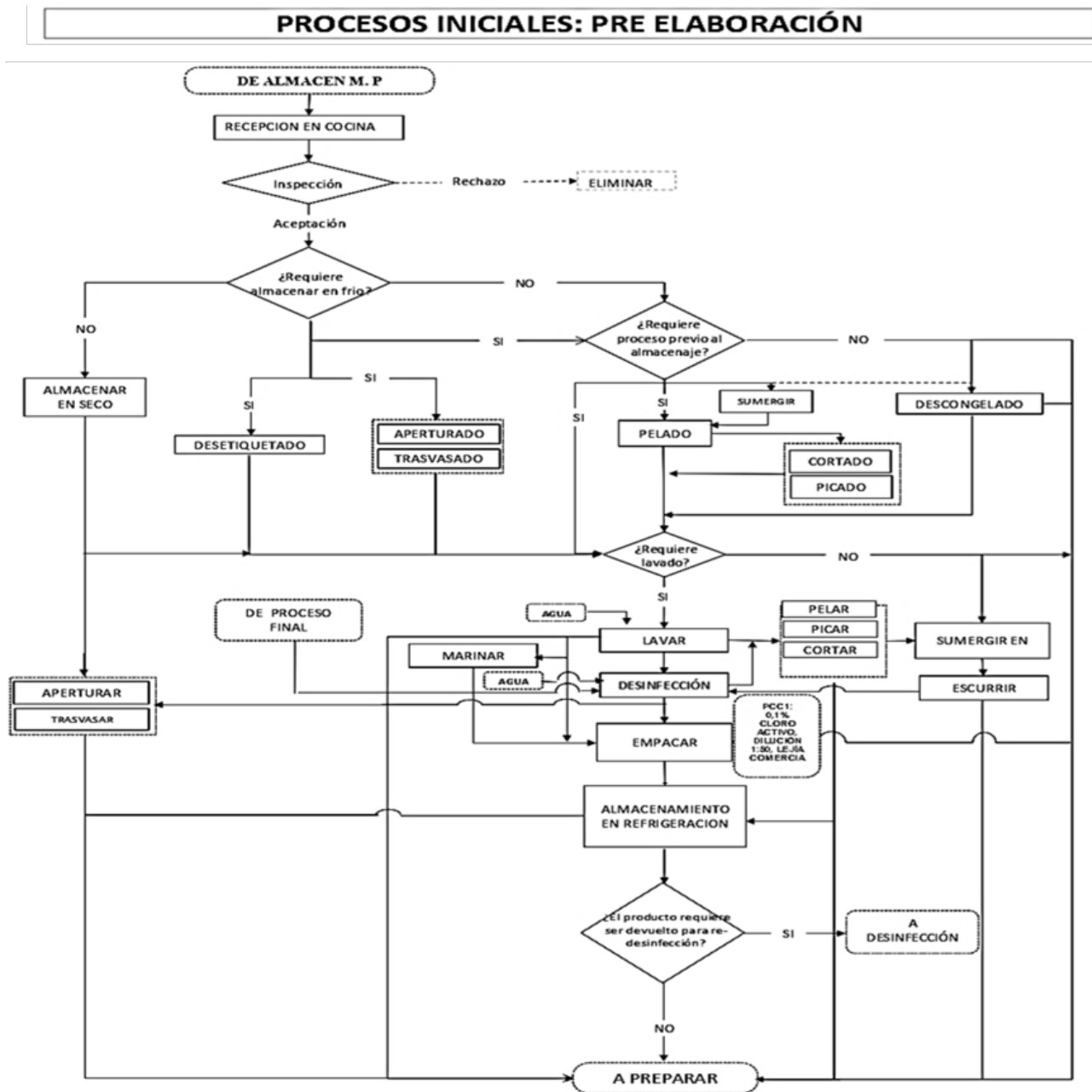
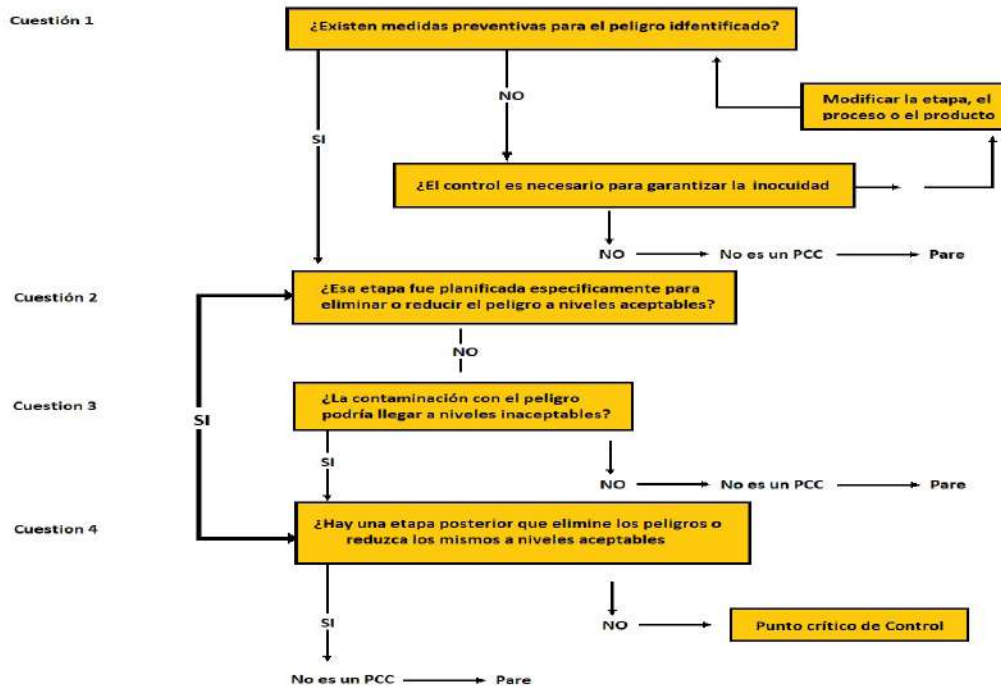


Figura 1. Proceso ingreso a almacén de Materia prima de alimentos

*Puntos críticos de control*

La determinación de un punto crítico de control para el sistema HACCP puede ser facilitada por la aplicación de

un árbol de decisiones, siendo flexible, según el tipo de operación desde la producción hasta la distribución (ver figura 4). [6]



**Figura 2.** Árbol de decisiones  
Fuente: OPS/OMS (2015) [5]

## 4. RESULTADOS

En consecuencia, se observa la muestra microbiológica del servicio de almuerzo previa implementación del

sistema en uno de los restaurantes, en donde se obtuvo resultados favorables como evidencia de la mejora en el proceso (ver tabla 8).

**Tabla 3.** Límites críticos de control [3]

Muestras	RESULTADOS				
	Numeración de Aerobios Mesófilos Viales	Recuento de coliformes	Numeración de Staphylococcus aureus	Numeración de Escherichia Coli	Detección de Salmonella
Crema de rocoto	20xUFC/g.	*<10 UFC/g.	*<10 UFC/g.	*<3 NMP/g.	Ausencia/25g.
Rocoto picado	30xUFC/g.	*<10 UFC/g.	*<10 UFC/g.	*<3 NMP/g.	Ausencia/25g.
Infusión de anís	12xUFC/g.	*<10 UFC/mL	*<10 UFC/mL	*<3 NMP/mL	Ausencia/mL
Cerdo al horno con arroz	*<10 UFC/g.	*<10 UFC/g.	*<10 UFC/g.	*<3 NMP/g.	Ausencia/25g.
DETERMINACIONES		MÉTODOS DE ENSAYO			
Numeración de aerobios mesófilos viales		ICMSF MICROORGANISM IN FOODS 1. 2nd Ed.1978 Traducido al español en ICMSF Microorganismos de los Alimentos 1. 2da. Ed.1983 Págs. 120_124 Reimpresión 2000			
Recuento de coliformes		AOAC 991.1421 st Ed 2019. Coliform and Escherichia coli counts in foods			
Numeración de staphylococcus aureus		AOAC 975.5521 st Ed 2019. Staphylococcus aureus in Foods			
Numeración de escherichia coli (NMP)		ICM SF MICROORGANIS IN FOODS 1. 2nd Ed. 1978 Traducido al español en ICMSF Microorganismos de los alimentos 1. 2da.Ed.1983. Págs. 139_142 Reimpresión 2000			
Detección de salmonella		ISO 6579_1: 2017 Microbiology of the food chain – Horizontal method for the detection of salmonella, enumeration and serotyping of salmonella spp. Part1: Detection of salmonella.			

*Resultados de la evaluación de desperdicios por áreas de almacenamiento*

Se puede evidenciar que la generación de mermas antes y después de la implementación del sistema ha sido beneficiosa para el emprendedor, reduciendo así en un 50% de su cantidad total de desperdicios en una

frecuencia semanal por área de almacenamiento, los cuales son secos (temperatura ambiente), refrigerados (en el rango de 0°C a 5°C) y congelados (-18°C), en los que se consideran los productos envasados, a granel, las frutas, hortalizas, los lácteos, carnes y aves, pescados y mariscos (ver tabla 10).

**Tabla 4.** Control de mermas antes y después del proceso

<b>FASE I: ANTES DE LA IMPLEMENTACIÓN</b>							
<b>EVALUACIÓN DE DESPERDICIOS POR ÁREAS DE ALMACENAMIENTO</b>							
<b>Cantidades</b>	<b>Áreas de trabajo</b>						
	<b>Secos</b>		<b>Refrigerados</b>			<b>Congelados</b>	
	<b>Productos envasados kg</b>	<b>Productos a granel</b>	<b>Frutas y verduras (kg)</b>	<b>Lácteos (kg)</b>	<b>Carnes (kg)</b>	<b>Carnes y aves (kg)</b>	<b>Pescados y mariscos (kg)</b>
Total semanal	180	150	160	120	70	80	40
Total de Merma	27	22.5	28.8	6	3.5	4	3.6
Diferencia (kg)	153	127.5	131.2	114	66.5	76	36.4
Porcentaje (%)	15	15	18	5	5	5	9
<b>FASE II : DESPUÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN</b>							
<b>EVALUACIÓN DE DESPERDICIOS POR ÁREAS DE ALMACENAMIENTO</b>							
<b>Cantidades</b>	<b>Áreas de trabajo</b>						
	<b>Secos</b>		<b>Refrigerados</b>			<b>Congelados</b>	
	<b>Productos envasados kg</b>	<b>Productos a granel</b>	<b>Frutas y verduras (kg)</b>	<b>Lácteos (kg)</b>	<b>Carnes (kg)</b>	<b>Carnes y aves (kg)</b>	<b>Pescados y mariscos (kg)</b>
Total semanal	180	150	160	120	70	80	40
Total de Merma	14.4	10.5	14.4	3.6	1.4	2.4	2
Diferencia (kg)	165.6	139.5	145.6	116.4	68.6	77.6	38
Porcentaje (%)	8	7	9	3	2	3	5
<b>RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN</b>							
<b>EVALUACIÓN DE DESPERDICIOS POR ÁREAS DE ALMACENAMIENTO</b>							
<b>Cantidades</b>	<b>Áreas de trabajo</b>						
	<b>Secos</b>		<b>Refrigerados</b>			<b>Congelados</b>	
	<b>Productos envasados kg</b>	<b>Productos a granel</b>	<b>Frutas y verduras (kg)</b>	<b>Lácteos (kg)</b>	<b>Carnes (kg)</b>	<b>Carnes y aves (kg)</b>	<b>Pescados y mariscos (kg)</b>
Antes %	15	15	18	5	5	5	9
Después %	8	7	9	3	2	3	5
Diferencia %	7	8	9	2	3	2	4



## CONCLUSIONES

En general, el análisis de la implementación del proceso de elaboración de las listas de preparaciones es beneficiosa tanto para los consumidores como para los propietarios de los establecimientos. Este proceso genera confianza en el cliente sea turista nacional o internacional. Lo cual promueve y genera conciencia en los buenos hábitos en la elaboración de alimentos. Así también es indispensable el apoyo por parte del sector público y privado para favorecer la reactivación económica en el Perú con soporte técnico y profesional para el sector de las Mypes.

## REFERENCIAS

- [1] R. Garayoa, A. I. Vitas, L. Diez & J. I. García (2011). *Food safety and the contract catering companies. Food handlers, facilities, and HACCP evaluation* 22(12), 2006-2012. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.05.021>
- [2] Gobierno del Perú (2022) Nota de Prensa. <https://www.gob.pe/institucion/produce/noticias/521312-ministro-quispe-apaza-vamos-a-fortalecer-a-los-restaurantes-de-todo-el-pais>
- [3] Instituto Nacional para la Calidad [INACAL] (2003). *Norma Técnica Peruana 833.910 Gestión de la inocuidad de los alimentos acorde con HACCP (Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control)*. Requisitos para ser cumplidos por las organizaciones que producen alimentos y sus proveedores.
- [4] Ministerio de Salud. (2006). *Norma sanitaria para la aplicación del sistema HACCP en la fabricación de alimentos y bebidas*. Dirección General de Salud Ambiental.
- [5] Organización Panamericana de la salud, Organización Mundial de la salud (2015). *Análisis de peligros y puntos críticos de control (HACCP)*. <https://www.paho.org/hq/dmdocuments/2017/food-safety-hacpp-cha-analisis-peligros-puntos-criticos-control.pdf>

## NANOPARTÍCULAS DE ORO FUNCIONALIZADAS CON L-CISTEÍNA PARA DETECCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA

### L-cysteine functionalized gold nanoparticles for Arsenic detection in water

Edgar E. González<sup>1,2</sup>, Yesid A. Acuña<sup>3</sup>, Ana M. Quiroz<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Colombia.

<sup>2</sup>Nanoscale Science and Technology Center "nanoCiTec", Colombia.

Email: <sup>1</sup>egonzale@javeriana.edu.co, <sup>3</sup>yesidacuna@javeriana.edu.co,

<sup>4</sup>aquirozp@my.centennialcollege.ca

(Recibido 09 de noviembre de 2021 y aceptado 05 de diciembre de 2021)

#### Resumen

En este artículo se reportan resultados experimentales de interacciones del aminoácido L-cisteína (Cis) con nanopartículas de oro (AuNPs) y nanopartículas de oro funcionalizadas con Cis (AuNPs+Cis) cuando se incorpora en la solución iones de As<sup>3+</sup>. En los procesos de agregación se evalúa el papel de la concentración de la Cis en la funcionalización, además del tamaño de las nanopartículas cuando se incorpora a la solución el agente iónico de interés. Los resultados muestran una sensible dependencia en la agregación de las nanosondas AuNPs+Cis en función de su tamaño, con un registro de mayor sensibilidad para nanopartículas de mayor diámetro. Se observa que la concentración de la Cis en el proceso de funcionalización es condición necesaria para la programación de la estabilidad de las nanosondas, aspecto esencial para configurar un modo estable para detección del agente iónico. De manera que, estos resultados permiten establecer criterios útiles para el diseño de sensores colorimétricos para detección de metales pesados en aguas contaminadas.

**Palabras clave:** *L-Cisteína, nanopartículas de oro, sensor colorimétrico.*

#### Abstract

Experimental results of interactions of the amino acid L-cysteine (Cis) with gold nanoparticles (AuNPs) and gold nanoparticles functionalized with Cis (AuNPs+Cis) when As<sup>3+</sup> ions are incorporated into the solution; all those processes are reported in this paper. In the aggregation processes, the role of the Cis concentration in the functionalization of the AuNPs is evaluated, in addition to the size of the nanoparticles when the ionic agent of interest is incorporated into the solution. The results show a sensitive dependence on the aggregation of the AuNPs+Cis nanoproboscopes as a function of their size, with a record of greater sensitivity for larger diameter nanoparticles. It is observed that the concentration of Cis in the functionalization process is a necessary condition for the programming of the stability of the nanoproboscopes, an essential aspect to configure a stable mode for the detection of the ionic agent. Therefore, these results allow us to establish useful criteria to design of colorimetric sensors to detect of heavy metals in contaminated water.

**Key words:** *L-Cysteine, gold nanoparticles, colorimetric sensor.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sensores colorimétricos constituyen una importante alternativa para la detección *in-situ* de agentes iónicos y moleculares. Son sistemas valorados por su versatilidad, bajo costo, portabilidad y facilidad de uso.

Aprovechando la oferta en metodologías sintéticas para control del tamaño y monodispersión de nanopartículas de metales nobles, entre los que se destaca el oro, se ha abierto una línea de gran actividad investigativa para incorporarlas como materia prima en diseño y manufactura de estos sistemas de detección.

Las nanopartículas de oro por su composición, forma y tamaño presentan excepcionales propiedades ópticas [1] que valoran su uso para sensado por cambios de color ante la presencia de un agente de interés. Para obtener una nanosonda con capacidad para detectar la presencia de un analito de interés, se requiere una nanopartícula de oro y un agente molecular fijado a la superficie por funcionalización con la capacidad de reconocer el analito y favorecer procesos de agregación de las nanopartículas.

Entre la gran variedad de potenciales agentes moleculares existentes para funcionalizar las nanopartículas de oro, se destacan los aminoácidos proteicos codificables tales como lisina, cisteína, histidina, tirosina y arginina. Con este tipo de aminoácidos usados en funcionalización de nanopartículas de oro, se ha construido un portafolio de sensado por colorimetría para los siguientes agentes iónicos:  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  [2].

En particular, la Cis ha sido ampliamente estudiada como agente biofuncionalizante para, junto con las nanopartículas de oro, confeccionar sondas AuNPs+Cis para sensado colorimétrico [3]. El grupo tiol que posee la molécula de Cis la hace apropiada para fijación sobre la superficie de la nanopartícula de oro, específicamente, por el enlace fuerte entre los átomos de Au y S. De otra parte, la Cis permite con la concentración adecuada, la agregación de las nanopartículas de oro bajo la presencia del analito de interés. Debido a esta agregación, las

propiedades dieléctricas del entorno de las nanopartículas y la distancia entre ellas, producen un efecto batocrómico que puede ser aprovechado para sensar con una elevada sensibilidad el analito de interés.

Este artículo reporta el uso de nanopartículas de oro funcionalizadas con L-Cisteína para configurar una nanosonda dispersa en medio acuoso que permita la detección por cambio de color de  $\text{As}^{3+}$ . En donde se evalúa el papel que juega el tamaño de las nanopartículas de oro en cuanto a la sensibilidad de agregación cuando son expuestas al analito, en este caso  $\text{As}^{3+}$ . Así también, se determina por vía experimental los cambios en la respuesta del pico de plasmón superficial producidos por agregación, cuando las nanosondas son expuestas a  $\text{As}^{3+}$ .

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

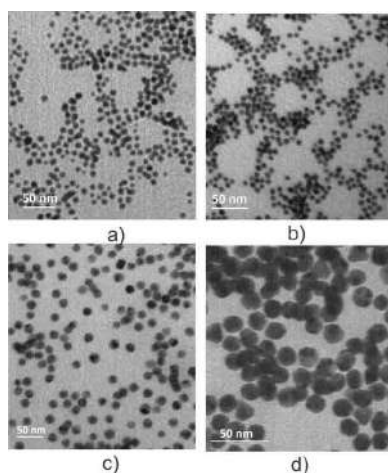
La síntesis de AuNPs es realizada con base en el método propuesto en [4]. A una solución de 100 mL de 0.8% de citrato de trisodio dihidratado ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$ )  $\geq 99\%$  en permanente agitación en agua desionizada (equipo millipore), se agrega 1 mL de 0.01% de cloruro de oro trihidratado ( $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) a 100 °C. Durante todo el tiempo de reacción, se mantiene constante el volumen de solvente con reflujo. El tamaño de las partículas es controlado con la concentración del citrato de trisodio o con adición de ácido tánico y son caracterizadas en tamaño por microscopía electrónica. La solución acuosa estándar a 1000 mg/L de  $\text{As}^{3+}$ , al igual que los reactivos utilizados fueron adquiridos en Sigma Aldrich y empleados tal como se recibieron.

En este sentido, para funcionalizar las nanopartículas de oro, se preparan tres muestras, cada una con un volumen de 5 mL del coloide de oro a las que se les agrega 10  $\mu\text{L}$  de cisteína preparada en una concentración de 0.1, 1 y 10 mM respectivamente. La solución se mantiene en constante agitación por tres horas a una temperatura de 60 °C. En seguida, gracias a la centrifugación, las nanopartículas son lavadas y re-dispersadas en agua desionizada para luego ser utilizadas en la configuración colorimétrica.

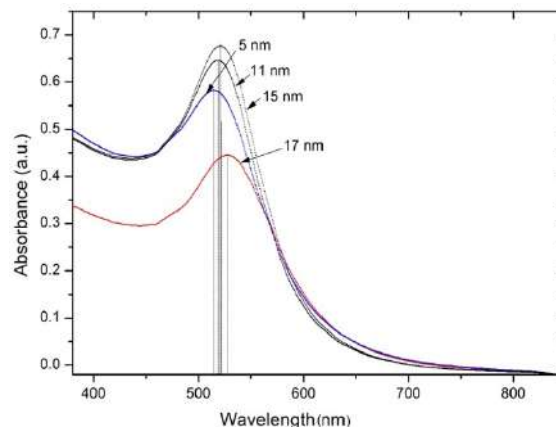
Las mediciones de DLS se realizan con el analizador Zetasizer Nano Zs, mientras que los espectros de absorción son registrados con el espectrofotómetro Shimadzu UV-2600. Las imágenes de agregación son obtenidas con el Microscopio Electrónico de Barrido Zeiss HD15 y para caracterización del tamaño de las nanopartículas con un Microscopio Electrónico de Transmisión JEOL JEM-1400.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con la modulación en la concentración del  $C_6H_5Na_3O_7$ , se obtiene cuatro diámetros diferentes de nanopartícula. Este grupo de diámetros permite evaluar los procesos de agregación en función del tamaño cuando las nanopartículas funcionalizadas con Cis son expuestas al ion de interés. La figura 1, ilustra los registros de microscopía electrónica de transmisión para los cuatro diámetros correspondientes a 5nm, 11nm, 15nm y 17nm y valores de monodispersidad de 87%, 85%, 91% y 88% respectivamente. Dichos valores resultan suficientemente elevados como para configurar una dispersión coloidal adecuada para detección colorimétrica. Tal y como se observa en la Figura 2, se indican los espectros de absorbancia para los diámetros obtenidos, en donde se observa el corrimiento hacia el rojo del pico de resonancia de plasmón en función del incremento del diámetro de las nanopartículas.



**Figura 1.** Registros con Microscopio Electrónico de Transmisión de nanopartículas de oro de a) 5nm, b) 11 nm c) 15 nm, d) 17nm.



**Figura 2.** Espectros de Absorbancia para las nanopartículas de oro sintetizadas. Se indican los picos de resonancia de plasmón para los diámetros obtenidos.

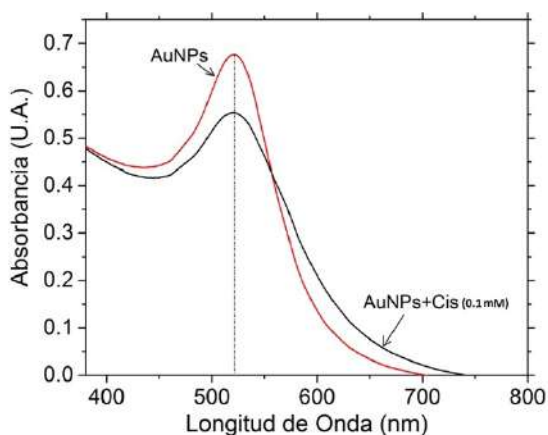
De las pruebas realizadas de agregación coloidal con los diferentes diámetros de las sondas AuNps+Cis, se observa una mayor estabilidad en presencia del ion de interés, cuando disminuye el valor del diámetro de la nanopartícula. Para el ion de  $As^{3+}$  se registran los espectros de absorbancia, los cuales se correlacionan con el grado de agregación. Estos resultados registran un mayor corrimiento hacia el rojo con el incremento del valor del diámetro de la nanopartícula.

De esta manera, con la disminución del tamaño de las nanopartículas se compromete la sensibilidad del sensor para detección. Esto se explica por el decremento de área superficial y, en consecuencia, la capacidad para la agregación. Como resultado, del grupo de diámetros obtenidos, se seleccionan las nanopartículas de 17 nm para la configuración de la sonda colorimétrica.

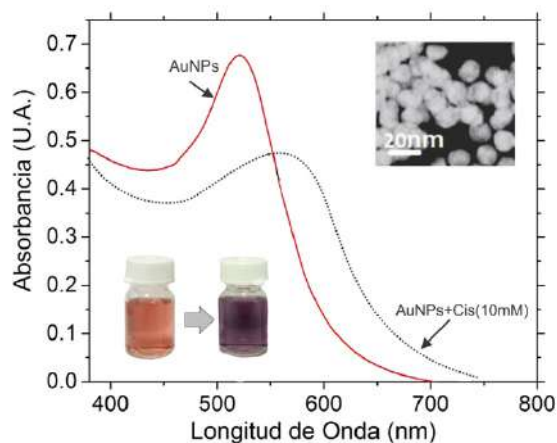
En el proceso de funcionalización de las AuNPs, la fijación de la molécula de Cis se produce a través de la interacción del tiol que forma parte de la molécula y la superficie de oro de la nanopartícula, específicamente, entre los átomos de oro y azufre [5]. En este sentido, en la Figura 3 se muestra el espectro de absorción para las AuNPs+Cis con una concentración de 0.1 Mm transcurridos 60 min después del lavado, una vez realizada la funcionalización. De esta manera, el pico de resonancia de plasmón

superficial se mantiene, aproximadamente, constante con los cambios dieléctricos en el entorno de las nanopartículas debido a la incorporación de las moléculas de Cis a 0.1 mM, lo cual produce un efecto imperceptible en la detección visual de cambio de color.

Para Cis con una concentración de 10 mM, el pico de resonancia de plasmón del espectro de absorción muestra un importante efecto batocrómico, el cual indica agregación de las nanopartículas de oro, tal como lo registra la fotografía tomada con microscopio electrónico de transmisión. En este caso, se hace perceptible visualmente el cambio de color en la Figura 4. La agregación puede ser debida a los enlaces entre los grupos funcionales libres de las moléculas de cisteína [6].



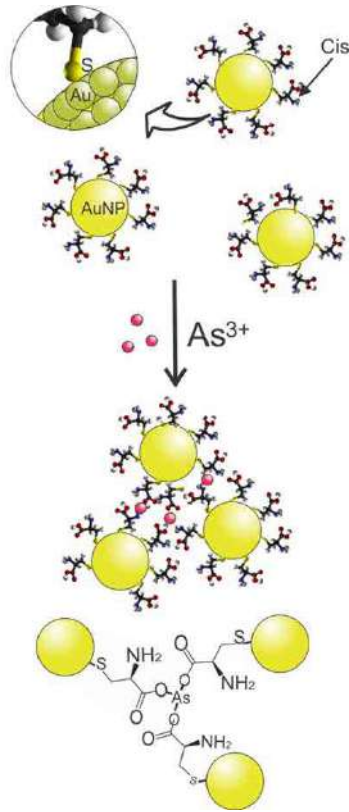
**Figura 3.** Espectro de absorción para las AuNPs sin funcionalizar y funcionalizadas con Cis a 0.1mM.



**Figura 4.** Desplazamiento del pico de resonancia de plasmón producido por la funcionalización de AuNPs con Cis a 10mM. Se muestra un registro con microscopía electrónica de transmisión de la agregación de las nanopartículas debido a la cisteína. Se ilustra el cambio de color debido a la agregación.

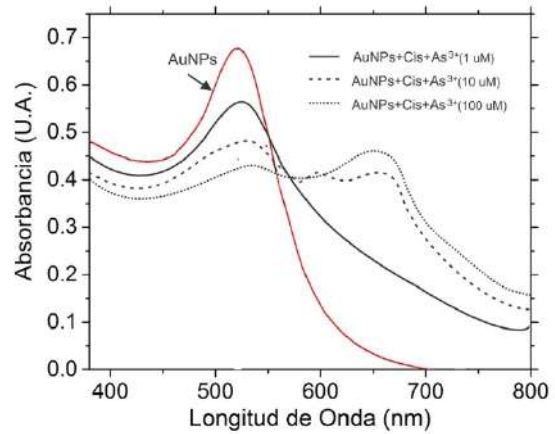
De acuerdo con los resultados obtenidos para la funcionalización con Cis a 0.1 mM, se alcanza una nanosonda dispersa en medio acuoso suficientemente estable para confeccionar un sensor de tipo colorimétrico, con capacidad para detección de agentes iónicos. De otra parte, para concentraciones de Cis mayores a la mencionada, la agregación de las AuNPs+Cis que produce un cambio perceptible de color, abre la ruta para la confección de un sensor colorimétrico para la detección de Cis [7] o proporcionar una opción para la programación de auto-ensamblados y arreglos de nanopartículas de oro [6].

Cuando a la dispersión coloidal de nanosondas AuNPs+Cis se les adiciona el agente iónico de interés, se desarrolla un ligando polidentado o quelante, con la consecuente formación de un complejo de coordinación. Esto produce la agregación de nanopartículas de oro tal como se indica en la Figura 5. El grupo carboxilo-COOH de la Cis juega un papel de gran importancia en estos procesos de agregación bajo la presencia de iones metálicos, tal como ha sido reportado para el caso del mercurio en [8].



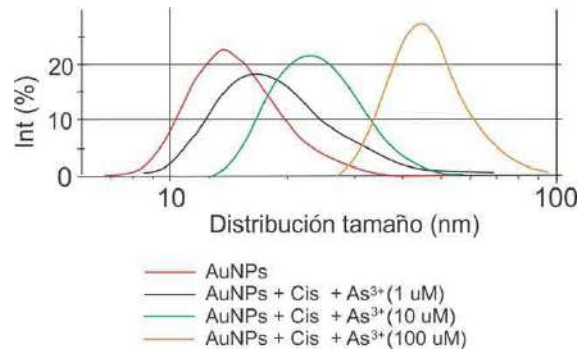
**Figura 5.** Proceso de agregación de las nanopartículas de oro funcionalizadas con Cis en presencia de  $As^{3+}$ .

Para las concentraciones 1, 10, 100  $\mu M$  del agente iónico  $As^{3+}$ , la respuesta de las nanosondas fue registrada por espectroscopía Uv-Vis. La Figura 6 muestra un corrimiento hacia el rojo en función del incremento de la concentración del ion y se visualiza el efecto hipocrómico causado por la agregación, la funcionalización y presencia de los iones de interés. Para el rango seleccionado de concentraciones, se puede apreciar visualmente un cambio de color y, en consecuencia, se posibilita la detección. Con la sonda AuNP+Cis, el mínimo valor de detección de arsénico presente en agua corresponde a 0.07 ppm. Este valor se encuentra cercano al mínimo valor en agua recomendado por la Organización Mundial de la Salud, que corresponde a 0.01 ppm.



**Figura 6.** Espectro de absorción para dispersiones coloidales de AuNPs+Cis expuestas a iones de  $As^{3+}$  en concentraciones de 1, 10 y 100  $\mu M$  respectivamente.

La caracterización DLS de las dispersiones coloidales de nanopartículas de oro funcionalizadas y en presencia del agente iónico, muestra un incremento en tamaño de los agregados en función de la concentración del  $As^{3+}$  tal como se ilustra en la Figura 7.



**Figura 7.** DLS de las muestras coloidales de AuNPs+Cis para concentraciones de 0, 1, 10, 100  $\mu M$  de  $As^{3+}$

En la Figura 8 se muestra el cambio de color y los registros con microscopía electrónica de barrido de los agregados para el caso de nanopartículas de oro funcionalizadas y en presencia de  $As^{3+}$  en concentraciones de 0, 1, 10, 100  $\mu M$ . Este cambio en el color es suficiente para ser detectado por el ojo humano y permitir una detección del agente iónico en el solvente, en este caso agua.



**Figura 8.** Cambio de color por agregación de AuNPs+Cis para concentraciones de  $As^{3+}$  a) 0, b) 1, c) 10, d) 100  $\mu M$  respectivamente. Se muestran registro de microscopía de barrido de los agregados en función de la concentración.

De los resultados obtenidos del efecto batocrómico ilustrado en la (Figura 6), se hace posible construir una gráfica de concentración del agente iónico en función de la longitud de onda para el pico resonancia de plasmón. Esta gráfica permite obtener una función de trabajo, en la que, con la calibración adecuada, permite cuantificar valores de concentración de  $As^{3+}$ . Así mismo, se requiere para esta configuración el uso de un sistema portable de medición de absorbancia, el cual permita obtener el pico requerido de resonancia de plasmón.

#### 4. CONCLUSIONES

La funcionalización de nanopartículas de oro con L-Cisteína permite la configuración de nanosondas versátiles para detección por cambios colorimétricos de la presencia de arsénico en agua. Por lo tanto, el valor mínimo de concentración de arsénico para producir cambios de color detectables se encuentra cercano al mínimo recomendado por la OMS de concentración de arsénico en agua. Este aspecto valora el sensor presentado aquí, como un elemento estratégico para contribuir a la seguridad alimentaria y prevención por potencial exposición a este metaloide.

Experimentalmente, se verifica que el tamaño de las nanopartículas aporta un parámetro de gran importancia para modular la sensibilidad frente a la agregación. Con el incremento en el diámetro aumenta el grado de agregación de las nanosondas ante la exposición al ion de interés.

En la fase de funcionalización de las nanopartículas con L-cisteína, la concentración de este aminoácido resulta claramente dominante en la configuración de dos tipos de modos de operación de las nanosondas: i) *Modo estable*, en el cual después de la funcionalización, las nanopartículas de oro no experimentan una agregación apreciable. Se obtiene como requerimiento para esta estabilidad concentraciones de cisteína por debajo de 0.1 mM. ii) *Modo inestable*, para el cual las nanopartículas se auto-ensamblan para concentraciones del orden de 10 mM o mayores, formando agregados que producen cambios perceptibles en la coloración.

El uso de nanopartículas de oro funcionalizadas con aminoácidos, proyecta una importante opción para el diseño y manufactura de sensores colorimétricos orientados a la detección de agentes iónicos. Se destacan ventajas tales como: bajo costo, uso *in-situ*, portabilidad, facilidad de uso y rápida respuesta, entre muchas otras.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos al Centro de Ciencia y Tecnología Nanoescalar, por la caracterización con Microscopía de Transmisión y el suministro de los reactivos químicos para la síntesis y funcionalización de las nanopartículas, así como la solución estándar de  $As^{3+}$ .

#### REFERENCIAS

- [1] V.A. Ogarev, V.M. Rudoi, O.V. Dementeva, "Gold Nanoparticles: Synthesis, Optical Properties, and Application", *Inorg. Mat.: App. Res.* Vol. 9, pp. 134-140, 2018. <https://doi.org/10.1134/S2075113318010197>
- [2] G. Sener, L. Uzun, A. Denizli, "Colorimetric Sensor Array Based on Gold Nanoparticles and Amino Acids for Identification of Toxic Metal Ions in Water", *ACS Appl. Mat. & Interf.* Vol. 6, pp. 18395-18400, 2014. [dx.doi.org/10.1021/am5071283](https://doi.org/10.1021/am5071283)
- [3] J. Du, X. Hu, G. Zhang, X. Wu, D. Gong, "Colorimetric detection of cadmium in water using L-cysteine

Functionalized gold–silver nanoparticles”, *Analytical Letters*, Vol. 51, pp. 2906-2919, 2018. <https://doi.org/10.1080/00032719.2018.1455103>

- [4] J. Turkevich, P.C. Stevenson, J. Hillier, “Nucleation and growth process in the synthesis of colloidal gold”, *J. Discuss. Faraday Soc.* Vol 11, pp. 55-75, 1951.
- [5] Y. Xue, X. Li, H. Li and W. Zhang, “Quantifying thiol–gold interactions towards the efficient strength control”, *Nature Communications*, Vol 5, pp. 4348, 2014. <https://doi.org/10.1038/ncomms5348>
- [6] I. Petean, GH. Tomoaia, O. Horovitz, M. Tomoalia-Cotisel, “Cysteine mediated assembly of gold nanoparticles”, *J. Optoelect. Adv. Mat.* Vol 10, No. 9, pp. 2289-2292, 2008.
- [7] S. Jongjinakool, K. Palasak, N. Bousod, S. Teepoo, “Gold nanoparticles-based colorimetric sensor for cysteine detection”, *Energy Procedia*, Vol. 56, 10-18, 2014.
- [8] F. Chai, C. Wang, T. Wang, Z. Ma and Z. Su, “L-cysteine functionalized gold nanoparticles for the colorimetric detection of Hg<sup>2+</sup> induced by ultraviolet light”, *Nanotechnology*, vol 21, pp. 025501, 2010. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/2/025501>



## LIFE CYCLE SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF POWER GENERATION EXPANSION: THE CURRENT AND FUTURE SCENARIOS IN BRAZIL

### Análisis de sostenibilidad del ciclo de vida de la expansión de energía en Brasil

João Gabriel Lássio<sup>1-2</sup>, Denise Matos<sup>1-2</sup>, David Castelo Branco<sup>1</sup>, Alessandra Magrini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Rio de Janeiro, The Alberto Luiz Coimbra Institute for Graduate Studies and Research in Engineering, Energy Planning Program, Brazil. Institutional Email: <sup>1</sup>secretaria@ppe.ufrj.br, <sup>2</sup>dea@cepel.br

(Recibido 19 de noviembre de 2021 y aceptado 02 de diciembre de 2021)

#### Abstract

The sustainable development paradigm has been encouraging the current worldwide transition from fossil fuels to renewable energy sources and a more balanced approach to the social-environmental concerns against economic hegemony, which implies changes in how decision-makers design the future electricity system. In this context, this paper explores the integration of the Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) with a Multicriteria Decision Making (MCDM) method, named Simple Multi-Attribute Rating Technique Exploiting Ranks (SMARTER), in order to analyze and compare the sustainability performance of the current electricity mix with different future scenarios in Brazil, reported by The Brazilian Ten-Year Energy Expansion Plan 2027. This analysis considers nine criteria distributed into environmental, social, and economic dimensions of sustainability obtained from different sources, such as literature, the Ecoinvent 3.5 database, and calculated by ReCiPe 2016 and USEtox 2 methods. According to the results, the current electricity mix presents the best social and economic performance, and its environmental performance will enhance in the future, mainly due to the expansion of some renewable energy sources. Concerning the future scenarios investigated, the results indicate that those with greater participation from these energy sources are associated with the best sustainability performance. However, it is worth pointing out that these results do not represent the most suitable Brazilian electricity mix path. Besides the criteria considered in this paper, it is influenced by other factors, such as technical, geographical, and national policy. Furthermore, assuming different suppositions and system boundaries for energy sources and technologies might significantly vary our findings.

**Keywords:** *life cycle sustainability assessment, energy planning, power generation, sustainability.*

#### Resumen

El paradigma de desarrollo centrado en la sostenibilidad no solo ha impulsado la actual transición energética hacia las fuentes renovables, sino que también se ha convertido en una prioridad para tener en cuenta todas aquellas cuestiones socio-ambientales a lo largo de la cadena de generación eléctrica, lo que implica una actualización de la forma en la que se planifica la expansión del suministro eléctrico en el futuro. En este contexto, este artículo explora la integración del Análisis de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV) con un método de Análisis de Decisiones Multicriterio (ADM), denominado Técnica de Calificación de Atributos Múltiples Simples (SMARTER), para evaluar la sostenibilidad de la matriz eléctrica actual y de los escenarios futuros en Brasil, proyectados por el Plan Decenal de Expansión Energética de Brasil 2027. El análisis se realiza de acuerdo con nueve criterios distribuidos en las dimensiones ambiental, social y económica. Los resultados indican un mejor desempeño social, económico y ambiental de la matriz eléctrica nacional actual, así como, en sus escenarios futuros, principalmente, debido a la expansión de la participación de algunas fuentes de energía renovables.

Con respecto a los escenarios futuros, aquellos con mayor participación de estas fuentes se asocian con el mejor desempeño en materia de sostenibilidad. No obstante, estos resultados no pretenden señalar el camino más adecuado para el Parque Nacional de Generación Eléctrica, ya que, para ello, también es necesario tomar en cuenta otros factores, además de los considerados en este artículo, como son los macroeconómicos, técnicos, de ubicación, políticas públicas, etc.

**Palabras clave:** *análisis de sostenibilidad del ciclo de vida, planificación energética, generación de poder, sostenibilidad.*

## 1. INTRODUCTION

The concept of sustainable development has promoted the current global transition from fossil fuels to renewable energy sources, as well as a more balanced approach to social-environmental concerns in the face of economic hegemony [1]. However, these trends might result in potential challenges to developing countries like Brazil. This is not only because advancing toward sustainability faces which are additional obstacles for these countries, but also because they are the leading drivers of the global energy supply growth [2]. In this sense, for instance, Brazil has experienced an average annual increase of more than 2% in its energy supply in the last decade alone. For the following ten years, a similar evolution is expected [2].

In this context, the Brazilian energy policy forecasts an introduction of renewable energy sources in the national electricity mix. As a result, their already high shares are projected to increase even more, from 84% to 87% by 2030 [2]. Energy transitions, combined with current sustainability requirements, which imply changes in how decision-makers design the future electricity system [1]-[3].

The present paper is part of a comprehensive project concerned with incorporating socio-environmental aspects in long-term planning models for the electricity generation expansion in Brazil. With this aim in mind, this paper corresponds to its starting point by exploring the integration of the Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) with a Multicriteria Decision Making (MCDM) method named Simple Multi-Attribute Rating Technique Exploiting Ranks (SMARTER) [4] to assess and compare the sustainability performance of the current electricity mix with different future scenarios reported by The Brazilian Ten-Year Energy Expansion Plan 2027 [5].

LCSA is based on the life cycle approach that is especially advantageous for the most promising renewable energy sources because the most of their socio-environmental impacts are dispersed throughout their whole production chains rather than are concentrated in the energy generation stage [6].

Previous studies have yielded some important insights into life cycle-based sustainability assessments of the penetration of renewable energy sources and future energy scenarios at regional and national scales. Specifically, Hong and colleagues [7] examined the sustainability of electricity generation scenarios in South Korea, taking into consideration their environment, social, and economic aspects and employing an MCDM method. In [8], the authors provide a methodology based on the life cycle approach to assess the sustainability of different energy systems against environmental, social, and economic issues. At the same time, these researchers propose the integration of life cycle-based tools with an MCDM method. By the other hand, in this study, [9] authors compared the 13 different technologies for energy generation and ten representative scenarios in the United States.

In this research, the authors used an MCDM method and considered eight sustainability criteria, most of them based on the life cycle approach. Finally, in [10] authors carried out a life cycle-based analysis of the sustainability of different scenarios for the Pakistani energy sector, taking into account seven energy sources and environmental, social, and economic aspects. Although life cycle thinking is widely used worldwide, it is still seldom employed in Brazil [11], [12], and scant attention has been paid to the sustainability of the Brazilian energy sector from a life cycle perspective.

## 2. METHODOLOGY

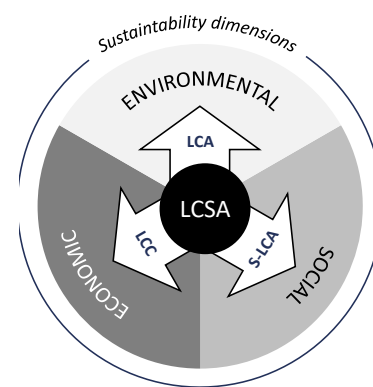
### 2.1. Life Cycle Sustainability Assessment

LCSA entails evaluating potential environmental, social, and economic negative impacts and benefits in decision-making processes for more sustainable products and services over their whole life cycle. However, it is worth mentioning that LCSA, unlike Life Cycle Assessment (LCA), does not have a standardized methodology [13], [14].

In this context, this study is based on the Kloeppfer [15] approach, which integrates LCA, Social Life Cycle Assessment (S-LCA), and Life Cycle Costing (LCC) (see Figure 1) to analyze the environment, social, and economic dimensions of sustainability [16] (see Figure 1). It noted that these three life cycle-based tools are according to the ISO 14040 [17] stages; they are: (i) goal and scope definition, (ii) life cycle inventory (LCI) analysis, (iii) life cycle impact assessment (LCIA), and (iv) interpretation. Moreover, they have similar viewpoints and objectives [13]-[18], [19].

It should be pointed out that performing an LCSA poses a number of methodological and practical challenges, including the lack of data and methods; the need for efficient ways of communicating its findings; the subjectivity of sustainability indicators, particularly the social ones; and the integration of its results in order to express the degree of sustainability of a product or service [14]-[20], [21].

Given this scenario, there is a growing body of research on LCSA employing multiple-criteria decision analysis (MCDA) methods [21]. For example, the SMARTER technique [4] is a well-known subjective weighting MCDA method that ranks different alternatives.

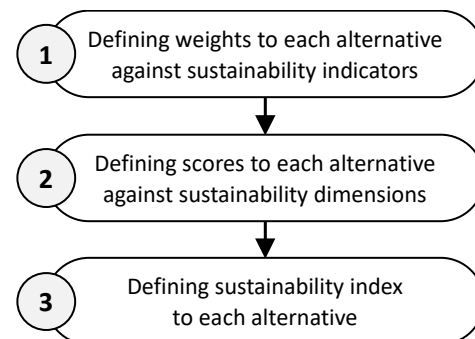


**Figure 1.** Scheme of LCSA framework

### 2.2. The SMARTER method

The SMARTER (Simple Multi-Attribute Rating Technique Exploiting Ranks) technique [4] is a linear additive MCDA method. Objective weighting approaches cannot describe the evaluation of diverse alternatives as clearly as this well-known subjective weighting methodology can. In addition, it can help interpret the outcomes of sustainability analyses by creating sustainability indicators.

Figure 2 shows the main steps of the SMARTER method to ranking alternatives. Following this framework, we first (i) define weights for each alternative against sustainability indicators (Equation 1), (ii) the scores for each alternative against sustainability dimensions (Equation 2), and finally, (iii) the sustainability index for each alternative (Equation 3) [4]-[22].



**Figure 2.** Main steps of the SMARTER method to ranking alternatives.

$$w_k = \left(\frac{1}{N}\right) \times \sum_{i=k}^N \left(\frac{1}{i}\right) \quad (1)$$

Where,  $w_k$  is the weight of the indicator for the alternative  $k$ ,  $N$  is the number of the alternatives considered in the analysis,  $w_1 + w_2 + \dots + w_k = 1$ , and  $w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_k$ .

$$W_k^d = \sum_{indicator} W_k \quad (2)$$

Where,  $W_k^d$  corresponds to the total score reflecting the performance of technology  $k$  on the sustainability dimension  $d$ .

$$SI_k = \sum_{dimension} \left(\frac{1}{N_d} \times W_k^d\right) \quad (3)$$

Where,  $SI_k$  corresponds to the alternative specific sustainability index, and  $N_d$  is the number of indicators for dimension  $d$ .

### 2.3. Analyzing the sustainability of Brazilian electricity generation scenarios

To support the sustainability of the ongoing energy transition in Brazil, this paper focuses on the current electricity mix and the future scenarios projected by The Brazilian Ten-Year Energy Expansion Plan 2027 [5]. This document relates to the Brazilian energy sector’s most comprehensive plan. From the perspective of the Brazilian government, it provides specific information on power generation capacity increases, investment forecasts, and fuel production plans for the next ten years in the country [5].

This analysis considers nine criteria distributed into environmental, social, and economic dimensions of sustainability, which were gathered from different sources, such as literature [23]-[27] and the Ecoinvent 3.5 [28] database, and calculated using the ReCiPe 2016 [29] and USEtox 2 [30] methods in the SimaPro 9.0 LCA software. In addition, the SMARTER method [4], based on a linear additive model, supports the interpretation of results by formulating sustainability indicators.

Table 1 shows the current and the nine future scenarios considered in our analysis, as published by the Brazilian Ten-Year Energy Expansion Plan 2027 [5]. In this, note that the current mix, as well as scenarios 3, 8, and 9, present the most significant shares of renewable energy sources. In contrast, scenarios 2, 5, and 6 have the highest percentages of non-renewable energy sources. It is worth mentioning that scenarios 3 and 4 assume a coal expansion [5].

**Table 1** Scenarios assessed in our analysis

Scenario	Renewables	Non-Renewables
Current	85.3%	14.7%
Scenario 1	79.6%	20.4%
Scenario 2	78.6%	21.4%
Scenario 3	80.7%	19.3%
Scenario 4	79.5%	20.5%
Scenario 5	79.2%	20.8%
Scenario 6	79.2%	20.8%
Scenario 7	79.6%	20.4%
Scenario 8	80.8%	19.2%
Scenario 9	81.2%	18.8%

The sustainability performance of these ten scenarios were assessed considering the generation of 1.0 kWh and system boundaries that encompass the life cycle stages from the extraction of the raw materials to the end-of-life of the power plants. Based on this, Table 2 lists the set of sustainability criteria considered in this analysis. The environmental dimension comprises global warming (GWP), freshwater eutrophication (FWT), land use (LAU), and water consumption (WAT). The social dimension of sustainability is assessed through job creation (JOB), human toxicity (HTC and HTnC), and intergenerational equity (INE). Finally, regarding the concerns of the economic dimension, our analysis addressed the levelized cost of energy (LCOE).

**Table 2.** Sustainability criteria considered in our analysis

Impact category	Unit	Source
<i>Environment</i>		
Global warming	kg CO <sub>2</sub> eq.	[28], [29]
Freshwater ecotoxicity	PAF.m <sup>3</sup> .day	[30]
Land use	m <sup>2</sup> a crop eq.	[28], [29]
Water consumption	m <sup>3</sup>	[28], [29]
<i>Social</i>		
Job creation	jobs.year	[23]
Human toxicity (carc.)	cases	[30]
Human toxicity (non-carc.)	cases	[30]
intergenerational equity	kg Cu	[28], [29]
<i>Economic</i>		
Levelized cost of energy	USD/kWh	[24]–[27]

### 3. RESULTS & ANALYSIS

Table 3 presents the results of the LCIA step for the ten different scenarios examined. Given these results, it was possible to rank each scenario within each sustainability criterion, as illustrated in Figure 3. For instance, we can observe that the current electricity mix performs better in five sustainability criteria: global warming, human toxicity (non-carcinogenic), intergenerational equity, and

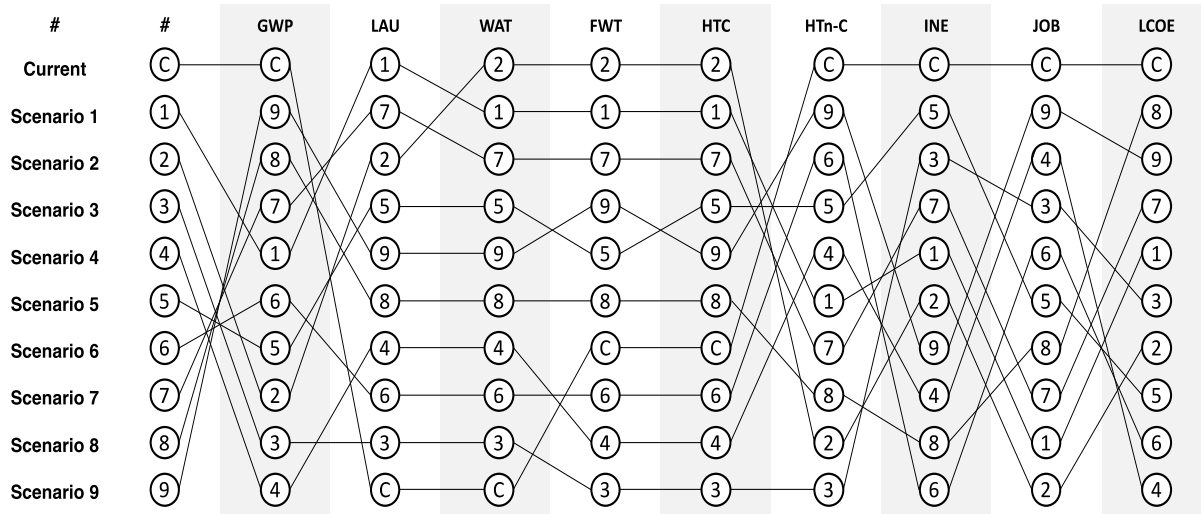
levelized cost of energy. On the other hand, it is relevant noting that the current electricity mix presents two extremely negative performances in land use and water consumption criteria. Additionally, scenario 3 delivers the worst performance in freshwater eutrophication and human toxicity (carcinogenic and non-carcinogenic).

Following the methodology employed in this paper, we used this rank to define the scores for each scenario against sustainability dimensions and then their sustainability index through Equations 2 and 3, respectively (see Table 4).

It can be inferred from Table 4 that scenarios 1, 2, and 7 perform better in the environmental dimension, while scenarios 3, 4, and 6 are the worst. In addition, concerning the social dimension, the current mix and scenarios 5 and 9 present the best performances, whereas scenarios 3, 6, and 8 present the worst performances. Furthermore, for the economic dimension, the current mix and scenarios 8 and 9 present the most significant scores; and scenarios 4, 5, and 6 present the lowest ones. Finally, the current mix and scenarios 1 and 9 have the better sustainability index. In contrast, scenarios 3, 4, and 6 present the lowest sustainability performance.

**Table 3.** LCIA results

	GWP	LAU	WAT	FWT	HTC	HTn-C	INE	JOB	LCOE
#	kg CO <sub>2</sub> eq.	m <sup>2</sup> a crop. eq.	m <sup>3</sup>	PAF. m <sup>2</sup> .day	cases	cases	Kg Cu	jobs. year/ MW	USD/kWh
C	1.9210 <sup>-1</sup>	1.2010 <sup>-2</sup>	2.0910 <sup>-2</sup>	5.7710 <sup>2</sup>	6.1210 <sup>-9</sup>	1.4710 <sup>-2</sup>	3.7810 <sup>-5</sup>	52.79	39.7110 <sup>-3</sup>
1	2.0310 <sup>-1</sup>	1.1010 <sup>-2</sup>	1.7610 <sup>-2</sup>	5.2110 <sup>2</sup>	5.3310 <sup>-9</sup>	2.0710 <sup>-2</sup>	4.3910 <sup>-5</sup>	48.74	48.1610 <sup>-3</sup>
2	2.0710 <sup>-1</sup>	1.1110 <sup>-2</sup>	1.7110 <sup>-2</sup>	5.0410 <sup>2</sup>	5.1610 <sup>-9</sup>	2.2010 <sup>-2</sup>	4.4010 <sup>-5</sup>	48.56	49.3010 <sup>-3</sup>
3	2.0810 <sup>-1</sup>	1.1510 <sup>-2</sup>	1.8410 <sup>-2</sup>	9.0110 <sup>2</sup>	8.4510 <sup>-9</sup>	2.2110 <sup>-2</sup>	4.3610 <sup>-5</sup>	50.21	49.1910 <sup>-3</sup>
4	2.1410 <sup>-1</sup>	1.1410 <sup>-2</sup>	1.8210 <sup>-2</sup>	8.9910 <sup>2</sup>	8.3910 <sup>-9</sup>	2.0410 <sup>-2</sup>	4.4810 <sup>-5</sup>	50.33	50.2010 <sup>-3</sup>
5	2.0710 <sup>-1</sup>	1.1110 <sup>-2</sup>	1.7810 <sup>-2</sup>	5.3010 <sup>2</sup>	5.4010 <sup>-9</sup>	1.9110 <sup>-2</sup>	4.1910 <sup>-5</sup>	48.99	49.4310 <sup>-3</sup>
6	2.0410 <sup>-1</sup>	1.1410 <sup>-2</sup>	1.8410 <sup>-2</sup>	6.9910 <sup>2</sup>	6.2310 <sup>-9</sup>	1.8810 <sup>-2</sup>	4.8510 <sup>-5</sup>	49.95	49.5010 <sup>-3</sup>
7	2.0310 <sup>-1</sup>	1.1010 <sup>-2</sup>	1.7610 <sup>-2</sup>	5.2110 <sup>2</sup>	5.3310 <sup>-9</sup>	2.0710 <sup>-2</sup>	4.3910 <sup>-5</sup>	48.74	48.1610 <sup>-3</sup>
8	1.9510 <sup>-1</sup>	1.1210 <sup>-2</sup>	1.8010 <sup>-2</sup>	5.3010 <sup>2</sup>	5.4310 <sup>-9</sup>	2.1110 <sup>-2</sup>	4.5210 <sup>-5</sup>	48.85	46.3210 <sup>-3</sup>
9	1.9510 <sup>-1</sup>	1.1210 <sup>-2</sup>	1.7910 <sup>-2</sup>	5.2810 <sup>2</sup>	5.4210 <sup>-9</sup>	1.8110 <sup>-2</sup>	4.4310 <sup>-5</sup>	50.49	47.4410 <sup>-2</sup>



**Figure 3.** Ranking scenarios within each criterion

**Table 4.** Sustainability dimensions’ scores and sustainability index

#	Dimension of sustainability			Sust. Index
	Environ.	Social	Economic	
C	0.3608	0.9266	0.2929	0.6147
1	0.7633	0.3631	0.0846	0.3662
2	0.7623	0.3886	0.0479	0.3356
3	0.0733	0.2725	0.0646	0.1510
4	0.1269	0.2822	0.0100	0.1123
5	0.3516	0.4766	0.0336	0.2407
6	0.1654	0.2711	0.0211	0.1302
7	0.5883	0.3340	0.1096	0.3401
8	0.3366	0.1672	0.1929	0.3188
9	0.4716	0.5183	0.1429	0.3904

These findings could be less surprising if we remember that the current mix and scenarios 1 and 9 present a high level of renewable energy sources, while scenarios 3 and 4 consider a coal expansion, as well as scenario 6, shows a low level of renewable energy sources.

Taken altogether, the data presented here provide preliminary evidence to suggest that renewable energy sources are associated with a better sustainability

performance. Ultimately, considering that the current mix presents two extremely negative performances, more specifically in land use and water consumption criteria, we believe that this scenario cannot be established as the most sustainable one in relation to all scenarios considered.

#### 4. CONCLUSIONS

Since the concept of sustainable development has encouraged the ongoing energy transition and a more balanced approach to social-environmental concerns in the face of economic hegemony, this paper investigated the sustainability of the current electricity mix with different future scenarios reported by The Brazilian Ten-Year Energy Expansion Plan 2027, by integrating of the LCSA with an MCDM method known as SMARTER.

The results yielded some interesting findings. According to them, the current electricity mix presents the best social and economic performance. Its environmental performance will enhance in the future mainly due to the expansion of some renewable energy sources. Furthermore, taking into consideration the future scenarios reported by PDE 2027, the results indicate that those with greater participation from these energy sources are associated with the best sustainability performance.

However, it is worth pointing out that these results do not represent the most suitable Brazilian electricity mix path. Besides the criteria taken into account in this paper, it is influenced by other factors, such as technical, geographical, and national policy. Furthermore, assuming different suppositions and system boundaries for energy sources and technologies might significantly vary our findings.

Our immediate future studies involve looking into the integration of LCSA with other MCDM methods and meeting the challenge of considering more social aspects. Finally, it is worth mentioning that several findings of this study warrant further discussion, such as the influence of energy sources' sustainability performances on the decision-making of the national energy sector.

#### ACKNOWLEDGMENTS

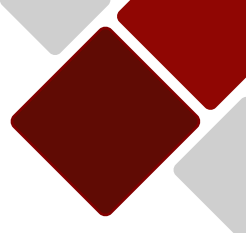
The authors gratefully acknowledge the financial support of the Brazilian Council for Scientific and Technological Development (CNPq).

#### REFERENCES

- [1] A. Maxim, "Sustainability assessment of electricity generation technologies using weighted multi-criteria decision analysis," *Energy Policy*, vol. 65, pp. 284–297, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.09.059.
- [2] Brazil, "The Ten-Year Energy Expansion Plan 2030," Brasília, 2020.
- [3] J. G. Lássio, A. Magrini, and D. Castelo Branco, "Life cycle-based sustainability indicators for electricity generation: A systematic review and a proposal for assessments in Brazil," *J. Clean. Prod.*, vol. 311, p. 127568, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127568.
- [4] W. Edwards and F. H. Barron, "Smarts and smarter: Improved simple methods for multiattribute utility measurement," *Organ. Behav. Hum. Decis. Process.*, vol. 60, no. 3, 1994, doi: 10.1006/obhd.1994.1087.
- [5] Brazil, "The Ten-Year Energy Expansion Plan 2027," Brasília, 2018.
- [6] A. Laurent, N. Espinosa, and M. Z. Hauschild, "LCA of Energy Systems," in *Life Cycle Assessment*, M. Hauschild, R. Rosenbaum, and S. Olsen, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 633–668.
- [7] S. Hong, C. J. A. Bradshaw, and B. W. Brook, "Evaluating options for sustainable energy mixes in South Korea using scenario analysis," *Energy*, vol. 52, pp. 237–244, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.02.010.
- [8] E. Santoyo-Castelazo and A. Azapagic, "Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects," *J. Clean. Prod.*, vol. 80, pp. 119–138, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.05.061.
- [9] S. J. W. Klein and S. Whalley, "Comparing the sustainability of U.S. electricity options through multi-criteria decision analysis," *Energy Policy*, vol. 79, pp. 127–149, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.enpol.2015.01.007.
- [10] M. Z. Akber, M. J. Thaheem, and H. Arshad, "Life cycle sustainability assessment of electricity generation in Pakistan: Policy regime for a sustainable energy mix," *Energy Policy*, vol. 111, no. September, pp. 111–126, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2017.09.022.
- [11] O. C. Filho, N. L. S. Junior, and G. Luedmann, "A Avaliação de Ciclo de Vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil," Brasília, 2016. [Online]. Available: [http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6685/1/td\\_2205.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6685/1/td_2205.pdf).
- [12] C. G. Souza, R. G. Barbastefano, and R. C. Teixeira, "Life cycle assessment research in Brazil: characteristics, interdisciplinarity, and applications," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 2, pp. 266–276, Feb. 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1150-5.
- [13] W. Kloepffer, "Life cycle sustainability assessment of products," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 13, no. 2, pp. 89–95, Mar. 2008, doi: 10.1065/lca2008.02.376.
- [14] J. Guinée, "Life cycle sustainability assessment: What is it and what are its challenges?," in *Taking Stock of Industrial Ecology*, R. Clift and A. Druckman, Eds. Springer, Cham, 2016, pp. 45–68.
- [15] W. Kloepffer, "Life cycle sustainability assessment of

- products (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95),” 2008, doi: 10.1065/lca2008.02.376.
- [16] J. Elkington, “Cannibals with forks: The triple bottom line of sustainability,” *New Soc. Publ.*, 1998.
- [17] ISO, “ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework,” *International Organization for Standardization*. International Organization for Standardization, 2006.
- [18] UNEP, “Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020,” 2020.
- [19] D. Hunkeler, K. Lichtenvort, and G. Rebitzer, *Environmental Life Cycle Costing*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [20] J. B. Guinée *et al.*, “Life cycle assessment: Past, present, and future,” *Environ. Sci. Technol.*, 2011, doi: 10.1021/es101316v.
- [21] P. P. Kalbar and D. Das, “Advancing life cycle sustainability assessment using multiple criteria decision making,” in *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making*, 2020.
- [22] I. Khan, “Sustainability challenges for the south Asia growth quadrangle: A regional electricity generation sustainability assessment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 243, p. 118639, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118639.
- [23] M. Ram, A. Aghahosseini, and C. Breyer, “Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 151, p. 119682, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.techfore.2019.06.008.
- [24] M. Tolmasquim, *Renewable energy: hydro, biomass, wind, solar, ocean*. Río de Janeiro, 2016.
- [25] K. Mongird *et al.*, “Energy storage technology and cost characterization report,” 2019.
- [26] M. Tolmasquim, *Thermoelectric energy: natural gas, biomass, coal, and nuclear*. Río de Janeiro, 2016.
- [27] O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes, and I. Staffell, “Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies,” *Joule*, vol. 3, no. 1, pp. 81–100, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.joule.2018.12.008.
- [28] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, “The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- [29] M. A. J. Huijbregts *et al.*, “ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 2, pp. 138–147, Feb. 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [30] R. K. Rosenbaum *et al.*, “USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 13, no. 7, pp. 532–546, Nov. 2008, doi: 10.1007/s11367-008-0038-4.





## **CRITERIOS GENERALES PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, SECCIONAL SOGAMOSO**

La Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo I2+D, es una publicación que se edita semestralmente y maneja una convocatoria permanente, financiada por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Seccional Sogamoso-Boyacá, Colombia, creada en el año 2005. Tiene como misión publicar y divulgar artículos científicos, productos de una investigación, en todos los campos de la ingeniería y tecnología: Industrial, electrónica y comunicaciones, ciencias de la tierra, sistemas y computación, ingeniería de los materiales, ingeniería electromecánica, ambiental, transporte y vías, y otras afines.

Ingeniería, Investigación y Desarrollo invita a toda la comunidad académica e investigativa de instituciones públicas y privadas, regionales, nacionales e internacionales, tales como investigadores, grupos y semilleros de investigación, docentes, estudiantes, directivos de ingeniería y demás interesados en temáticas relacionadas con las diferentes áreas de la Ingeniería, para que presenten sus contribuciones y trabajos inéditos, en español o inglés. Podrán publicarse artículos originales, de investigación y/o innovación tecnológica.

Los artículos sometidos serán evaluados previamente por el comité editorial, y por pares evaluadores externos o internos antes de su publicación, que se reservan el derecho de decidir sobre su publicación. Los pares revisores emitirán un concepto sobre el contenido del artículo desde la calidad y el rigor científico, en el formato de evaluación establecido por la revista. Las observaciones y sugerencias manifestadas por los evaluadores serán enviadas a los autores para que realicen los respectivos ajustes, con el fin de decidir si el artículo cumple con las condiciones para ser publicable o no. La Revista siempre utilizará el sistema de “par doble ciego” En este proceso se da un espacio de correspondencia entre el editor y los autores para los ajustes necesarios. Los tiempos de publicación de un artículo dependerán en gran medida de la oportuna respuesta que los autores den a cada requerimiento del editor, los trabajos enviados a “Ingeniería, Investigación y Desarrollo” no podrán ser sometidos simultáneamente a evaluación por otro medio de publicación. La aceptación de un artículo por parte del comité editorial, no implica que vaya a ser publicado, el contenido de los trabajos es responsabilidad exclusiva de sus autores. No se devolverán los originales de los trabajos.

Todos los artículos deben matricularse en la plataforma OJS, accesible desde el sitio web [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/about/submissions#submission\\_checklist](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/about/submissions#submission_checklist), or, junto con la carta de presentación, firmada por los autores, para realizar el proceso de matrícula del manuscrito el autor debe compilar previamente un formulario de registro, escogiendo la opción de autor, donde le será asignado un usuario y contraseña para que pueda realizar el envío del documento. Por medio de este mismo enlace podrá ser consultada y descargada la plantilla de presentación de artículos y el modelo de la carta de cesión de derechos de autores estipulado por la revista.

**Extensión del artículo:** Los artículos se presentan en hojas tamaño carta con márgenes superior: 3 cm, derecho: 2 cm, izquierdo: 3 cm e inferior: 2 cm, a espacio sencillo, doble columna, letra calibri y un contenido de máximo 10 páginas.

**Estructura:** Secciones: título, resumen, palabras clave, introducción, materiales y métodos, resultados, discusión, conclusiones, agradecimiento (si procede) y referencias. Para las tres primeras secciones se requiere, además, su traducción al inglés (title, abstract and keywords), que se colocará inmediatamente debajo de la versión en español.

**Título:** se sugiere no exceder de 15 palabras.

**Resumen:** máximo 250 palabras, el propósito del trabajo, los métodos empleados, resultados más significativos y conclusiones más importantes. Se redactará en un solo párrafo, en tiempo presente y modo impersonal. No incluirá abreviaturas, siglas, citas bibliográficas ni referencias a tablas o figuras.

**Palabras clave:** en orden alfabético, 4 o 5 términos relacionados con el contenido del artículo.

**Introducción:** tratará el tema específico del trabajo e informará sobre el propósito, importancia, aplicación práctica de la investigación y conocimiento actual del tema.

**Materiales y métodos:** proveerá suficiente información para que el experimento pueda repetirse bajo las mismas condiciones. Cuando los métodos, técnicas y procedimientos empleados sean muy conocidos, bastará con mencionarlos. Si se modifica un método de otro investigador deberá aportarse la cita y explicar detalladamente la modificación; pero si el método es nuevo, se describirá en detalle. Cuando se trate de investigaciones de campo, deberán aparecer las características del área de estudio y del muestreo.

**Resultados:** se expondrán mediante texto, figuras, tablas, cuidando no repetir una misma información en más de una forma, en esta sección se deben presentar los resultados hallados en la investigación.

**Discusión:** se explicarán los datos experimentales y se compararán con los resultados obtenidos por otros investigadores. Las secciones de Resultados y Discusión podrán presentarse de forma independiente o combinada, según preferencia del autor.

**Agradecimientos:** será el lugar para reconocer la ayuda de personas e instituciones que aportaron significativamente al desarrollo de la investigación.

**Referencias:** Las referencias bibliográficas y citas, deben atender al estilo IEEE, se registrarán solamente los trabajos citados en el texto, que deberán tener un nivel adecuado de actualización, las referencias deben hacerse por orden de aparición en el artículo. Téngase en cuenta que la actualidad de las referencias es un elemento de gran peso en la evaluación de la calidad de los artículos, se debe adicionar el DOI a las referencias bibliográficas que lo tengan.

Para obtener la plantilla de presentación de artículos, por favor diríjase al correo: [revistaid@uptc.edu.co](mailto:revistaid@uptc.edu.co) o al enlace: [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/about/submissions](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/about/submissions) en la sección Acerca de.



**GENERAL REQUIRMENTS TO SUBMIT  
PAPERS TO “REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO”  
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, SOGAMOSO BRANCH**

The Journal of Ingeniería, Investigación y Desarrollo I2+D, is a Biannual Publication, it is supported and edited by the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, of Sogamoso Branch. It was created in 2005; this is a place to submit and inform about all academic papers related to topics as technology and engineering. Authors can publish papers related to topics of Engineering Fields as: Industrial, Electronic and Communication, Earth sciences and Computation, at the same time, Materials, Electro-mechanic, Environmental, Transport and Roads, and related areas.

Ingeniería, Investigación y Desarrollo invites all academic and community researchers, research groups, professors, students and Chiefs from Public and Private institutions to submit unpublished works on engineering and technology, they would be in Spanish and English. They are going to involve research papers of innovation and technology who presents original results of projects and research; also it includes, review papers and reflecting ones. Once papers were assessed and approved by external peers – reviewers, they had belonged a bank of papers to be published based on received and accepted deadlines. The Editor Committee in charged reserve the rights of publishing.

Peers – reviewers emit a definite concept about the content of the paper based on quality and scientific rigour, following the Assessment Template established by this journal. Observations and suggestions leading by the jurors (peers – reviewers) will be sent to the authors, they have to adjust it with the purpose to make a decision taking into consideration the suggestions to be published or not. This Journal submits all articles received to a process of “double-blind peer” review. During this process Editor and Authors are accomplishing all requirements and necessary adjustments being made.

The turnaround times needed to publish a paper depend on the authors acknowledge that response to double-blind peer’s and Editor Committee suggestions; It is relevant to mention that works had been sent to “Ingeniería, Investigación y Desarrollo” cannot be submitted simultaneously to other Journal or mass media. Moreover, approved of the paper does not mean they are going to be published. The articles represent the authors' opinions; the latter is therefore solely responsible and liable for his/her works. This Journal will not be returned original file of papers.

Papers have to be send it by using OJS Platform of this Journal following the link: [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/about/submissions#submission\\_checklist](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/about/submissions#submission_checklist), or to the institutional e-mail of the journal (revistaid@uptc.edu.co). In this place, authors can find the Template and Cover Letter to Publish that have to be signed by the authors. In the OPS Platform author/user has to register its personal information, in order to send the manuscript.

**Length of article:** All papers should be presented in letter sheets with the following margins: the top margin 3cm, top right 2cm, top left 3cm and the bottom 2cm, the manuscript has 12pt of Calibri font, single spacing, maximum 10 pages including Abstract, Figures and References.

**Body:** sections: title, abstract, key words, introduction, materials and methods, results, discussion, conclusions, acknowledgments (if it is necessary) and references. The three sections entitled: title, abstract and keywords have to be in English and Spanish too following the Template of this Journal.

**Title:** We suggest; it must not exceed 15 words.

**Abstract:** Minimum of 250 words. This section refers to be concise with its content; its clarity is pretty relevant, because it allows to identify the topic developed along the journal. This section involves the most important point of views, goals of the research, basic procedures (places, research places or zones, analytic and observation methods), the most relevant results (based on the presentation of concrete data) and the main observations and conclusions that show originality and innovation of the research. Author/s write one paragraph in an impersonal way, using present simple. It does not include abbreviation, acronyms, references or citations of tables or figures.

**Key words:** Authors can identify three or five simple concepts or composed nouns related to the content of the paper. If you want, you can consider the Thesaurus Platform to write on them.

**Introduction:** It is going to develop a specific topic and inform purpose, reliability, practice or application of the research based on current knowledge of the topic.

**Materials and methods:** Provide enough information that allow experiments are going to be reproducible under the same conditions. When methods, techniques and procedures implemented are well-known, just it is enough mention them. If any authors 'method is modified, it should be right cited and thoroughly explained. But if the method is new, it should be thoroughly described. About field research, it should be appeared characteristics of area and sampling study.

**Results:** Authors report achievements made by using experimentation, analysis, contrasting, diagnosis, contextual studies using arguments, figures, tables taking into account do not repeat the information at the same way, this section shows results found in the investigation.

**Discussion:** In this section, the author establishes sections and titles that are going to be used to defend main objective of this research which is explained along the paper. It explains experimental data and compare results obtained from others researchers. Sections of Results and Discussion can be presented in independent way or combined, based on authors' preferences.

**Acknowledgments:** This section allows the authors to emphasize what is the relevant support of people and institutions to develop the research.

**References:** According to the IEEE style, all references consulted are going to be signed with a number into the text in parenthesis/bracket [] in correlation with the bibliography data. This list is going to be full of references and presented in the end of the manuscript and organized in the order of appearance on the citations along the text. Citations need to be updated and correspond to guarantee quality in the manuscripts. It is important to add DOIs of references, if they content it.

To get Template and Cover Letter to Publish, please contact us writing an e-mail to: [revistaid@uptc.edu.co](mailto:revistaid@uptc.edu.co) or following the link: [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/about/submissions](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/about/submissions) to section About us.



**REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO  
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
SECCIONAL SOGAMOSO  
SUSCRIPCIÓN / SUBSCRIPTIONS**

Nombre/Name: \_\_\_\_\_ C.C. \_\_\_\_\_

Apellidos/Last Name: \_\_\_\_\_

Profesión/Profession: \_\_\_\_\_

Departamento académico/Academic department: \_\_\_\_\_

Dirección de Envío/Address: \_\_\_\_\_

Teléfono/Telephone Number: \_\_\_\_\_ ext: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_

Oficina/: \_\_\_\_\_

Ciudad/City: \_\_\_\_\_

País/Country: \_\_\_\_\_

Correo Electrónico/Email: \_\_\_\_\_

Suscripción a partir del número/ Subscription from number : \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

Envíe este formato totalmente diligenciado a: [revistaiid@uptc.edu.co](mailto:revistaiid@uptc.edu.co); a vuelta de correo recibirá el ejemplar solicitado de la revista I2+D. La suscripción a la Revista I2+D es totalmente gratuita.

## **Correspondencia, Canje y Suscripciones**

**REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO I2+D  
Calle 4 Sur N° 15-134 Tels.: (57+8) 7705450, 770 6896, 770 7721  
Ext. 2606**

**Uptc Sogamoso-Boyacá, Colombia**

**E-mail: [revistaiid@uptc.edu.co](mailto:revistaiid@uptc.edu.co)**

**[www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa](http://www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa)**

**DOI: <http://dx.doi.org/10.19053/issn.1900-771X>**



Ingeniería, Investigación y Desarrollo

ISSN: 1900-771X Impreso

ISSN: 2422-4324 En línea