



# PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA INGENIERÍA

# 6



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

AÑO 3 NÚMERO 6





# PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
DE QUERÉTARO



FACULTAD  
DE INGENIERÍA



DIPFI  
POSGRADO  
INGENIERÍA

# DIRECTORIO

**Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca**  
Rectora

**Dr. Javier Ávila Morales**  
Secretario Académico

**MAP. José Alejandro Ramírez Reséndiz**  
Secretario de la Contraloría

**MSP. Sergio Pacheco Hernández**  
Secretario Administrativo

**M. en I. Alejandro Jáuregui Sánchez**  
Secretario de Finanzas

**Dra. María Teresa García Besné**  
Secretaria de Extensión Universitaria

**M. en S. Luis Alberto Fernández García**  
Secretario Particular de Rectoría

**Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña**  
Directora de Investigación y Posgrado

**Dr. Manuel Toledano Ayala**  
Director de la Facultad de Ingeniería

**Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa**  
Director de la División de Investigación  
y Posgrado de la Facultad de Ingeniería

Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería

Año 3. Núm. 006, diciembre de 2020, *Perspectivas de la Ciencia y la Ingeniería* es una publicación semestral editada y publicada por la **Universidad Autónoma de Querétaro, División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería.**

Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n, col. Las Campanas, C.P. 76010, Tel. (442) 192-12-00, ext. 7035.

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 04-2017-032412430300-203

ISSN: En trámite

Ambos registros están en trámite por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

**Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial del contenido e imágenes de la publicación sin plena autorización de la Universidad.**



## **DIRECCIÓN**

Dr. Manuel Toledano Ayala

## **EDITORES RESPONSABLES**

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa  
MC. Christopher Alexis Cedillo  
MC. Alepth Hain Pacheco Estrada  
MC. Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez

## **EDITORES ASOCIADOS**

MC. Adán Mercado Luna  
Dr. Alejandro Espinosa Calderón  
MC. Alejandro Moreno Gómez  
Dr. Andrés Torres Acosta  
MC. Armando Juárez Trujillo  
Dr. Arturo González Gutiérrez  
Dra. Claudia Gutiérrez Antonio  
MC. Cuauhtémoc Hernández Galeno  
Dr. Eduardo Elizalde Peña  
Dr. Enrique Rico García  
Dra. Genoveva Hernández Padrón  
Dra. Janet Ledesma García  
MI. Javier García Pérez  
MI José Alfonso Balbuena Cruz  
Dr. José Antonio Quevedo Tiznado  
Dr. José de Jesús Pérez Bueno  
Dr. José Luis Reyes Araiza  
Dr. José Roberto Galaviz González  
Dr. Luis Miguel Contreras Medina  
Dr. Marco Antonio Aceves Fernández  
Dr. Miguel A. Pérez Lara y Hernández  
MC. Tadeo Rodríguez

# **COMITÉ EDITORIAL**

## **DISEÑO EDITORIAL**

Diana Guadalupe Pacheco Ángeles  
Jorge Javier Cruz Florín  
COORDINACIÓN DE DISEÑO E IMAGEN  
FACULTAD DE INGENIERÍA

## **PORTADA**

Alejandro Martínez Aguilar

## **CUIDADO DE LA EDICIÓN**

Daniela Pérez  
Soid Lazlo Ruiz  
DISEÑO EDITORIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA



## **10. INGENIERÍA INVERSA COMO MÉTODO DE INSPECCIÓN: CASO DE ESTUDIO EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA**

Reverse engineering as an inspection method: a case study in the aeronautics industry  
GUSTAVO JAVIER BONILLA LARA, ERIC LEONARDO HUERTA MANZANILLA

## **28. DISEÑO DE UN CONTROLADOR PD DE POSICIÓN PARA UN *BALL AND BEAM***

Design of a PD position controller for a Ball and beam  
OMAR NUÑEZ ANGUIANO, BERNARDO DANIEL TRUJILLO IBARRA

## **42. REVISIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN DE FALLAS EN MAQUINARIA ROTATIVA MEDIANTE GRÁFICOS DE RECURRENCIA**

Rotating machinery fault characterization by Recurrence Plot: A review  
IGNACIO TORRES CONTRERAS, JUAN CARLOS JÁUREGUI CORREA

## **64. REDUCCIÓN Y EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS FACIALES EN IMÁGENES UTILIZANDO ANÁLISIS DISCRIMINANTE LINEAL (LDA) Y ANÁLISIS DEL COMPONENTE PRINCIPAL (PCA)**

Reduction and extraction of facial features in images using Linear Discriminant Analysis (LDA) and Principal Component Analysis (PCA)

FRANCISCO EMILIANO AGUAYO SERRANO, JESÚS CARLOS PEDRAZA ORTEGA  
MARCO ANTONIO ACEVES FERNÁNDEZ, EFRÉN GORROSTIETA HURTADO

## **78. AVANCES EN EL USO DE MEMBRANAS SINTÉTICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA**

Advances in the use of synthetic membranes for water treatment  
ESTEFANÍA ESPINOZA MÁRQUEZ, GENARO MARTÍN SOTO ZARAZÚA

## **92. COMPARACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN OBTENIDA POR EL MÉTODO DE *EDDY COVARIANCE* Y MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS EN UNA ZONA SEMIÁRIDA**

Comparison of the evapotranspiration estimated by the Eddy Covariance method and semiempirical methods in a semiarid zone

ELVIA OLIVIA PÉREZ HERNÁNDEZ, ENRIQUE GONZÁLEZ SOSA



**106. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO PARA EL PRONÓSTICO DE INDICADORES EN EDUCACIÓN SUPERIOR: CASO DE LAS TASAS DE ABSORCIÓN, COBERTURA Y ABANDONO EN MÉXICO**

Analysis of time-series for the forecast of indicators in higher education: The case of absorption, coverage and dropout rates in Mexico

YURIXHI ANDAYA HERNÁNDEZ, ERIC LEONARDO HUERTA MANZANILLA

**122. DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN DINÁMICA DE LA CUENCA DEL MEDIO BALSAS: PRESA HIDROELÉCTRICA EL CARACOL**

Diagnosis of Erosion Dynamics in the Balsas Basin: El Caracol Hydropower Dam

OLGA SEGURA JIMÉNEZ, ENRIQUE GONZÁLEZ SOSA

**138. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A COMPRESIÓN DE PANELES ESTRUCTURALES PREFABRICADOS DE FERROCEMENTO**

Analysis of the mechanical compressive behavior of prefabricated ferrocement structural panels

EMMANUEL VALENCIA JIMÉNEZ, MIGUEL ÁNGEL PÉREZ LARA Y HERNÁNDEZ, IVÁN FERMÍN ARJONA CATZIM

**148. REDISTRIBUCIÓN DE LA INFILTRACIÓN DEBIDO A LA VEGETACIÓN NATIVA EN ZONAS SEMIÁRIDAS**

Redistribution of infiltration due to native vegetation in semi-arid areas

ANA BERENICE GARCÍA PÉREZ, ENRIQUE GONZÁLEZ SOSA

# INGENIERÍA INVERSA COMO MÉTODO DE INSPECCIÓN: CASO DE ESTUDIO EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

---

Reverse Engineering as an Inspection Method: a Case Study in the Aeronautics Industry

Gustavo Javier Bonilla Lara<sup>1\*</sup>, Eric Leonardo Huerta Manzanilla<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia  
\*gus\_bonilla@hotmail.com

## RESUMEN

Las empresas manufactureras se encuentran bajo presión para optimizar sus procesos productivos en un marco de tiempo corto debido a los retos constantes del ambiente económico. Sin embargo, algunas industrias, como el sector aeronáutico, no presentan un grado de repetibilidad en sus procesos productivos a tal grado que les permita controlar, medir y mejorar el sistema interno de calidad. La falta de altos volúmenes de producción no permite usar herramientas estándar debido a la carencia de datos iterativos y a la naturaleza manual de los procesos, lo que pospone las mejoras por un largo periodo de tiempo. Por estas razones, herramientas estadísticas que funcionan adecuadamente en otras industrias no pueden aplicarse en ambientes de bajo volumen como lo es la aeronáutica. Esta investigación contribuye con el análisis de diferentes perspectivas sobre cómo aplicar la ingeniería inversa para digitalizar, rediseñar y optimizar los componentes de una superficie 3D. Una nueva metodología es presentada para optimizar el sistema de medición para que contribuya a la obtención de dimensiones precisas de un componente físico. La implementación de un escáner óptico es requerida para capturar los datos, filtrar el ruido y realizar un estudio estadístico para mostrar la eficiencia de la tecnología.

**Palabras clave:** Ingeniería inversa, aeronáutica, modelación 3D, método de inspección.

## ABSTRACT

Manufacturing companies are pushed to optimize their production processes within a short time frame due to the constantly challenging economic environment. However, some industries, such as aeronautics, do not present the degree of repeatability in their production processes to an extent that allows to control, measure, and improve the internal quality system. The lack of high volume

production and iterative data, in addition to the manual nature of the processes, does not enable the use of standard methods. Statistical tools that work well in other industries cannot be applied in low volume businesses such as the aeronautics. This paper contributes to the analysis of different perspectives on how to handle the application of reverse engineering to digitalize, redesign, and optimize a component from a 3D surface. A new methodology is presented to optimize the measurement system so that it contributes to the gathering of accurate dimensions of a physical component. The implementation of an optical scanner is required to capture multiple data, filter the noise, and perform a statistical study to show the efficiency of the implemented technology on this aeronautical application.

**Keywords:** Reverse engineering, aeronautics, 3D modeling, inspection method.

## INTRODUCTION

In the last decade, the digitalization of components has provided a significant benefit for some companies in the areas of Reverse Engineering (RE), Re-engineering (ReE), and Virtual Modeling (VM). Generation of 3D models based on a physical object has gained the attention not only from product designers but also from production engineers. This is attributable to the potential applications in the production lines in various domains of the industry. These applications are still being analyzed, and RE has not been fully applied in the production lines because the digitalization process takes a considerable amount of time and the accuracy of the method is still uncertain. The application of reverse engineering in the industrial sector aims to redesign a physical component while using a digitized 3D point cloud [1].

RE is defined as the geometry and dimensions extraction from a physical master sample to build a 3D Computed-Aided Design (CAD) model



[2], [3]. The main objective of RE is to extract accurate information from a physical object to reconstruct a parametric CAD model that is as exact and precise as the masterpiece [4]. All the RE applications pretend to satisfy a range of geometric constraints that are directly related to the physical object—such as parallelism, orthogonality, symmetry, concentricity, and angularity [5]—that can help to understand the real nature of the component. Once the real dimensions are extracted, they are used to create the CAD model that allows the optimization of the production process.

The available literature provides additional definitions of RE. For instance, [6] defines RE as the process to obtain a CAD model derived from a point cloud; this cloud has to be acquired by scanning the part without having any technical specification such as drawings, nor expected dimensions. The acquisition of the data must be made preferably by using high-precision technology to eliminate noise that affects the point cloud. According to [6], there are 2 methods to reconstruct the model: surface fitting, the method that uses the boundaries of the cloud; and model reconstruction, this last one checks the dimensions of the cloud in all the surfaces to reconstruct a high-quality surface.

In some cases, the digitalization process can be complicated because the obtained model can often be noisy and some data can be lost [1] due to many reasons. As [7] and [8] stated: the digitalization of any object is efficient if the surface is integrated with a limited amount of points without losing its definition [7] and the real nature of the piece. The correct technology and methodology selection is essential to obtain a consistent digital model. Inaccuracies might occur during the digitalization process due to the data acquisition method, type of technology, algorithms, segmentation, and noise removal process [5]. All these factors contribute systematically to the final 3D

model to optimize the response variables that are under analysis: (1) total time spent in obtaining the 3D model (scanning + processing), (2) accuracy of the final model, (3) difficulty to remove the noise, (4) capacity to use this technique as an inspection method, and (5) possibility to use the CAD model to redesign the production process [9]. This scenario is one of the reasons why reverse engineering is still a challenging methodology for the industrial sector.

There are many important reasons to start using RE in different stages of the product–process development procedure in an industrial environment. When the 3D model of the object under analysis does not exist, and the CAD model is not available, RE is essential to recreate the surface model [10], which is to be used as a physical reference. The nominal dimensions of the object are extracted to have a performance comparison based on the original specifications stated in the drawings. In other words, all the physical tolerances are obtained via RE to construct the CAD model to use it as a real 3D reference instead of only having a 2D drawing. An additional application of RE is to start using this methodology as an inspection method, making sure that the technology is efficient, reliable, and it reconstructs the surface with the required precision. The primary purpose of any inspection method is determining the real deviation of a product from a set of defined specifications [11], and RE is an excellent opportunity to achieve this.

This paper describes a methodology to perform RE on an aluminum component whose shape is irregular. This part belongs to the aeronautical industry, and currently, it is in serial production following manual operations along the whole manufacturing chain. Due to the manual processes, most of the dimensions have considerable variation among each of the parts, creating the effect of having a production process out of

control. Moreover, the current measurement methods such as calipers, go-no-go, and rulers are not accurate, and it is impossible to know if the parts are OK or Not-OK with physical measurements. The reason to digitalize this part is that the 3D CAD model of the object is not available, having a 2D drawing as a unique reference; therefore, the main objective of this paper is to digitalize this component to obtain the 3D CAD model by using RE to optimize the manufacturing concept.

The 3D model is used to redesign the production process and start manufacturing the part via Computer Numerical Control (CNC) and using the 3D scanner as an inspection method by comparing the parts against the digital masterpieces obtained via RE. Capability analysis is performed to compare the current situation against the new method proposed in this paper. State of the art for this technology is to solve a specific problem, currently happening in an industrial environment. The purpose of this paper is to demonstrate the hypothesis that RE can be used as an inspection method by obtaining a 3D CAD model and using it as a masterpiece to measure, compare, and create statistical analysis to understand the natural variation of the current production process.

## SPECIFIC OBJECTIVES

- Applying the state-of-the-art Reverse Engineering into the Aeronautics industry to solve a specific problem caused by the geometrical variation of a component.
- Obtaining the 3D CAD model of 4 production parts by extracting the point clouds of a masterpiece.
- Digitalizing 120 production parts to compare them against the obtained CAD model.

- Understanding the real geometric variation among the serial production parts to take the corresponding actions to control the production system.
- Performing statistical analysis of the parts to understand where the variation is being originated.

## LITERATURE REVIEW

The literature describing RE is vast, and many studies have been performed around Reverse Engineering (RE) in the last decades due to all the advantages that this technology provides to many scientific and industrial domains. According to [12], the automotive industry needs to quickly determine if the part is dimensionally under specification due to quality requirements. However, the traditional methods such as Coordinate Measurement Machines (CMM) get the precision of the part but not the correct time frame due to its long time-consuming method.

According to the literature, there are many applications of Reverse Engineering. The authors [2] define RE as the redesign of a product whether the product is destroyed, disassembled, analyzed, or tested to improve its functionality, form, or physical characteristics. This statement means that the process starts with a physical object and goes through all the product developing steps until achieving the specifications of the product; that means, in the opposite way [13].

The most used approach of RE is the reconstruction of a CAD model by extracting the real dimensions, geometry, and shape of a physical object. The definition of shape might be confusing based on the perspective; however, the one that this paper used is defined by authors [2]: geometrical information that describes the scale, dimensions, angles, and surfaces of any object. This last sentence means all the required characteristics to reconstruct the selected object.



Available methods include point cloud inspection shown in [11], whose primary goal is to compare an object with the design model by using the ICP (iterative closest point). This last research creates a technique to calculate the deviation between the point cloud obtained via laser scanner and the original model. Although they showed that there is a significant statistical deviation between object-model, they concluded that this deviation is reduced by increasing the point density of the scanning.

On the other hand, introducing a structured light scanning method to build a point cloud that is then processed as mesh and therefore compared with the original CAD model might be useful [14]. The idea behind this research was to construct a cost-effective solution for companies that cannot afford a high-tech scanning option. While developing this low-cost method, the repeatability of the scanning procedures has been successfully proven. The authors demonstrated that adimensional verification is possible when using optical acquisition systems, acquiring reliable information to create a quality inspection method.

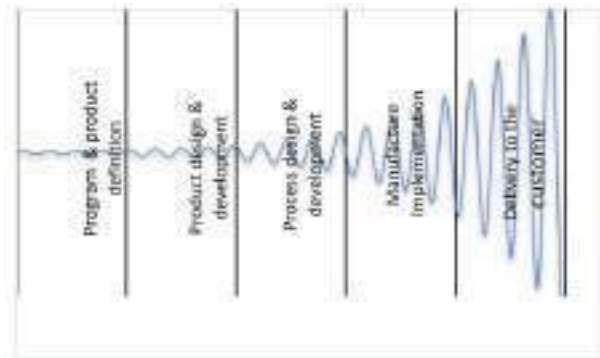
The idea behind this study was to adopt optical technology to verify the correct geometry of a part, verifying the fit, form, and function of the part. In other words, to stop using traditional contact measurement techniques to inspect a component.

## INDUSTRIAL CONTEXT

### Regular engineering compared to reverse engineering

Trying to understand a manufacturing production system by just seeing the working stations at the factory is like trying to understand a living body by just looking at its skin. To comprehend the manufacturing concept of any production plant, it is necessary to

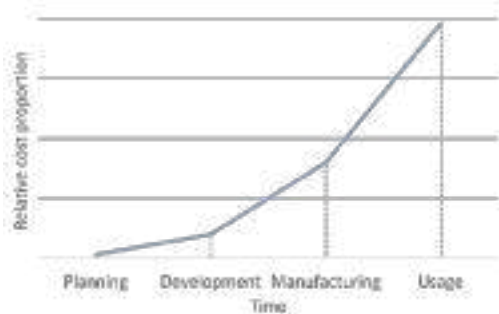
go beyond its apparent processes and analyze the information deployment starting from the customer's needs, product definition, product design, manufacturing concept strategy, and the implementation of quality tools throughout the supply chain. Any perspective not considered during the design phase of either the product or the process creates a bullwhip effect at the production plant as it is shown in Fig 1. The purpose of engineering tools such as Advanced Product Quality Planning (APQP) and Quality Function Deployment (QFD) is to link the customer's needs and expectations to the conceptualization of the product and production process. This situation means that the normal engineering process looks to guide the design, manufacturing, and production by cascading the customer's needs throughout the whole production chain.



**Figure 1.** Representation of the effort needed to implement changes through the product development phases.

A thriving manufacturing environment is the one that creates the requirements for high quality as early as the concept definition stage of the product. Creating a product and process description with constraints based on the customer's expectations is less costly than changing a product that is already in the production phase, or still worse, that is already being delivered to the customer. A problem that might cost some dollars during the definition phase costs thousands or millions to fix during the manufacturing phase as is represented in Fig. 2. The product must

be fully designed and developed when the production experts are envisioning the process. All the tolerances, dimensions, specifications, and constraints must be unequivocal in such a way that there is no doubt of what is being expected to be produced. These tolerances must be defined at the correct timing; otherwise, modifying the whole manufacturing concept when there is the constraint to deliver parts to the customer is going to be an expensive and tough challenge.



**Figure 2.** Representation of cost proportion needed to implement changes along with the production phases.

There are specific tools used by many sectors that are well known—and they have successful implementation cases in several industries—such as Quality Function Deployment (QFD) and Advanced Product Quality Planning (APQP). As mentioned before, the primary purpose of them is to deploy the customer's needs along the production chain to gain the customer's satisfaction. Many steps depend on the company and the complexity of the product, but most of them follow the standard engineering procedures. However, when some steps are omitted during the product-process conceptualization, and the product is under production, the engineering team must implement another kind of tools. The re-definition of the product must start from the high level of variation in the production floor to follow a reverse engineering procedure to re-design the production concept and extract the real dimensions, tolerances, and specifications of the product that the customer is expecting. In other words,

the application of RE to refine the production method and the product itself.

### Raw material

The method proposed in this paper is based on the application of RE to digitalize an aerospace component made from a metal sheet of wrought aluminum alloys, classified in the aerospace industry as the commercial part number LN9073. The thickness of the aluminum is 1mm, allowing the manipulation of the material to get the final form through the current production process, which will be explained in the following section. This material has been under serial production for a couple of decades; however, the production line was transferred from Europe to Latin America, where this research is taking place. Due to the internal policies of the company, further information cannot be disclosed, but enough information is described so that any person can replicate this methodology in case of experiencing a similar situation than the one observed in this company.

### Current production process

The component to be analyzed throughout this research is currently under serial production to satisfy the demand of the commercial aircraft manufacturing industry. In Fig. 3 a photograph of the component is shown. The demand of the customer cannot be fulfilled, and the non-quality cost is high and increasing due to the vast dimensional variation of this component. This variation is coming from different sources, and some root causes had been identified but are impossible to control with the current production methods. The 3D model of the product was not available, and the 2D drawings are not detailed enough to clearly show the expected dimensions and tolerances. Subsequently, the DFMEA was not created, leaving behind all the risks that might occur if the tolerances are not met. These two problems impact on the manufacturing concept definition because the jigs, tools, and machines do not have the correct



dimensions to produce a part under specification, or in some cases the tooling is worn. Additionally, the production process is based on a manual operational system. The final effect of this is a non-capable production system that creates massive variation among all the parts. Every part that is being produced is entirely different, and a standardization method does not exist.



**Figure 3.** Aeronautical component under analysis.

The whole production process can be seen in Fig. 4, and it is explained as follows:

A metal aluminum sheet arrives at the plant where it is cut in a portal milling machine to have a specific and smaller shape making it easier for manipulation. The aluminum is heated for 2 hours to reach a temperature of 430 °C, and it follows a gradient down at a rate of 30 °C per hour. Then the material comes to a pressing machine where 200 KN press the part against a tooling to create the specific radius similar to the expected shape. To achieve the fine-tuning of the shape and radius, the operators use some hammers and hit the parts manually until it acquires the form of the jig. A hand-operated marking and cutting process follows, where the operator must draw the form of the component manually while using a jig and a marker and cuts the part by using a pneumatic moto-tool until it approximately achieves the final form of the part. The mechanical process arrives at an end where the component is adjusted manually throughout a conformal process. A considerable amount of failure modes happens repetitively due to the high likelihood of occurrence during production.



**Figure 4.** The Production process of the component under analysis.

To make sure that the product has the correct length, radius, and dimensions stated in the drawings, the quality team inspects 100 % of the parts with the use of manual measuring tools. Continuous variable instruments are used to examine specific dimensions; however, the production is irregular, and the repeatability and reproducibility (R&R) of the measurement is low. In some other cases, go-no-go attributes are responsible for determining if the part is under or out of specification; nevertheless, there is a lack of standardization within the inspection method among the quality members. For all these reasons, the measuring techniques are not robust enough to guarantee the specified part dimensions, creating type I errors (false positive) and type II errors (false negative) as part of the daily problems in the production line. Consequently, the failures detection method is not holding the not-OK parts at the early production stages.



The part is sent to an artificial aging, galvanic treatment, and painting processes, which are irrelevant to this study due to the scope of this research.

Finally, the component arrives at the assembly production line where it is assembled with some other components. At this final stage of production, all the problems emerge because, in some cases, the different components cannot be assembled due to the incorrect dimensions of the components. Non-quality costs such as reworks, rejects, scrap, defects, and customer complaints are the only constant in this production environment. It is crucial to keep in mind that the root cause of the problem occurs at the early stages, but it is visible in the final assembly lines.

The lead time of the whole manufacturing process takes more than two weeks, making it very difficult to see the correlation between cause and effect and shifting the control gain to a long-time scale.

## MATERIALS AND METHODS

### Materials and Softwares

In this study an optical portable 3D scanner Handyscan 700 is used to obtain the surface points of the components. The Handyscan 700 is a versatile 3D scanner that uses dynamic referencing by cause of the optical reflectors that create a locked reference system, allowing the user to move the scanner around the part. It incorporates two cameras that capture 60 frames/s and 7 laser crosses with an additional cross for the hard to reach zones. One of the benefits of this technology is that it allows real-time visualization of the part in the computer, creating an automatic point mesh output that can be exported in different formats such as .dae, .stl, and .obj. The technical specifications of the Portable 3D Handyscan are listed next:

- 7 laser crosses with an option of an extra line
- Accuracy – 0.020mm + 0.060mm
- Measurement rate – 480,000 measurements per second
- Maximum resolution – 0.20mm

It is essential to use specialized software that can transfer the dimensions and coordinates of the real object into a point cloud that can simulate the 3D characteristics within a digital environment. The software VXelements is used to digitalize the physical part and extract the point clouds, and PolyWorks is used to create the planes, dimensions, and comparisons among meshes. The experimentation is performed thanks to the many tools that PolyWorks offers to the market.

### Methodology

This research is divided into two different stages:

1. Application of RE in a real production environment to acquire the 3D model of 4 pieces based on the known specifications and drawings.
2. Using the 3D model to understand the statistical variation of the current production system by digitalizing 120 parts and comparing them against the obtained model.

It is important to remember that the main objective of this paper is to apply RE in a real production environment to optimize manual operations while trying to obtain a new production system. The digitalization of the part it is crucial to obtain a 3D model that is going to be used as the masterpiece. However, the focus of the paper is not based on the algorithm to digitalize the parts; on the contrary, it is based on the methodology to use reverse engineering as an inspection method. The method extracts the real dimensions of a masterpiece with the 3D scanner described



in the previous section. Once that the point cloud is obtained, the 3D solid is generated to use it as a reference to redefine the whole production process. The proposed method is divided into eight steps as shown in figure 5.

### Resolution selection

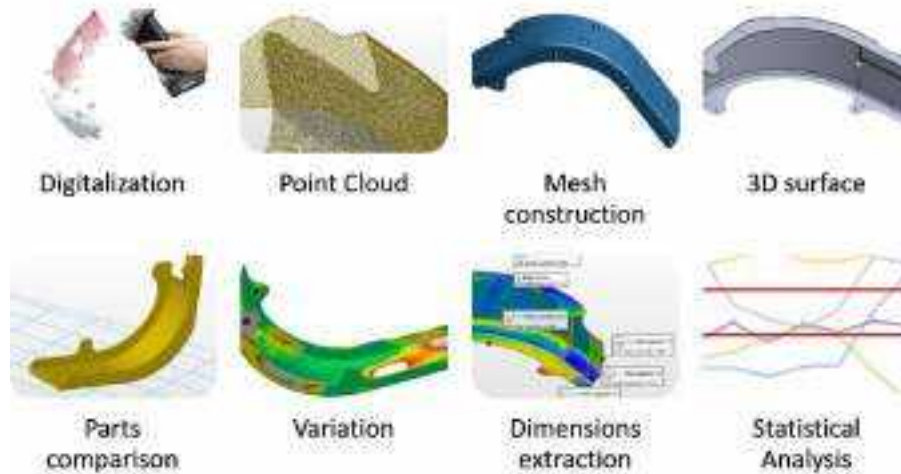
The first step of this research is configuring the scanner and selecting the correct parameters in the software. The independent variable is the resolution of the scanner (X1) and the variables under analysis are the border edge accuracy (Y1), scanning noise (Y2), and file extension (Y3) as it can be seen in Table 1. All these variables are taken as attributes depending on the obtained results. As can be seen in Fig. 6, the best resolution (X1) is 0.35mm; therefore, this configuration is used in the whole scanning process.

### Components digitalization

One of the most critical steps of this research is the digitalization of the components that were under analysis. An assortment of 120 components was selected from the regular production at the first stage in the assembly line.

These parts were randomly selected over almost 3 months to determine the normal variation of the production process over a considerable time frame; meaning that several batches were considered, avoiding a tendency to select only good or bad parts. To digitalize the parts, they must be prepared by attaching some positioning targets as shown in Fig. 7.

These targets help to maintain the reference of the scanner so that it can create a



**Figure 5.** Methodology to obtain all the critical dimensions of the components to perform statistical analysis.

**Table 1.** Dependent variables (Y1, Y2, Y3) in function of the scanner resolution (X1).

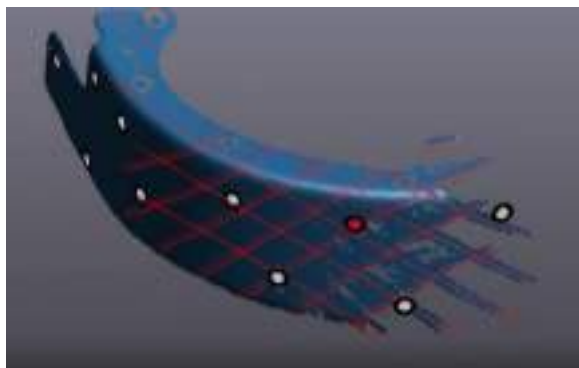
Resolution (X1)	Border edge accuracy (Y1)	Scanning noise (Y2)	File extension (Y3)
3.0 mm	✗	✗	✓
1.0 mm	✗	✗	✓
0.7 mm	✓	✗	✓
0.35 mm	✓	✓	✓
0.20 mm	✓	✓	✗



**Figure 6.** Scans comparison generated with 3.00 mm and 0.35 mm of resolution.

cloud of points that is statistically equal to the physical part.

This means that the component is digitalized by creating a set of reference points that keep the real dimensions of the component.



**Figure 7.** Scanning process to obtain the point clouds. Positioning targets are attached to the component as reference points for the scanner.

### Repeatability and Reproducibility study (R&R)

It is essential to validate that the technology used in this paper can measure the part with the respective accuracy to guarantee that the measuring variation is not statistically significant for the experiment. To achieve this, one part was selected to be measured under constant circumstances (shutter velocity = 60 ms, resolution = 0.35 mm); 5 replications of the same part ( $n=5$ ) were obtained. These measurements can be considered as replication and not duplicates because the scanner was shut down and calibrated every time a new measurement started. Since the same part is being compared to itself, the variation is just coming from the measurement system. In other words, the validation of the resolution of the scanner is analyzed while the measurement error is compared. In Fig. 8, we can see a color mesh comparison between the 5 replications, observing that the variation is not representative.



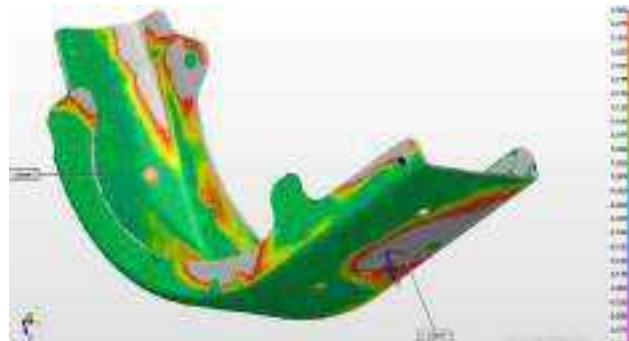
## Measurement of critical dimensions

Based on the recurring dimensional problems that happen at the production line, and on the specification drawings, some critical characteristics were chosen to be monitored during this research. To achieve this, reference targets were attached to the 3D model to know the delta between the model and the point clouds that were digitalized in the previous sections. These references are the purple points shown in Fig. 9. The software extracts the standard dimensions from the 3D surface to the point cloud, obtaining the real dimensions of the mesh. However, both the 3D model and the mesh must be perfectly aligned; therefore, a coordinate system must be attached to the 3D model. Depending on the part to be analyzed, a set of 35 points were selected as variables along with the experiment. An example of this comparison is shown in Fig. 9 to represent the delta of dimensions between the 3D model and the digitalized part.

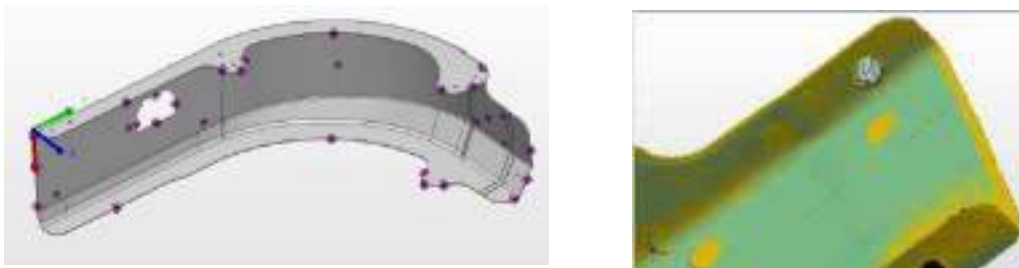
## Dimensions extraction

The most important part of this research is obtaining the 35 critical characteristics specified in the previous section. This must be performed over the 120 digitalized parts under analysis. To give a clear idea of what this effort means, it takes approximately 20 minutes per part to obtain its dimensions; therefore, it took more than 40 hours to get the whole data. The sequence to obtain the data goes as follows:

- 1) Importing the 3D model.
- 2) Attaching a coordinate system to the model.
- 3) Setting the reference targets to the critical characteristics of the part.
- 4) Importing the point cloud.
- 5) Aligning the mesh to the model by several iterations until they converge.
- 6) Extracting the deltas of the mesh against the model.
- 7) Creating a color map to see the deviations visually.
- 8) Creating a database with all these values.



**Figure 8.** Color-coded error map comparing the same part through different scanning replicates to compare the measurement error of the scanner.



**Figure 9.** Reference targets whose deviation are extracted to measure all the 120 scanned parts. The delta between the 3D model and the point clouds are visible.

As specified before, the analysis is done over 4 aeronautical components and 2 sub-assemblies. All the critical dimensions were extracted, knowing that the current tolerance is  $\pm 1.0$  mm in every side of the component.

## RESULTS

A sample of 15 pieces was carefully chosen from the production line to obtain the physical dimensions in a digital environment. Each of these 15 parts was stated as an OK raw material in the production line because they were measured manually with a digital caliper before the analysis. Using the experience from the final production line by analyzing the failure modes that constantly happen and whose root causes had not been found yet, 10 key critical characteristics were selected. These 10 characteristics are stated with the corresponding dimensions and tolerances in the 2D engineering drawing, having a maximum tolerance of  $\pm 1.0$  mm. To understand the current quality situation of these parts, it is essential to develop a capability study that can show if the process is in or out of control. This factor depends on the variation and the number of defects per million opportunities (PPM's) that the current process can produce. In Fig. 10 a control graph shows a set of values coming only from 5 out of these 10 characteristics previously selected. The reason for doing this is that further analysis was made with the characteristics under control.

By making the analysis of these 5 characteristics, it is evident that the process is out of control. Most of the values are completely out of the specification range, and therefore, this creates vast variation in the production environment. To statistically prove this hypothesis, a capability analysis was made by using Eq. 1; the results are presented in Table 2. Because all  $C_p$  and  $C_{pk}$  are  $\ll 1.33$ , it is possible to conclude that the process is out of statistical control, presenting enormous variation in the production line. In other words, every single part that is being produced is statistically different from the rest of them; making it impossible to predict the dimensions of the subsequent parts.

Formulas to perform a capability study.  $C_p$  and  $C_{pk}$  are the necessary parameters to know if a process is under statistical control.

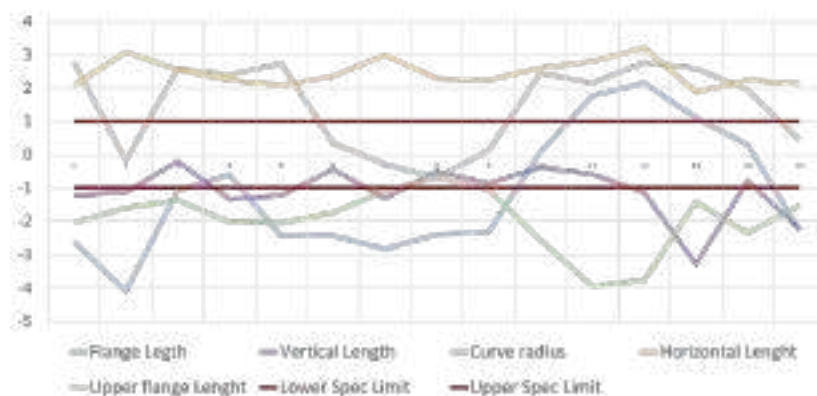
$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

$$C_{pk} = \min(C_{pl}, C_{pu})$$

$$C_{pl} = \frac{USL - \mu}{3\sigma}$$

The following 5 critical characteristics come from the lateral plane of the component. The-

$$C_{pu} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \quad (1)$$



**Figure 10.** Control chart showing the dimensions of 5 critical characteristics through a sample of 15 pieces. The upper and lower limits are shown with the tolerance of  $\pm 1.00$ mm.



se dimensions are crucial because they determine the total length of that curve. In case these dimensions are out of specification, it would create problems whenever the assembly process starts because the part will not fit between the other components. To be clear, these 5 points are shown in Fig. 11 as purple points. Additionally, a capability analysis was also made to understand the statistical variation coming from these points. A control graph is shown in Fig. 12, where it is possible to see that the process seems to be under control. Although the data seems to have a tendency towards the upper specification limit, the process is under control since it repeats the values, as shown with the Cp and Cpk in Table 3 because all the Cp are  $\gg 1.33$ .

Although these last characteristics are under statistical control when analyzing the individual components, a problem arises when the same points are studied while the subassemblies are manufactured.

The hypothesis is that these dimensions are modified by the operators when they as-

semble the two curves together. As it can be seen in Fig. 13 where a color map is shown, the delta between the 3D solid and the point clouds arises significantly when the subassembly is manufactured.

The color map shows a massive dimensional change between the single component and the subassemblies in this area of the curve.

To prove this, the hypothesis is that the dimensions of the single component ( $\mu_A$ ) are statistically equal to the dimensions of the subassembly ( $\mu_b$ ); therefore, the following statement is analyzed:

Hypothesis testing to compare statistically two samples before and after the assembly process.

$$H_o: \mu_A = \mu_b$$

$$H_a: \mu_A$$

$$\neq \mu_b$$

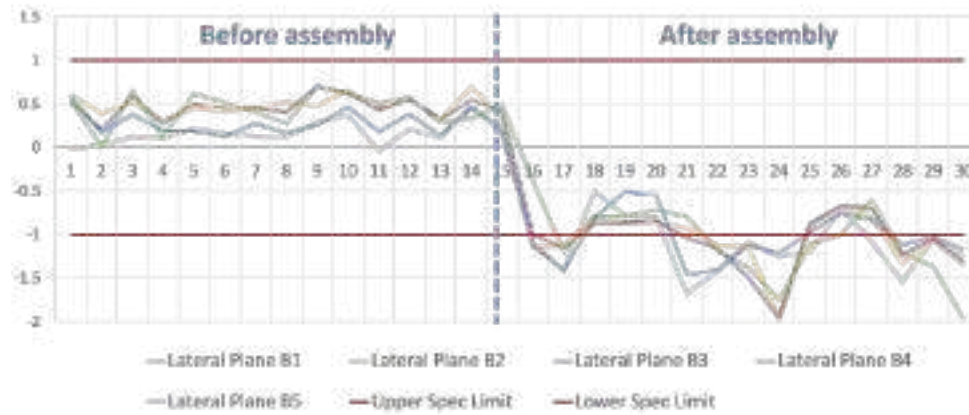
(2)

**Table 2.** Capability study showing the Cp and Cpk of the 5 critical characteristics of the components.

	Flange Length	Vertical Length	Radius	Horizontal Length	Upper flange length
Cp	0.17729	0.42299	0.25155	.82455	0.36022
Cpk	-0.03172	-0.04475	-0.11920	-1.19159	-0.34065



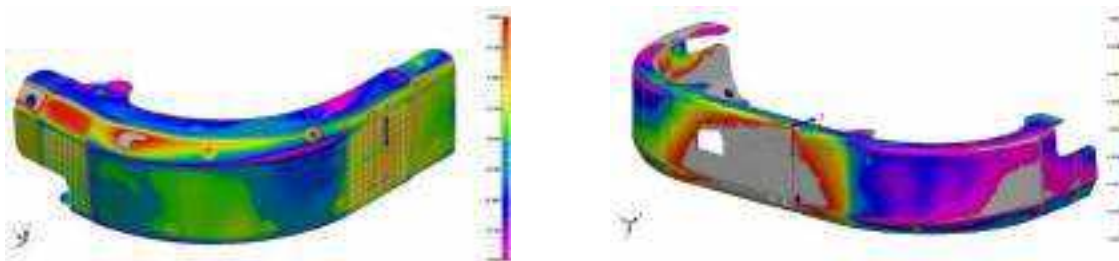
**Figure 11.** Critical dimensional points on the lateral plane of the component.



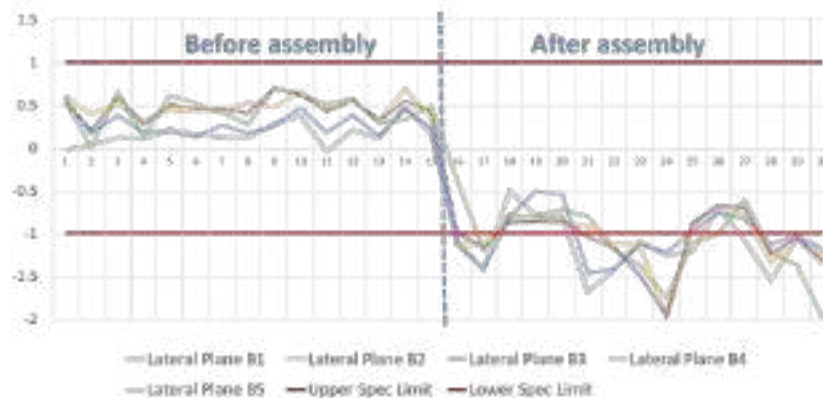
**Figure 12.** Control chart showing the variation of 5 critical characteristics on the lateral plane through a sample of 15 pieces. Study performed before the assembly process.

**Table 3.** Capability study showing the Cp and Cpk of the 5 critical characteristics on the lateral plane before the assembly process.

	Lateral Plane B1	Lateral Plane B2	Lateral Plane B3	Lateral Plane B4	Lateral Plane B5
Cp	2.40323	2.87495	2.50666	1.65325	2.34582
Cpk	2.01070	1.50025	1.33570	0.91793	1.68696



**Figure 13.** Color-coded map comparing the deltas between the 3D model and the point cloud. Left picture performed before the assembly process. Right picture after the assembly.



**Figure 14.** Control chart showing the variation of 5 critical characteristics on the lateral plane through a sample of 15 pieces before the assembly process and 15 parts after assembly.



**Table 4.** Mean comparison of the lateral plane before and after the assembly process. Two-tailed t-student analyses showing the test statistic ( $t_o$ ) and a critical value ( $t_c$ ).

	Before		After		Test Statistics	
	Mean	Variance	Mean	Variance	tc (95%)	to
Lateral Plane B1	0.16333	0.01924	-1.12520	0.10815	2.04841	13.98206
Lateral Plane B2	0.47817	0.01344	-1.07073	0.10420	2.04841	17.48955
Lateral Plane B3	0.46914	0.01756	-1.08173	0.11098	2.04841	16.75341
Lateral Plane B4	0.44477	0.04065	-1.08660	0.18511	2.04841	12.48243
Lateral Plane B5	0.28087	0.02019	-1.03373	0.08943	2.04841	15.37745

In Fig. 12, it is quite evident that the dimensions get out of control after the assembly process. Moreover, the change is so significant that it seems that they are statistically different. To be sure about this theory, a test statistic ( $t_o$ ) and a critical value ( $t_c$ ) were calculated in Table 4. In all the 5 measurements,  $t_o \gg t_c$ ; therefore, there is enough evidence to prove that the assembly process affects the dimensions of the parts, creating a new average statistically different from the original value. This means that the null hypothesis is rejected with a confidence of 95 %.

## DISCUSSION

As it was previously described, the manual measurement with the caliper showed that all the parts were OK in the quality gate established in the factory. However, by following the methodology presented in this paper, it was possible to see that all the 10 critical characteristics are out of tolerance and, by using statistics, they are entirely out of control. Since all the Cp and Cpk are  $\ll 1.33$ , it is possible to conclude that the process has no control and the variation among the parts is too high, producing parts consistently out of the specification. Since the part is entire-

ly irregular, it is not possible to measure the parts accurately with manual instruments. By seeing the results, there is a production process based on manual operations with a considerable amount of failure modes happening repetitively.

The methodology presented in this paper is capable of measuring, visualizing, and determining the deviations accurately in any of the characteristics of this component. RE was the base of this research because it allowed the creation of a 3D model that could be used as a master reference to measure all the parts. RE is typically used by designers and materials creators, but in this case, it was used to create a measurement system capable of determining the real dimensions of a serial production part. The method was a combination of RE and statistical control tools to optimize the aeronautical production system.

The next step in this research is the optimization of this production system; shifting the manual operations into an automatic production system. The 3D model could be used to create the corresponding jigs and fixtures to shift the manual production system into a Computer Numerical Control (CNC) methodology. This optimization could be performed in the production plant and then a new set of parts could be produced by CNC.



## CONCLUSION

The root causes of the problems in a production environment are difficult to find in some cases. These difficulties come from different perspectives such as a lack of training and standardization, incorrect management policies, machine's inaccuracies, but the most critical source of poor-quality is variation among the processes and production parts. This was precisely the case presented in this paper. An aeronautical production system whose ability to produce parts with statistical control was nonexistent. The assignable causes of variation were mainly coming from the manufacturing manual method that was almost impossible to control due to the imperfection of the production controls. Manual operations were not capable of creating repeatability in the process, and therefore, the variation was a continuous within the process.

Through the state-of-the-art reverse engineering, it was possible to create a 3D model coming from a masterpiece whose characteristics were in accordance with the technical drawings. Since the only available reference was a 2D drawing, this model matched all these special characteristics to satisfy the customer's needs. As soon as the masterpiece was created and validated by the quality team, digitalizations of 120 production parts were performed to understand the variation among those parts; by doing that, it was possible to measure, analyze and observe them deeply enough to understand the nature of the parts. Through this methodology, the 3D model was used as a masterpiece to measure, compare, and extract the dimensions of all the 120 parts that were scanned in this research. State-of-the-art RE was the base to create an inspection method in this production system belonging to the aeronautical industry.

The combination of RE and statistics was a novel methodology to create a measurement system with accurate results. The previous methodology used in the parts production was not capable since all the parts

analyzed were stated as OK; contrary to the results shown in this paper. Measuring the meshes in a digital environment is a better methodology that allows visualizing simply the deviations on the product's dimensions. In this paper, only the most valuable results were presented, but further analysis will be done in the future to optimize the production process in this factory. This paper is an example of an application of the state of the art and research literature into a running production system while using statistics.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) and Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) for supporting this research.

## REFERENCES

- [1] S. Gauthier, W. Puech, R. Bénéière, and G. Subsol, "Analysis of digitized 3D mesh curvature histograms for reverse engineering," *Comput. Ind.*, vol. 92–93, pp. 67–83, 2017.
- [2] N. Anwer and L. Mathieu, "From reverse engineering to shape engineering in mechanical design," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 1, pp. 165–168, 2016.
- [3] F. Ali, B. V Chowdary, and L. Gonzales, "An integrated design approach for rapid product development A case study through application of reverse prototyping tools," *J. Eng. Des. and Tech.*, vol. 11, 2013.
- [4] F. Buonamici, M. Carfagni, R. Furferi, L. Governi, A. Lapini, and Y. Volpe, "Reverse engineering of mechanical parts: A template-based approach," *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 145–159, 2018.
- [5] I. Kovács, T. Várady, and P. Salvi, "Applying geometric constraints for perfecting CAD models in reverse engineering," *Graph. Models*, vol. 82, pp. 44–57, 2015.



[6] Y. Zhou, "Reverse modeling of Auto part reconstruction based on CATIA," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 159, pp. 253–256, 2012.

[7] L. Pagani and P. J. Scott, "Curvature based sampling of curves and surfaces," *Comput. Aided Geom. Des.*, vol. 59, pp. 32–48, 2018.

[8] D. E. F. Fabio, P. Antonella, and C. Armando, "Shape Measurement Based on 3D Optical Scanner : Real Case Study in the Aeronautics Industry," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 656, pp. 378–387, 2014.

[9] J. Herráez, J. C. Martínez, E. Coll, M. T. Martín, and J. Rodríguez, "3D modeling by means of videogrammetry and laser scanners for reverse engineering," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 87, pp. 216–227, 2016.

[10] L. Li, C. Li, Y. Tang, and Y. Du, "An integrated approach of reverse engineering aided remanufacturing process for worn components," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 48, no. November 2015, pp. 39–50, 2017.

[11] F. De Asís, C. Ordóñez, J. Roca-pardiñas, and S. García-cortés, "A statistical method for geometry inspection from point clouds," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 242, pp. 562–568, 2014.

[12] J. Xu, N. Xi, C. Zhang, Q. Shi, and J. Gregory, "Optics & Laser Technology Real-time 3D shape inspection system of automotive parts based on structured light pattern," *Opt. Laser Technol.*, vol. 43, no. 1, pp. 1–8, 2011.

[13] M. Xiang, S. Cheng, X. Yang, H. Peng, and X. Zhang, "A Design Methodology for Reverse Engineering Integrated with Anatomical CAD," *Applied Mechanics and Materials* vol. 248, pp. 79–84, 2013.

[14] F. Malapelle, D. Dall, D. Dalla, I. Dall, P. Fiorini, and R. Muradore, "Cost Effective Quality Assessment in Industrial Parts Manufacturing via Optical Acquisition," *Procedia Manuf.*, vol. 11, no. June, pp. 1207–1214, 2017.



# DISEÑO DE UN CONTROLADOR PD DE POSICIÓN PARA UN *BALL AND BEAM*

---

Design of a PD Position Controller for a Ball and Beam

Omar Nuñez Anguiano<sup>1</sup>, Bernardo Daniel Trujillo Ibarra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia:  
\*omar200396@live.com

## RESUMEN

El presente artículo expone la información con la cual se llevó a cabo el diseño de un controlador PD de un sistema lineal de primer orden denominado “*Ball and Beam*”. Se utilizaron *softwares* como Proteus para el diseño del circuito electrónico y la herramienta *sisotool* de MATLAB para realizar la sintonización del controlador mediante el método clásico del lugar geométrico de las raíces para estabilizar el sistema. Se utiliza un controlador en cascada de corriente para posición y un sensor láser para conocer la posición de la pelota en el eje. De igual forma, se muestran los códigos de programación y la forma en la cual se elabora la sintonización de ambos controladores.

**Palabras clave:** Sistemas lineales, lugar geométrico de las raíces, *ball and beam*.

## ABSTRACT

This paper contains the procedural information for the development of a first-order linear system PD controller called “*Ball and Beam*.” The software Proteus was used for the design of the electronic circuit, and MATLAB’s ‘*sisotool*’ to tune the controller using the classic method of the root locus to stabilize the system. A current cascade controller was used for positioning, and a laser sensor to know the position of the ball on the axis. Additionally, the programming codes are shown for the tuning of both controllers.

**Keywords:** Linear systems, roots locus, ball and beam.

## INTRODUCCIÓN

El sistema *ball and beam* pertenece a un conjunto de sistemas denominados “subactuados”, y es uno de los más populares sistemas de laboratorio para experimentar en el diseño de control, ya que permite simplificar la comprensión y tiene utilidad en el estu-

dio de técnicas de implementación clásicas y modernas de control [1], [2]. La regulación de un sistema inestable es muy importante para varios problemas de control, dado que tales sistemas resultan peligrosos al evaluar su posición vertical u horizontal y, a su vez, la estabilidad misma del sistema. Esto se puede estudiar únicamente en laboratorios por medio del modelado de sistemas [2], [3], [4]. Un sistema *Ball and Beam* es también llamado “balanceo de una pelota en una viga”.

Esto generalmente está vinculado a problemas reales de control, como la estabilidad horizontal de un avión durante el despegue y las turbulencias en el vuelo [5], [6]. El objetivo de estos sistemas consiste en controlar la posición de una pelota respecto a un punto de referencia inicial mediante el rechazo o disminución de las perturbaciones generadas por objetos externos al sistema [4]. Las señales de control se pueden derivar por medio de una retroalimentación que brinde la información acerca de la posición de la pelota, dichas señales van directamente a la corriente del motor CD y un par generado por los *drivers* y *encoders* que ayuda a determinar la posición angular del sistema [1], [6], [7], [8].

Este sistema ha sido estudiado y utilizado tanto en la búsqueda como en la evaluación de nuevos métodos para mejorar la estabilidad, obtener controladores de posición más efectivos y proponer nuevas formas de determinar la posición de un objeto. Además, no requiere un montaje complejo, se usan herramientas de evaluación y el control del sistema puede ser avanzado y aplicado a sistemas complejos.

## Planteamiento del problema

El problema recae en la condición de equilibrio de la pelota; dado que la masa de la pelota y la fricción entre la pelota y la barra son mínimas, se puede decir que prácticamente equivalen a cero. El fenómeno de control de posición se muestra en la figura 1.

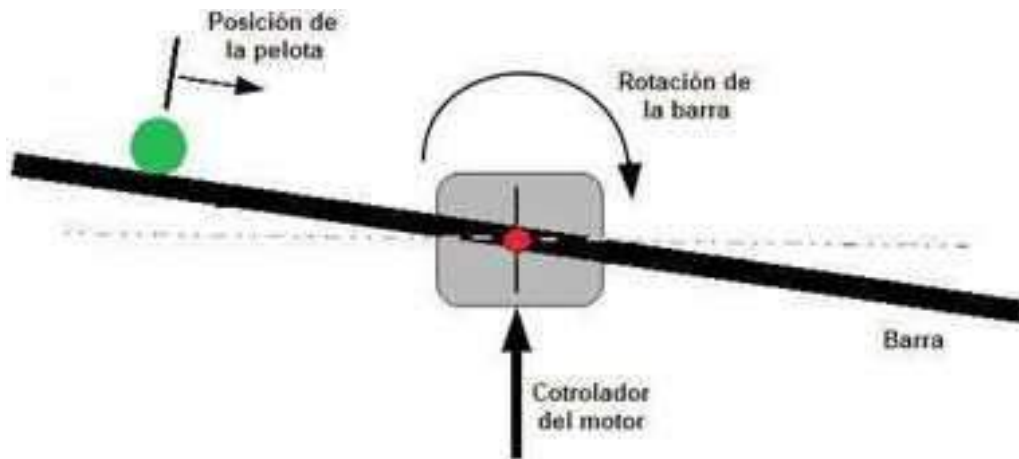


Figura 1. Diagrama de funcionamiento de un *Ball and Beam*.

## Objetivo general

Realizar el diseño y funcionamiento de un sistema "*Ball and Beam*" mediante un sensor de medición de distancia láser y la sintonización del sistema por medio de un controlador PD.

## Objetivos específicos

- Construir una estructura que cumpla las condiciones de espacio del sistema.
- Realizar la programación del Sensor de distancia láser VL53L0-X en el PIC-16F877A por medio de una comunicación  $i^2C$ .
- Satisfacer las necesidades de la planta con un controlador PD capaz de estabilizar y responder rápidamente ante cualquier perturbación.
- Realizar la sintonización del lazo maestro por medio del lugar geométrico de las raíces.

## Marco teórico

Equilibrar una bola en una viga es un problema de control clásico denominado *Ball and beam*, y tiene la característica de ser un sistema subactuado y no lineal; sin embargo, para este caso de trabajo se considera únicamente la parte lineal del sistema, con las consideraciones que se explican más adelante.

El *Ball and beam* consiste en el desplazamiento de una pelota en el interior de una viga con un carril que está sujeto al eje de un motor eléctrico que le permite girar sobre su eje. El objetivo es controlar la posición de la pelota cambiando el ángulo de la viga mediante el movimiento del motor; esto se realiza mediante un controlador que genera una señal eléctrica que regula el motor a través de su voltaje.

Las variables de control para llevar a cabo tal acción son el ángulo de la viga, dado por un *encoder* acoplado al eje del motor, y la posición de la bola, obtenida mediante un sensor situado generalmente en uno de los extremos de la viga. La estabilización de la pelota en un punto fijo —normalmente el centro— representa un desafío, ya que ésta se mueve sobre la viga con una aceleración proporcional a su ángulo de inclinación; además, el sistema es inestable en lazo abierto, pues la posición de la pelota se incrementa sin límites a partir de un determinado ángulo; no obstante, es posible desarrollar un sistema de control que lleve a cabo la tarea.

## Modelado matemático del sistema

Para diseñar y desarrollar con éxito un controlador que satisfaga las necesidades de un mecanismo, es conveniente disponer en la medida de lo posible de un modelo matemático que reproduzca fielmente el comportamiento

del sistema [4]. Un modelo matemático de un sistema dinámico se puede definir como el conjunto de ecuaciones, generalmente diferenciales, que representan la dinámica del sistema en cuestión con bastante precisión.

Este modelo matemático no será único, sino que, dependiendo del sistema del que se trate y de las circunstancias específicas, un modelo será más conveniente que otros [8], [9]. Además, en la obtención de un modelo matemático se debe establecer un equilibrio entre la simplicidad del mismo y la precisión de los resultados del análisis.

Este mecanismo cuenta con dos grados de libertad: uno es la posición de la pelota a lo largo de la barra horizontal, y el otro es el ángulo de la viga respecto a la horizontal, o dicho de otra manera, la posición del eje del motor. En función de estas variables se obtendrán las ecuaciones de movimiento del sistema [2], [10], [11]. Las magnitudes de fricción son independientes del área de contacto aparente entre las dos superficies, y son proporcionales a la magnitud  $N$  de la fuerza normal que ejerce una de las superficies sobre la otra. La constante de proporcionalidad que relaciona la fuerza de fricción con la fuerza normal es el coeficiente de fricción  $\mu$ ; esta constante adimensional depende del tipo de superficies que intervienen, así que se determina experimentalmente. Estas re-

laciones se expresan en ecuaciones del siguiente modo:

$$f_s \leq \mu_s N \quad f_{smax} \leq \mu_s N \quad f_c \leq \mu_c N \quad (1)$$

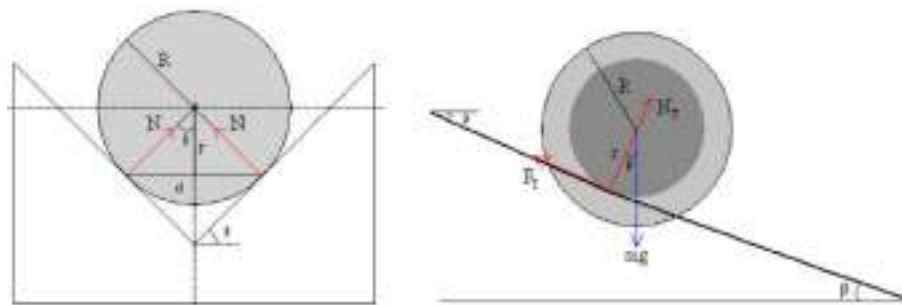
$$f_c < f_s \quad \leftrightarrow \quad \mu_c < \mu_s \quad (2)$$

El estudio de la fricción en el caso del mecanismo *Ball and beam* se complica cuando se pretende que la bola ruede sin deslizarse sobre el plano inclinado que forma la viga cuando ésta se inclina en cierto ángulo. De este estudio se obtiene el máximo ángulo en que se puede girar la viga para que la bola ruede y no se deslice en su movimiento por la barra.

A partir de la situación dada en la figura 2, en la que la esfera se encuentra apoyada en dos puntos del carril que forma la viga, se supone la existencia de rozamientos iguales en cada uno de esos puntos de apoyo. Según las relaciones geométricas dadas en la primera figura,  $r$  y  $d$  se pueden expresar en función del radio  $R$  de la esfera del siguiente modo:

$$r = R \cos \theta \quad \leftrightarrow \quad \frac{R}{r} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (3)$$

$$d = 2R \sin \theta \quad \leftrightarrow \quad d = 2\sqrt{R^2 - r^2} \quad (4)$$



**Figura 2.** Perfil de la viga con bola en relación a las fricciones ejercidas.

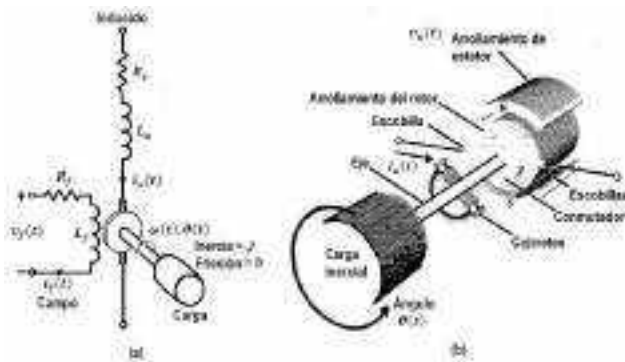


De igual forma, se definen las magnitudes  $F_T$  y  $N_T$  como las resultantes de las fuerzas de rozamiento y de las reacciones de la superficie de la viga sobre la esfera, respectivamente:

$$F_T = 2F_R \quad (5)$$

$$N_T = 2N \cos \theta \quad (6)$$

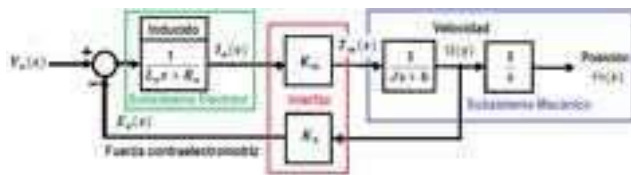
Para fines prácticos, solamente se contempla el ángulo de la viga, debido a que:



**Figura 3.** Diagrama esquemático de un motor con escobillas.

- a) Diagrama del circuito eléctrico.
- b) Diagrama del motor con escobillas.

En la figura 3 se puede apreciar la representación general de un motor con escobillas. Como se sabe, la representación de un motor con escobillas está dada por el siguiente lazo de control, donde se consideran la parte eléctrica y la mecánica.



**Figura 4.** Lazo de control de un motor con escobillas.

Tras la simplificación del diagrama de bloques, puede verse que la función de transferencia está determinada por (7).

$$\frac{\Theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{s[J s + b][L_a s + R_a] + K_b K_m} \quad (7)$$

La constante de tiempo eléctrica del inducido  $\tau = \frac{L_a}{R_a} \approx 0$ ; donde  $R_a \neq 0$  y  $L_a = 0$ , lo cual permite despreciarla, tal que:

$$\frac{\Theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{s[J R_a s + R_a b + K_b K_m]} \quad (8)$$

Simplificando (8):

$$\frac{\Theta(s)}{V_a(s)} = \frac{\frac{K_m}{J R_a}}{s \left[ s + \frac{R_a b + K_b K_m}{J R_a} \right]} \quad (9)$$

$$\frac{\Theta(s)}{V_a(s)} = \frac{C_k}{s[s + C_p]} \quad (10)$$

Donde  $C_k = \frac{K_m}{J R_a}$  es la ganancia de trayectoria, y  $C_p = \frac{R_a b + K_b K_m}{J R_a}$  es el inverso de la ganancia de tiempo mecánica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales utilizados en la construcción del sistema se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Materiales para la construcción del sistema.

MATERIALES	PIEZA
PIC16F877A	1
MAX232	1
DM74LS08	1
Motor Bühler C-4713-60112	1



Encoder HEDS-9100	1
MÓDULO PUENTE H L298N	1
SENSOR DE DISTANCIA LÁSER VL53L0-X	1
CRISTAL DE CUARZO DE 20 MHZ	1
CONVERTIDOR SERIAL DB9 RS232 A USB	3
OPTOACOPLADORES 4N28 / 4N27	4
RESISTENCIA 1 K	1
RESISTENCIA 4.7 K	2
RESISTENCIA 100 K	1
RESISTENCIA 300	3
CAPACITOR 15 F	2
CAPACITOR 27 F	5
CAPACITOR 1 F	1
MÓDULO PUENTE H L298N	1
SENSOR DE DISTANCIA LÁSER VL53L0-X	1
CRISTAL DE CUARZO DE 20 MHZ	1
CONVERTIDOR SERIAL DB9 RS232 A USB	1

También se requirió del uso de los siguientes softwares para llevar acabo la programación del PIC16F877A, el diseño de la PCBA del circuito electrónico y el código de la plataforma experimental:

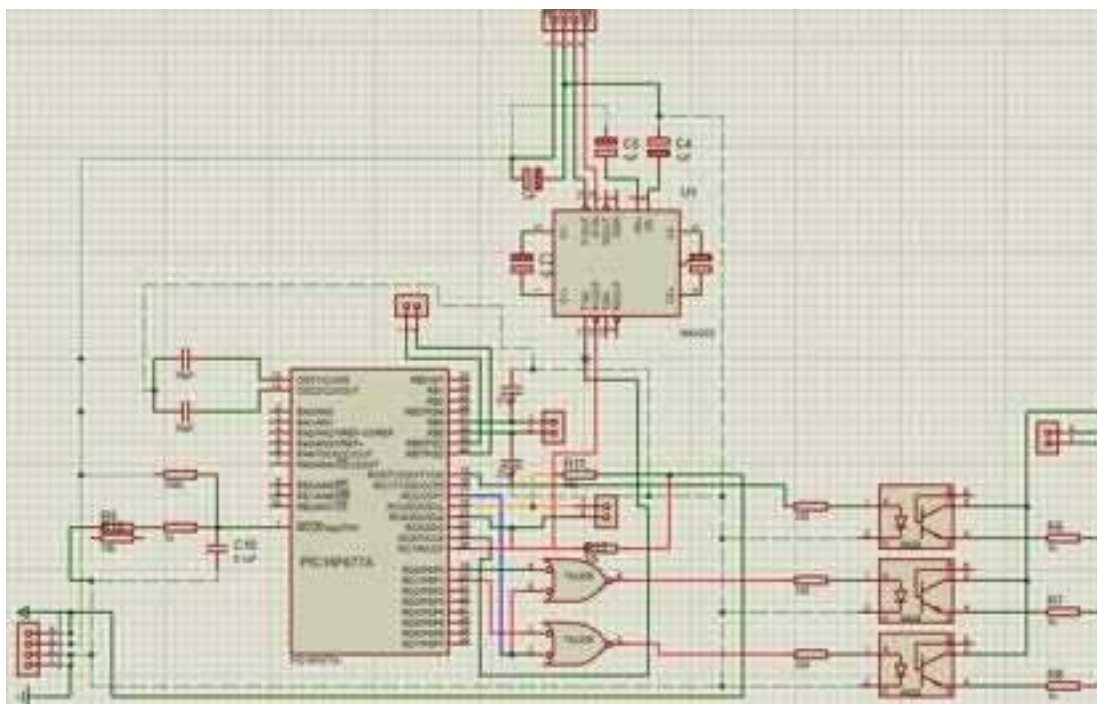
Dev C++, para controlar el sistema;

PIC C Compiler 5.5, para programar el microcontrolador PIC16F877A;

*Proteus Professional*, para el diseño del circuito electrónico que se muestra en las figuras más adelante.

La programación del PIC16F877A se realizó con el sensor de distancia láser VL53L0-X mediante el protocolo de comunicación i<sup>2</sup>C —cuya arquitectura permite tener una confirmación de los datos recibidos— por medio del puerto serial usando el componente MAX232 y el convertidor serial DB9 RS232 a USB.

Posteriormente se llevó a cabo el diseño de la PCBA para el montaje de los componentes electrónicos; a continuación se muestra el diseño del diagrama esquemático en la figura 5, elaborado en *Proteus Professional*, donde se exhiben las conexiones necesarias del circuito electrónico.



**Figura 5.** Diagrama Esquemático del circuito electrónico de la PCB.



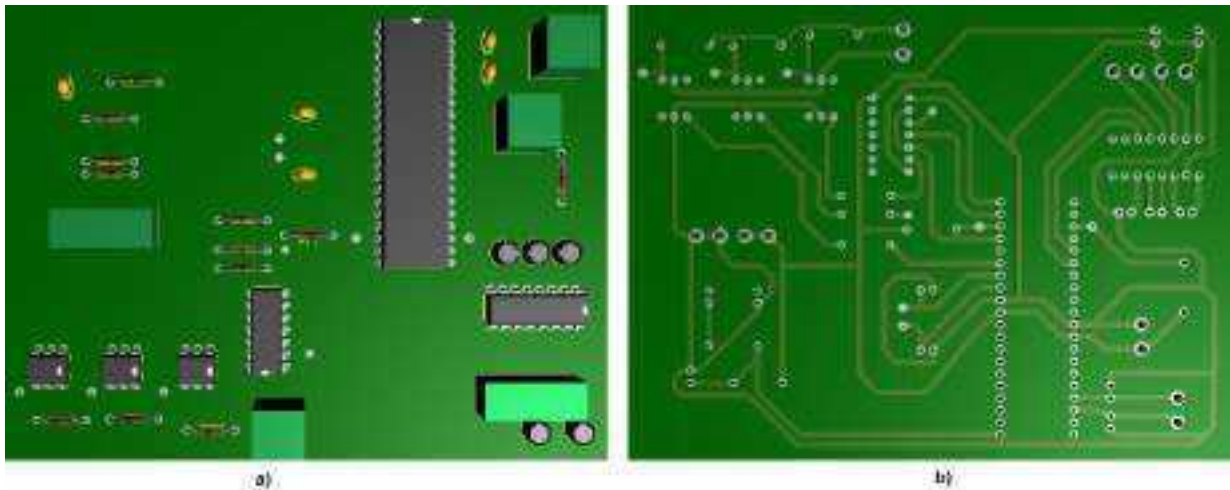
En la figura 6 se muestra el diseño de la PCB con las terminales requeridas para el circuito eléctrico que se empleó en el desarrollo del sistema y con el que se comprobó que no existieran cortocircuitos ni otros problemas con ninguno de los componentes.

La siguiente etapa fue la de sintonización e identificación de las constantes de la plataforma experimental, para ello se utilizó el lazo de control de la figura 7, que muestra la dinámica del servosistema, es decir, la planta del sistema. Se puede observar claramente la propuesta de un controlador PD en casca-

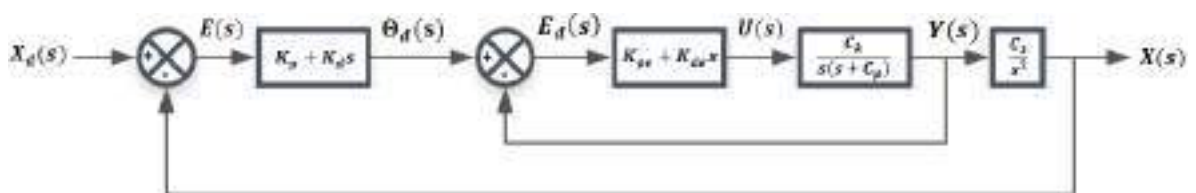
da, tal que existe un lazo maestro y un lazo esclavo de control.

Para obtener las ganancias de la planta,  $C_k$  y  $C_p$ , se debe realizar una prueba experimental con la viga. Se contempló que la pelota comienza a moverse sobre la viga a una inclinación  $\theta = 5^\circ$ . Se propuso un controlador proporcional de ganancias  $K_p=30$  y un valor final  $V_f=\pi$ , donde  $V_f$  es el máximo valor de inclinación que puede tener la viga para que el sistema se pueda considerar inestable.

En la figura 8 se observa la gráfica que indica el valor pico  $V_f = 0.157$ .



**Figura 6.** Circuito PCBA.  
a) Parte frontal; b) Parte trasera.



**Figura 7.** Lazo de control del servosistema.



**Figura 8.** Gráfica del valor pico  $V_p$ .

En la figura 9 de igual manera se observa el tiempo de subida. Con estos datos anteriores se calcularon los valores de las constantes y del lazo esclavo de control.

Los valores de  $C_k$  y  $C_p$  se encontraron mediante la relación de (11) entre sistemas de segundo orden de lazo cerrado, que es la función de transferencia del lazo esclavo.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C_k(K_{ps} + K_p)}{s^2 + (C_p + C_k K_{de})s + C_k K_m} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (11)$$

De la ecuación (11) se obtuvieron las expresiones (14) y (15), donde se calculan los valores de  $\zeta$  con la ecuación (12), y  $\omega_n^2$  con la ecuación (13).

$$\zeta = \frac{\left( \ln \left( \frac{V_p - V_f}{V_f} \right) 100 \right)^2}{\pi^2 + \left( \ln \left( \frac{V_p - V_f}{V_f} \right) 100 \right)^2} \quad (12)$$

$$\omega_n = \frac{\pi - \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right)}{t_r \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (13)$$

$$C_k = \frac{\omega_n^2}{K_{pe}} \quad (14)$$

$$C_p = 2\zeta\omega_n \quad (15)$$

Los valores obtenidos fueron  $C_k = 4.67079$  y  $C_p = 4.16985$ . Posteriormente se sustituyeron los valores en el lazo esclavo de control de la figura 7, con lo cual fue posible calcular las ganancias  $K_{pe}$  y  $K_{de}$  del controlador a partir de las ecuaciones anteriores, sólo que entonces se utilizó un tiempo de subida  $t_r = 0.1$  y un sobrepaso máximo  $M_p = 30\%$ , para que el sistema cumpliera ciertas condiciones de control. Con lo cual se volvieron a calcular  $\zeta$  y  $\omega_n$ , para después calcular las ganancias proporcional y derivativa del controlador esclavo con las ecuaciones (16) y (17).

$$K_{pe} = \frac{\omega_n^2}{C_k} \quad (16)$$

$$K_{de} = \frac{2\zeta\omega_n - C_p}{C_k} \quad (17)$$

De donde se obtuvo como resultado  $K_{pe} = 76.394$  y  $K_{de} = 0.8183$ . Se realiza una prueba con los valores obtenidos y posteriormente se realizan ajustes técnicos para precisar los valores del sistema, debido a que las constantes del sistema ( $C_k$  y  $V_p$ ) son valores empíricos.

Esto permite mejorar la estabilidad, respuesta y amortiguamiento del sistema. Finalmente, las ganancias fueron  $K_{pe} = 77$  y  $K_{de} = 2$ , tales valores permitieron obtener un tiempo de subida  $t_r = 0.9564$  y un sobrepaso  $M_p = 26\%$ .

Estos resultados se muestran en la gráfica de la figura 10.

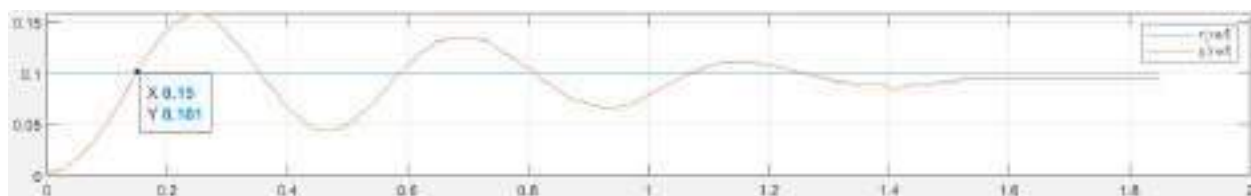


Figura 9. Gráfica del valor pico  $V_p$ .



Dado lo anterior, se simplifica el lazo esclavo del servosistema que se muestra en la figura 7, lo que resulta en el lazo de control maestro del sistema, tal como se aprecia en la figura 11.

Como se puede observar, en el lazo de control del sistema existe una constante desconocida, ésta es una constante de crecimiento que se calcula por medio de una parábola de la forma que se muestra en la ecuación (18), y se debe al incremento de la distancia entre el punto inicial, el punto medio o de equilibrio del sistema, y el punto máximo de distancia. Esta constante representa el crecimiento del ángulo ideal de la distancia respecto al punto inicial

$$y(t) = \frac{C_3 t^2}{2} \quad (18)$$

Tomando en cuenta que en el *Ball and beam* se mide la distancia con la ayuda del sensor de distancia láser, se debe tener un factor constante de crecimiento que gobierne las mediciones del sensor para que pueda afectar a la parábola.

Esta constante experimental se obtiene poniendo el eje horizontal sobre el cual la pelota debe ir colocada, con un ángulo de inclinación  $\theta = 5^\circ$ . Para ello el sensor debe realizar la medición de la distancia conforme la pelota se desliza sobre el riel hasta llegar a la distancia máxima (la figura 12 explica cómo realizar este procedimiento). Este paso se debe realizar cuidadosamente, ya que es una de las constantes más importantes del sistema. Finalmente, se obtuvo la siguiente aproximación que se muestra en la figura 13, donde  $C_3 = 2800$ .

A partir de las constantes del bloque del lado izquierdo —las constantes de la planta y del lazo esclavo— se propuso una modi-

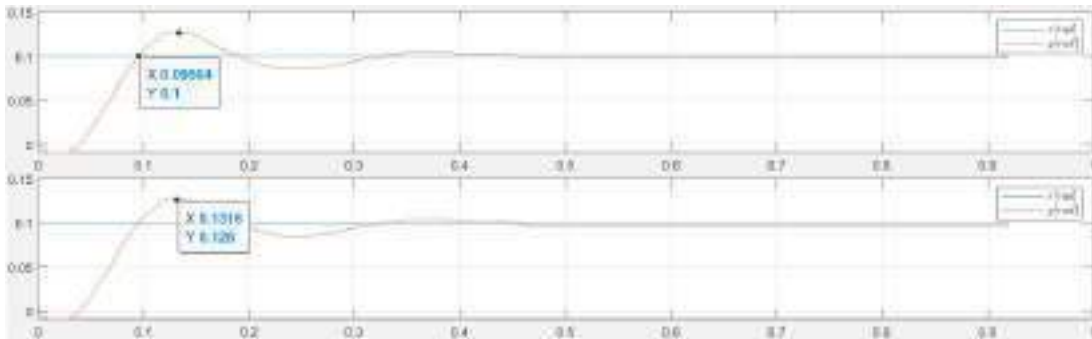


Figura 10. Gráfica de respuesta del lazo esclavo sistema.

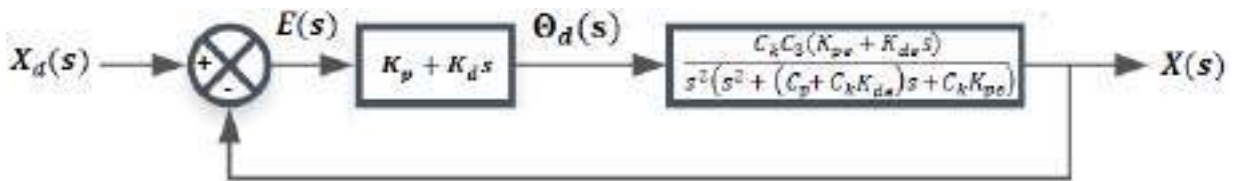


Figura 11. Lazo de control Maestro.

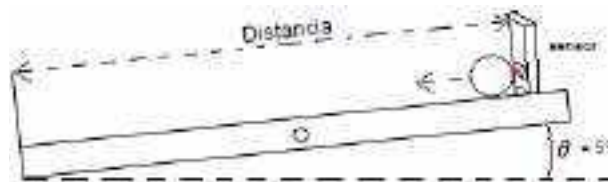
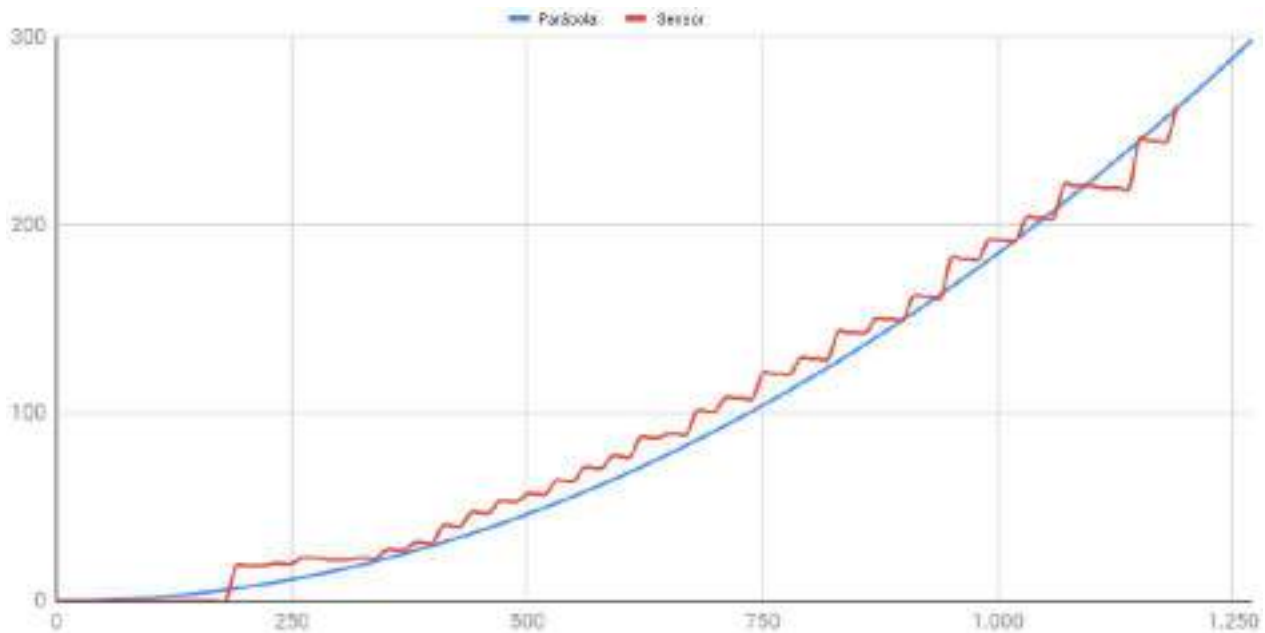


Figura 12. Colocación de la barra para calcular  $C_3$ .



**Figura 13.** Comparación de una parábola y la función de crecimiento constante de  $C_3$ .

ficación en el controlador del lazo maestro, donde se factoriza la ganancia derivativa  $K_d$ ; el lazo de control resulta como se muestra en

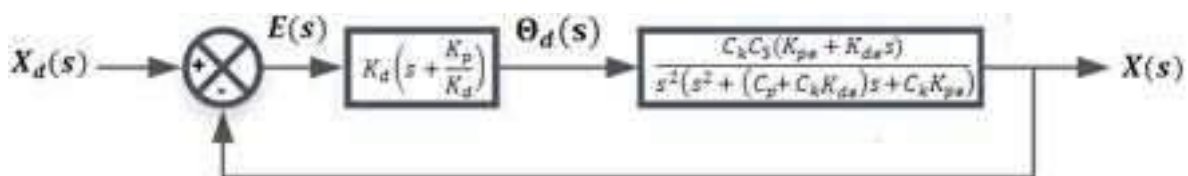
la figura 14, con lo cual  $K_d \left( s + \frac{K_p}{K_d} \right)$  agrega un cero y una constante al sistema.

Aplicando el método de lugar geométrico de las raíces a la función de transferencia  $G(s)$  del sistema, con la función de transferencia de la ecuación (19), se encuentra una ganancia  $K_p=0.001$  y  $K_d=0.001$ .

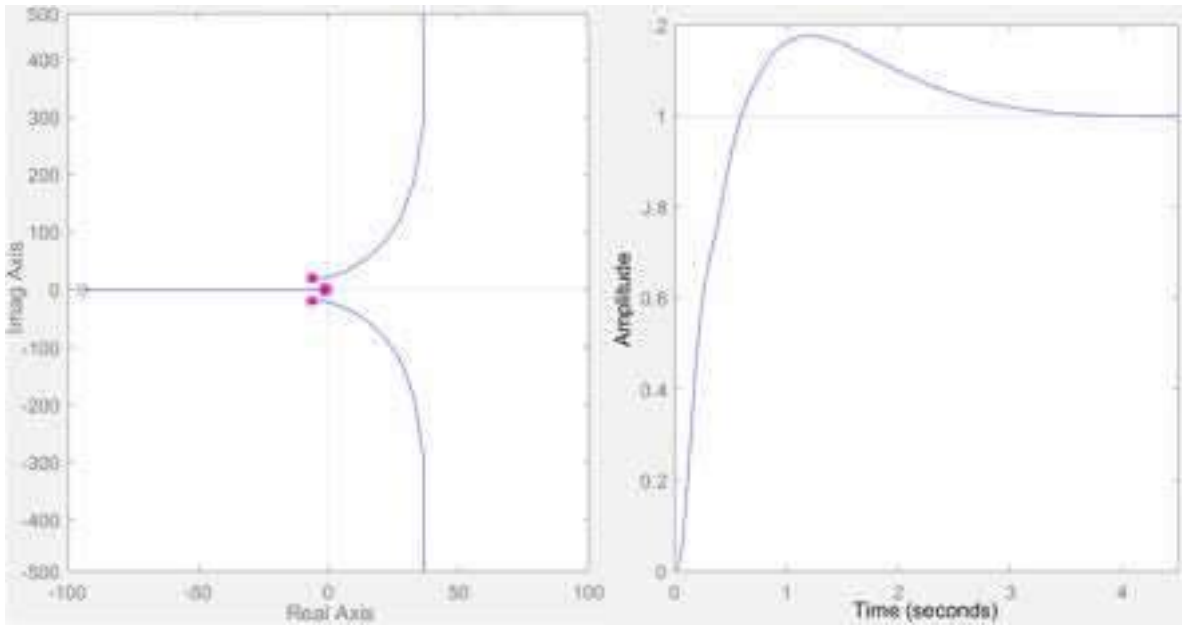
Cabe mencionar que el cero del sistema es  $S = -K_p / K_d$ , localizado en la parte real del semiplano izquierdo, con lo que se garantiza que el sistema sea completamente estable, debido a que los polos y ceros de lazo cerrado del sistema de igual forma se encuentran en el lado izquierdo del semiplano. Con estas ganancias del controlador del lazo maestro se obtiene el siguiente lugar geométrico y respuesta del sistema, mostrados en la figura 15.

Asimismo, se realizó la experimentación para probar las ganancias obtenidas, y se obtuvieron las siguientes respuestas.

$$G(s) = \frac{K_d \left( s + \frac{K_p}{K_d} \right) C_k C_2 (K_{de} s + K_{pe})}{s^2 (s^2 + (C_p + C_k K_{de}) s + C_k K_{pe})} \quad (19)$$



**Figura 14.** Lazo maestro de control del sistema.

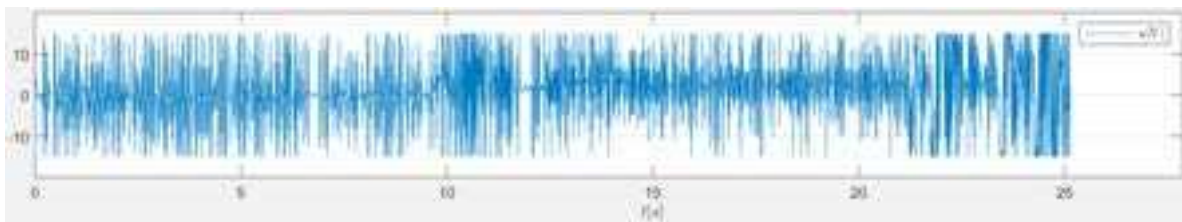


**Figura 15.** Localización del cero del controlador de lazo maestro y respuesta del sistema.

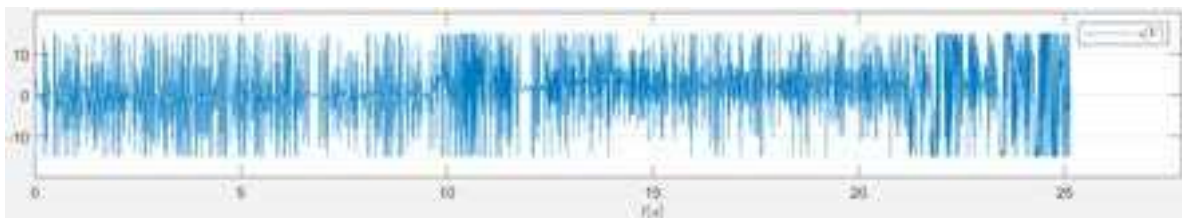
En la figura 16 puede observarse claramente que la señal de salida del sistema contiene bastante ruido; realizando análisis constante, se llegó a la conclusión de que el sensor contiene ruido blanco debido al incremento de la ganancia de  $K_d$ . Ésta es una de las desventajas de utilizar un control con ganancia derivativa: entre mayor sea la ganancia de-

derivativa, mayores son el ruido e inestabilidad que se introduce al sistema.

Por tal motivo las ganancias se ajustaron de forma empírica hasta obtener una respuesta con menos ruido por parte del sistema. Los valores de las ganancias con los cuales se realizó la sintonización del sistema fueron  $K_p=0.001$  y  $K_d=0.00001$ .



**Figura 16.** Respuesta del sistema con control en cascada, mediante el método del lugar geométrico de las raíces.



**Figura 17.** Respuesta final del sistema, ganancias ajustadas de forma empírica.

## RESULTADOS

Finalmente, se obtuvo una correcta sintonización del sistema y se concretaron los objetivos propuestos al comienzo de la elaboración del proyecto. Fue posible elaborar una estructura experimental que cumpliera las características del problema; de igual manera, se concretó la programación y el funcionamiento del sensor de distancia láser VL53L0-X por medio de comunicación  $i^2C$  en el PIC16F877A.

Otro objetivo que resultó satisfactorio fue la sintonización del lazo en cascada que se tiene en el sistema, tanto en la programación como en el funcionamiento físico del sistema. Por último, se muestra una imagen con el proyecto terminado en la figura 18.

## CONCLUSIONES

Tomar en cuenta el ángulo del motor como la variable a regular proporciona grandes ventajas al momento de realizar el control, y además permite disminuir los problemas en la práctica. En este contexto, el proyecto *Ball and beam* permite a los estudiantes desarro-

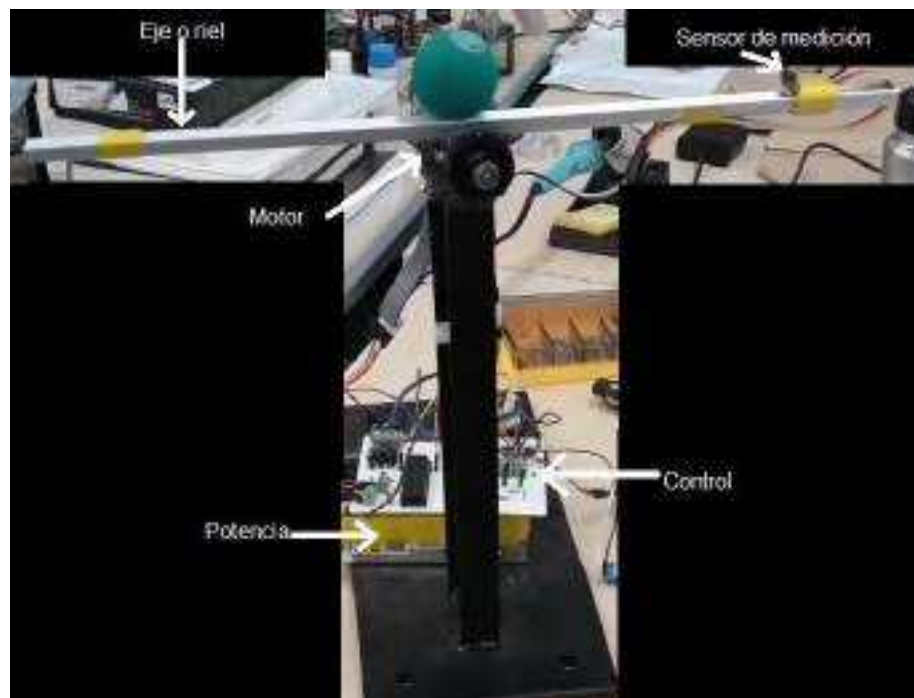
llar sus conocimientos en el área de control mediante la sintonización de un controlador para un sistema lineal.

De esta forma, se cree que los puntos clave para llevar a cabo este proyecto son:

- La programación del PIC y el sensor de medición.
- Un manejo esencial de la instrumentación y la electrónica.
- Comprensión de los conceptos básicos de control y las características de las ganancias de un controlador PID.
- La comprensión del método del lugar geométrico de las raíces.

El análisis matemático de sistemas lineales, a diferencia de los modelos no lineales, facilita el aprendizaje sin la necesidad de un amplio conocimiento en el área; a su vez, esto posibilita decir que el sistema es estable, con el simple hecho de saber que los polos y ceros del sistema se encuentran en la parte real negativa del semiplano izquierdo.

El lazo de control esclavo del control en cascada que se utiliza es relativamente sencillo de sintonizar, ya que las pruebas ex-



**Figura 18.** Sistema *Ball and beam*, plataforma experimental.



perimentales permiten esta sencillez. Caso contrario al lazo de control maestro, que requiere comprender de forma precisa nociones de control más avanzadas, como las características de las ganancias y las consecuencias que cada una ocasiona al sistema, pues éste es el último controlador, y por ello el más importante, debido a que será el encargado de eliminar el error restante conforme al ángulo deseado.

Dentro de los puntos considerados de más relevancia para continuar el estudio de este tipo de sistemas, se encuentra la naturaleza de los mismos. Estos sistemas pertenecen a un amplio conjunto de sistemas llamados subactuados, los cuales son parte importante en el área de control ya que siempre cuentan con características como no linealidad, y menor cantidad de actuadores que las variables existentes en el sistema.

Al cumplir con estos puntos, se logra obtener los resultados deseados. La elaboración del proyecto *Ball and Beam* contribuye de manera importante en el aprendizaje personal y académico de los alumnos, ya que resalta los puntos más importantes en el área de control automático de forma práctica.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] W. Bolton, *Ingeniería de control*, Segunda ed., México, D. F.: Alfaomega, 2001.

[2] A. J. Carrillo-Paz, *Sistemas automáticos de control: Fundamentos básicos de análisis y modelado*, Segunda ed., UNERMB, 2011.

[3] R. Canales-Ruiz y R. Barrera-Rivera, *Análisis de sistemas dinámicos y control automático*, México: Limusa, 1976.

[4] I. Fantoni y R. Lozano, *Non-linear control for underactuated mechanical systems.*, E. D. Sontag y M. Thoma, Edits., France: Springer Science & Business Media, 2001.

[5] B. C. Kuo, *Automatic control systems*, Séptima ed., México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1996.

[6] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Tercera ed., Naucalpan de Juárez, Estado de

México: Prentice-Hall Hispanoamericana S: A., 1998.

[7] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Quinta ed., Madrid: Pearson Educación, 2010, p. 904.

[8] V. M. Hernández-Guzmán, R. Silva-Ortigoza y R. V. Carrillo-Serrano, *Control automático: Teoría de diseño, construcción de prototipos, modelado, identificación y pruebas experimentales*, Primera ed., México, D. F.: Colección CIDETEC del Instituto Politécnico Nacional, 2013.

[9] V. M. Hernández-Guzmán y R. Silva-Ortigoza, *Automatic control with experiments*, Switzerland: Springer International Publishing, 2019.

[10] G. C. Goodwin, S. F. Graebe y M. E. Salgado, *Control system design*, Primera ed., Valparaíso,: Prentice Hall, 2000.

[11] J. M. Ramos-Arreguín, J. E. Vargas-Soto y E. Gorrostieta-Hurtado, *Robótica y mecatrónica*, Primera ed., Querétaro, Querétaro: Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2018.





# REVISIÓN DE LA CARACTERIZACIÓN DE FALLAS EN MAQUINARIA ROTATIVA MEDIANTE GRÁFICOS DE RECURRENCIA

---

Rotating Machinery Fault Characterization by Recurrence Plot: A review

Ignacio Torres Contreras<sup>1\*</sup>, Juan Carlos Jáuregui Correa<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia  
\*itorres02@alumnos.uaq.mx  
\*igtoc4@gmail.com

## RESUMEN

El comportamiento dinámico de una máquina rotativa es el reflejo de su diseño, condiciones de operación, tipo de aplicación y condición operativa de sus componentes. Mediante los análisis de vibraciones se diagnostica el estado operativo de las máquinas y se predicen las fallas con anticipación; sin embargo, los métodos tradicionales para el diagnóstico de fallas en maquinaria tratan a todos los fenómenos dinámicos como regímenes estacionarios y lineales, pero la globalización y los avances tecnológicos demandan mejores métodos de diagnóstico de la condición en pos de disminuir los costos de mantenimiento e incrementar la vida útil de la maquinaria. En la presente revisión bibliográfica sobre el método de Gráficos de Recurrencia o *Recurrence Plot* (RP, por sus siglas en inglés), aplicado al diagnóstico de fallas en máquinas rotativas, se muestra que proporciona mayor información de los fenómenos dinámicos al considerar las no-linealidades y los regímenes no-estacionarios, en contraste con los métodos convencionales utilizados, donde tales parámetros no se toman en cuenta.

**Palabras clave:** Diagnóstico de falla, vibraciones mecánicas, Gráficos de Recurrencia, mantenimiento, predictivo, sistemas dinámicos no lineales.

## ABSTRACT

The dynamic behavior of a rotating machine is a reflection of its design, operating conditions, type of application, and operational condition of its components. Through vibrations analysis, the machinery condition is diagnosed, and failures are predicted in advance; however, traditional methods for diagnosing machinery failure treat all dynamic phenomena as stationary and linear regimes, but worldwide standardization and technological advances demand better diagnosing methods to reduce maintenance costs and increase the useful life of machinery. This pa-

per shows that Recurrence Plot is a better method for measurement and fault diagnosis in rotary machinery because nonlinearities and non-stationary regimes are included in the vibration analysis, thus diagnosis and quantification faults can be more precise.

**Keywords:** Fault diagnosis, mechanical vibration, Recurrence Plot, Metrology, predictive maintenance, nonlinear dynamic systems.

## INTRODUCCIÓN

Las fallas mecánicas en maquinaria son una condición debida al uso de los componentes y su origen es el desgaste provocado por la transmisión de cargas dinámicas y deficiencias en la lubricación, y por la fatiga de los materiales debidas a la propia aplicación o del trabajo realizado. El diagnóstico del tipo de falla y la determinación de la severidad es una actividad fundamental para la toma de decisiones en el mantenimiento predictivo [1].

La industria ha implementado diversas estrategias de mantenimiento a lo largo de la historia, de las cuales destaca el mantenimiento predictivo (o PdM, *Predictive Maintenance* por sus siglas en inglés), basado en el monitoreo de vibraciones para el control de la condición y sus acciones correctivas a través de un plan de mantenimiento programado [2], [3]. Gracias al PdM se ha logrado incrementar la confiabilidad de la maquinaria y reducir los costos de mantenimiento, las afectaciones económicas, laborales, de seguridad y del medio ambiente provocados por las fallas no controladas o catastróficas.

Las maquinarias rotativas transforman la energía de entrada proporcionada por un motor eléctrico, turbina o de combustión interna en energía mecánica a través de la rotación de sus componentes, o viceversa [4]; la rotación y la interacción entre las partes en movimiento causa vibración, ruido y calor. Todas las máquinas rotativas tienen un comportamiento dinámico característico debido al tipo de componente rotativo, diseño, manufactura y aplicación, y los daños acumulados de los



componentes de la maquinaria incrementan los niveles de vibración, el ruido y la temperatura [5]. Ejemplos de maquinaria rotativa son los motores eléctricos, motores de combustión, turbinas de gas, turbinas de vapor, turbinas eólicas, bombas, compresores, sopladores, generadores, cajas de engranes, etc.

Un sistema dinámico no lineal estudia los procesos o fenómenos en el tiempo y describe su comportamiento dinámico mediante sus sistemas de ecuaciones correspondientes, ya sean algebraicas o diferenciales no lineales [6], [4]. De acuerdo con su comportamiento físico, la relación entre los cambios en las entradas y el comportamiento resultante de las salidas en un sistema no son proporcionales [7]: los fenómenos dinámicos reales en la maquinaria son inherentemente no lineales [8].

Los gráficos de recurrencia, o *Recurrence Plots* (RP por sus siglas en inglés), son una metodología alternativa más para analizar las recurrencias a partir de datos experimentales en las series de tiempo que tiene la capacidad de identificar el comportamiento no lineal en los sistemas dinámicos [9,10]. La gran capacidad de RP para identificar las no linealidades abre las puertas a nuevas posibilidades en el diagnóstico y predicción de fallas de las máquinas rotativas para incrementar la confiabilidad.

RP representa una metodología para realizar análisis de tipo dinámico no-lineales presentada por [9], que retoma el concepto del teorema de recurrencia anteriormente propuesto por Poincaré en 1890. Los RPs proporcionan una visualización de los estados de recurrencia por medio del gráfico de un vector de su fase en el espacio.

Dicha metodología permite la observación de las recurrencias de la trayectoria de la fase en el espacio a través de un gráfico en dos dimensiones; además, tiene la capacidad de analizar sistemas mecánicos quasi-estáticos, no-estáticos y eventos transitorios.

El método RP ha demostrado su potencial en

muchos campos de la ciencia, tales como la medicina, física, química, biología, ingeniería, ciencias de la tierra, finanzas, economía, etc. [10]. Gracias al desarrollo de los nuevos sistemas de cómputo, los tiempos de manejo y procesamiento de datos se han reducido significativamente, con lo cual se abren nuevas oportunidades para la aplicación de estas metodologías [11].

En el periodo de los últimos 7 años, han aparecido análisis de recurrencia cuantitativos tales como el porcentaje de recurrencia, los porcentajes determinísticos, la longitud de línea y de divergencia máxima, la entropía de la distribución de la longitud de líneas y las tendencias [12].

En la actualidad, el desarrollo y aplicación de técnicas de diagnóstico y predicción de fallas para condiciones de operación de características no-lineales y no-estacionarias son un reto y apenas comienzan a explorarse.

Las técnicas tradicionales utilizadas para el diagnóstico y predicción de fallas normalmente son para casos lineales y estacionarios, por lo cual generan resultados con mucha incertidumbre [13]. A pesar de la eficacia de RP, no se usa industrialmente en el mantenimiento predictivo de maquinaria rotativa [14], [15].

Hoy en día, el deber de la industria es mejorar constantemente para hacer frente a las demandas cada vez más exigentes del mercado global contemporáneo. Es necesario mencionar que las metodologías basadas en el PdM utilizadas para el diagnóstico de maquinaria rotativa son una herramienta muy importante debido a que generan ahorros significativos en gastos de mantenimiento, incrementan la vida útil de la maquinaria y la seguridad del personal, y protegen el medio ambiente [16]. Existen varios métodos para el análisis y predicción de fallas en maquinaria basados en vibraciones; sin embargo, hay muy pocas metodologías que consideran las no linealidades de los sistemas mecánicos, y las que lo hacen apenas están en desarrollo.

## ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS

### El Mantenimiento predictivo

El mantenimiento de las máquinas rotativas es una necesidad primordial para su confiabilidad. El PdM utiliza la información del monitoreo de la condición (CM por sus siglas en inglés, *Condition Monitoring*) con la finalidad optimizar la disponibilidad y la confiabilidad de las máquinas a través de la toma de acciones antes de que ocurra la falla [17], [18], [19]. Mediante el PdM es posible detectar fallas desde etapas tempranas con el objetivo de reducir los paros no programados y los costos de operación, facilitar la respuesta proactiva y mejorar la productividad, la confiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad, la seguridad del equipo, del personal y del medio ambiente [20]. Dependiendo del tipo de industria, los costos de mantenimiento pueden llegar a representar del 15 al 60% de los costos de la producción [21], [22]; con el PdM se pueden reducir los costos de mantenimiento en un 30%, los paros no programados en un 75% e incrementar la producción en un 25% [23].

El crecimiento que se pronostica en las inversiones de tecnología del PdM para el periodo de 2016 a 2022 llega a la cifra de US\$ 10.96 billones, con una tasa compuesta de crecimiento anual (CAGR por sus siglas en inglés, *Compound Annual Growth Rate*) de 39%. Esta estadística está basada en información obtenida de las 13 empresas

más representativas en PdM y considera las 7 tecnologías más destacadas en este campo [24] (ver Figura 1). En la misma gráfica puede observarse un crecimiento constante; esto habla de la importancia que posee el PdM en nuestros días y en el futuro inmediato a nivel internacional.

Algunas estadísticas que muestran la ocurrencia de falla en los engranes indican que el 80% de las fallas de una transmisión mecánica en maquinaria ocurren en la caja de engranes, de las cuales el 60% son debidas a los engranes; por otra parte, las fallas más recurrentes en una embarcación están en el sistema de propulsión [1].

Con el crecimiento de las energías renovables han aumentado los parques eólicos y, con ello, se han incrementado los costos en la operación y mantenimiento debido al aumento en la tasa de fallas. Por ejemplo, algunos reportes revelan que el 12% de las fallas en un aerogenerador corresponden a la caja de engranes; esta situación demuestra la necesidad de mejorar las técnicas y sistemas de monitoreo y diagnóstico de fallas. Los algoritmos avanzados para el procesamiento de las señales utilizados son: *kurtosis* espectral, *wavelets*, resonancia estocástica, representación *sparse*, distribución de *Wigner-Ville* y *Dynamic time warping*, por mencionar algunos [25]. Los métodos tradicionales en análisis de vibraciones son las transformadas de Fourier, la distribución de *Wigner-Ville*, las *wavelets*, *empirical mode decomposition* y vector soporte de máquina [26]. Una clasi-

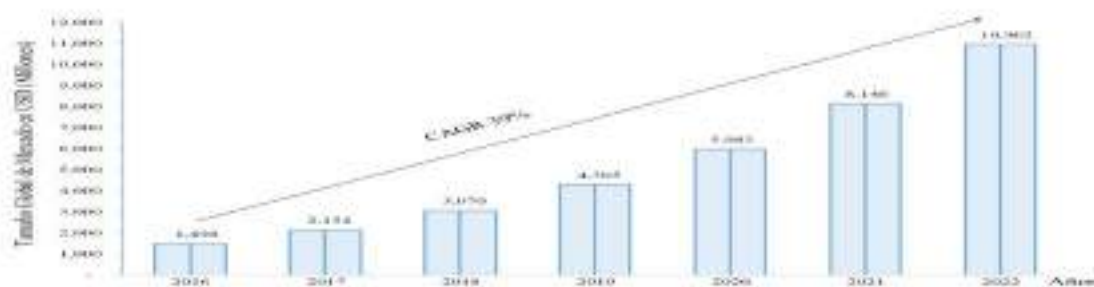


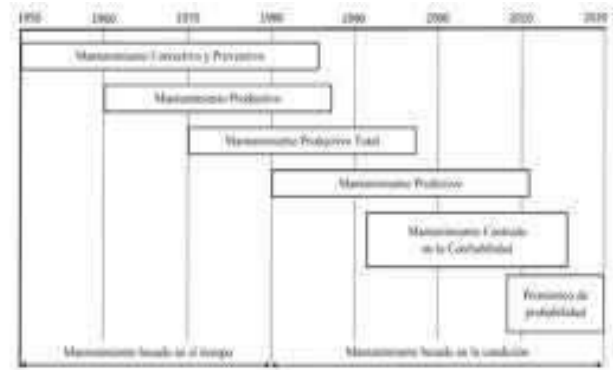
Figura 1. Desarrollo del mercado del Mantenimiento Predictivo [24].



ficación de las principales técnicas utilizadas en turbinas de viento se muestra en la Tabla 1, y la Tabla 2 exhibe las metodologías en las que más se trabaja [27]. Ambas clasificaciones están en función del número de artículos publicados al respecto.

El mantenimiento de maquinaria es el conjunto de acciones destinadas a mantener un componente, equipo o sistema en un estado en el cual sus funciones pueden ser cumplidas [20]. El mantenimiento tiene sus orígenes en los años 50, y se caracterizaba por la aplicación del criterio de reparar después de que ocurre la falla. En los 60 apareció el concepto de prevención como una forma de economizar los gastos; la combinación de estos dos tipos de mantenimiento redujo significativamente los costos. En 1980 surgió el concepto de mantenimiento predictivo PdM en la fuerza aérea norteamericana. Esta nueva estrategia de mantenimiento marcó un parteaguas dentro de este campo

y hizo pasar del mantenimiento basado en el tiempo al mantenimiento basado en la condición. El mantenimiento centrado en la confiabilidad apareció a partir de 1990 [28]. La tendencia del mantenimiento va en la dirección del pronóstico de la probabilidad de falla y de la estimación de la vida útil de la maquinaria. La Figura 2 resume la historia del mantenimiento y la tendencia para el futuro inmediato [29].



**Figura 2.** Evolución de los tipos de mantenimiento [29].

**Tabla 1.** Categorías del diagnóstico y predicción de fallas en Aerogeneradores desde 1988 [27].

Posición	Categoría	No. de artículos	Porcentaje (%)
1	Procesamiento de señales	285	45.67
2	Aprendizaje de máquina	177	28.37
3	Basado en modelos	113	18.11
4	Otros	49	7.85

**Tabla 2.** Metodologías de diagnóstico de fallas usadas en Aerogeneradores desde 1988 [27].

Posición	Categoría	No. de artículos	Porcentaje (%)
1	Redes neuronales	60	33.9
2	Sistemas de Fuzzy	39	22.03
3	Análisis de datos por SCADA	24	13.56
4	Vector Soporte de máquina	18	10.7
5	Métodos híbridos	14	7.91
6	Redes de Bayesian	6	3.39
7	Algoritmos Clustering	5	2.82
8	Fisión de información	3	1.69
9	Otros	8	4.52

En la revisión sobre el monitoreo de la condición de maquinaria basado en el análisis de vibraciones, se encuentra que la tendencia es hacia la automatización de los procesos de diagnóstico de falla mediante la combinación de varias técnicas de análisis [30].

[21] clasifica el mantenimiento en tres tipos generales: mejoramiento, predicción y corrección, como puede observarse en la Figura 3. Dentro de esta clasificación destaca el al mantenimiento predictivo, el cual se caracteriza por realizar las reparaciones de manera planificada, tomando en cuenta los análisis y la tendencia de las máquinas; las vibraciones son la principal herramienta de diagnóstico para la predicción de la falla.

### Técnicas para el diagnóstico de falla en maquinaria

Las metodologías para el análisis de fallas en máquinas rotativas han tenido sus orígenes en la detección de fallas en engranes y rodamientos, y pueden clasificarse en tres categorías: análisis estadísticos, análisis con modelos filtrados y análisis en el dominio del tiempo y/o la frecuencia. La Tabla 3 resume las principales técnicas de acuerdo con el tipo de metodología [1]. En dicha tabla puede observarse que los gráficos de recurrencia no figuran en las metodologías utilizadas para el diagnóstico de fallas.



Figura 3. Estructura del mantenimiento [21].

Tabla 3. Metodologías usadas para el diagnóstico de fallas mecánicas [1].

Metodología	Categoría	Técnicas
Análisis estadístico	Prueba de hipótesis	Kolmogorov-Smirnov test, Satterhwaite's t'-test, Wilcoxon rank-sum test
	Índice estadístico	Kurtosis, Euclidean distance, Mahalanobis distance, Kullback-Leibler distance, Bayesian distance
	Aprendizaje estadístico	Principal component análisis (PCA), Fisher discriminant análisis (FDA), partial least squares (PLS), multidimensional scaling (MDS), Isomap, Laplacian eigenmaps (LE), locality preserving projections (LPP), neighborhood preserving embedding (NPE), maximum variance unfolding (MVU), common vector approach (CVA), diffusion maps (DM)
	Modelado estadístico	Time series model, Dempster-Shafer evidence theory, hidden Markov model (HMM), proportional hazards model (PHM), proportional covariate model (PCM)



Modelos con filtros		<i>Wavelet filter, Kalman Filter, particle filtering (PF), latent component-based filter, morphological filter, Schur filter, independent component analysis (ICA) filter</i>
Análisis en el dominio del tiempo y/o la frecuencia	Tiempo o Frecuencia	<i>Fast Fourier transform (FFT), Discrete Fourier transform (DFT), time synchronous averaging (TSA), order tracking, resonance demodulation, envelope spectrum analysis, spectral kurtosis</i>
	Tiempo-frecuencia	<i>Wavelet transform, Short-time Fourier transform (STFT), empirical mode decomposition (EMD), Wigner-Ville distribution (WVD), Teager energy spectrum</i>

[31] provee una revisión general sobre 53 diferentes técnicas complejas para datos en función del tiempo o series de tiempo, de las cuales se mencionan algunas: entropía, análisis de fluctuaciones, entropía de *fuzzy*, gráficos de recurrencia, análisis de cuantificación de recurrencia, entropía espectral, entropía *wavelet*, transformada *wavelet*, exponente de *Lyapunov*, entropía de *Kolmogorov*, gráfico de fase, diagramas de Poincare, caos determinístico y análisis fractales, por mencionar algunos. La tabla 4 da una comparación y correlación entre fractalidad y los métodos dinámicos no lineales y entropía.

RP ha sido aplicado en la resolución de problemas de fricción [32]; para resolver series de tiempo, aplica el atractor caótico de Lorenz y resuelve la función de cuarto orden mediante el método de integración *Runge-*

*Kuta*. Cuantifica y cualifica el fenómeno mediante las propiedades de RP. Existen aplicaciones sobre la caracterización de fallas en máquinas rotativas, específicamente, [33] propone una metodología para aplicar RP a la predicción de falla en rodamientos, en la que se cuantifica y cualifica el daño a través de un reconocimiento de imágenes derivados de los RP. De igual forma, RP se ha comenzado a aplicar en el diagnóstico de falla y la cualificación de los fenómenos dinámicos en cajas de engranes [34]; sin embargo, el presente autor no muestra las metodologías para la colección de datos, ni las técnicas de integración usadas.

Las dos metodologías multiescala usadas para el proceso de monitoreo que se han dominado en las últimas dos décadas son las *wavelets* y el análisis de espectro simple, y en

**Tabla 4.** Comparación entre las técnicas fractales, métodos no lineales y entropía [31].

	Fractalidad	Métodos dinámicos no lineales	Entropía
Enfoque	Auto-similaridad	Propiedad de atractor	Estado de desorden
Complejidad	Auto-similaridad débil	Estructura de atractor compleja	Nivel de desorden alto
Regularidad	Auto-similaridad Robusta	Punto fijo	Nivel de desorden bajo
Ventajas	Describe de manera global y local la estructura de las series de tiempo	Visualización de datos dinámicos en el espacio de fase	Provee una medición directa del desorden, el proceso de cálculo es simple
Desventajas	Proceso de medición complicado, dependiente de la cantidad de datos	El atractor es difícil de cuantificar, interpretar y capturar; dependiente del tamaño de la muestra	Poca atención a los procesos dinámicos no lineales



ambos se han propuesto diferentes variantes. La aplicación del aprendizaje profundo, o *deep learning*, es un área de investigación emergente que muestra potencial. Dicha área incluye los *auto-encoders* y la aplicación de redes neuronales en su desarrollo [35]. Estudios recientes aplican la inteligencia artificial con RP para lograr mejores resultados [36]. RP también se ha combinado con la red neuronal convolucional para el diagnóstico de falla de un motor de 3 fases, el primer paso del método propuesto es convertir la señal de la serie de tiempo en imágenes 2D o RP y posteriormente procesa dichas imágenes mediante la red neuronal [37].

Hoy en día se desenvuelve la cuarta revolución industrial originada por los grandes avances en el desarrollo tecnológico: el circuito integrado, la computación e información. La nueva era tecnológica está encabezada por las máquinas inteligentes, el internet de las cosas o IoT (por sus siglas en inglés, *Internet of Things*), la inteligencia artificial y el *Big Data* [20], [38], [39].

Debido a las diversas aplicaciones y condiciones de trabajo de las máquinas rotativas, sus componentes deben operar tanto en condiciones lineales y no-lineales, como en regímenes cuasi-estacionarios y no-estacionarios. Para comprender y predecir el comportamiento de la maquinaria, se debe tomar en cuenta la totalidad de los fenómenos dinámicos a los que están expuestas [40]. Las vibraciones proporcionan información sobre el estado de la condición funcional de la máquina y son usadas como herramienta para la detención y el control de fallas [41].

El enfoque actual para el mantenimiento de maquinaria rotativa es el mantenimiento basado en la condición o mantenimiento predictivo PdM [20], [42], pero el desarrollo de las técnicas de diagnóstico y predicción de fallas para condiciones de operación no-lineales y no-estacionarias es un reto. Las técnicas tradicionales utilizadas normalmente son sólo para casos lineales y estacionarios, por lo cual generan resultados inciertos [14]. Las principales metodologías industriales para

el diagnóstico de maquinaria y de sus fallas son: vibraciones, ultrasonido, voltajes, análisis de aceites, análisis de partículas de desgaste, termografía, inspección visual y análisis de las condiciones de carga y operativas. Por su parte, las herramientas más aplicadas en los análisis dinámicos son los acelerómetros, sensores magnéticos, corrientes de Eddy, interferómetros láser y sensores piezoeléctricos [43]. Sin embargo, las vibraciones continúan siendo la herramienta principal para conocer la condición de las máquinas y predecir las fallas [44].

El monitoreo de vibraciones en los métodos tradicionales maneja datos de un estado estable y mayormente de vibración en el dominio de la frecuencia, y tiene limitaciones tecnológicas como los sistemas de adquisición de un solo canal y la simplificación de los datos de adquisición y análisis. Los datos en el dominio del tiempo son empleados para observar las tendencias en el tiempo, que se refiere a la forma de onda de una señal. La mayoría de las fallas en maquinaria ocurren cerca la frecuencia del componente asociado, y los datos en el dominio de la frecuencia se obtienen a partir del dominio del tiempo mediante el proceso matemático llamado transformada rápida de *Fourier* (FFT por sus siglas en inglés, *Fast Fourier Transform*) [21].

Existen fuentes de comportamiento no lineales en máquinas rotativas, tales como los claros en las chumaceras, baleros, engranes, juntas rotativas, sellos, alabes del rotor, así como la aerodinámica y otros efectos en los fluidos y lubricantes. Estos elementos tienen un comportamiento no-lineal y pueden influir significativamente en la caracterización dinámica del sistema [45].

Los modelos para predicción de fallas en maquinaria son clasificados en métodos basados en modelos, basados en los datos de adquisición, y una combinación de ambos. Las técnicas más reconocidas para el análisis y predicción de fallas de fenómenos no-lineales y no estacionarios son la matriz de recurrencia, filtrado de partículas, filtrado



de Kalman, modelo oculto de Markov, regresión Gaussiana, el vector soporte de máquina, redes neuronales artificiales, lógica y redes neuronales de *Fuzzy* [13].

[46] Hace una comparación entre las tres metodologías más utilizadas para los análisis dinámicos, mismos que son presentados en la Tabla 5. A dicha tabla se ha agregado una cuarta columna correspondiente al RP. Puede observarse claramente que el método Hilbert y el RP son muy diferentes de Fourier. Una de las principales diferencias es que pueden aplicarse perfectamente a los fenómenos no lineales y no estacionarios. Otra diferencia característica es que el RP tiene una base teórica empírica a diferencia de la formulación teórica de Fourier.

La transformada *Hilbert-Huang* (HHT por sus siglas en inglés, *Hilbert-Huang Transform*), es un método empírico que consta de dos partes: el método del modo de descomposición empírica (EMD por sus siglas en inglés, *Empirical Mode Decomposition*) y el análisis espectral de Helbert [19], [25], [30], [48].

Mediante la metodología HHT es posible procesar los datos de medición y aplicar filtros para obtener las frecuencias en los sistemas mecánicos a partir de las integrales de sus condiciones instantáneas de la velocidad, o sea el desplazamiento [41]. Actualmente se utiliza la técnica HHT con otras metodologías para el diagnóstico de falla en baleros bajo sistemas no estacionarios. Además, HHT tiene la capacidad para calcular la entropía del sistema dinámico [49] y combinarse con las *wavelet* para analizar gráficamente los resultados.

## Gráficos de recurrencia

La razón fundamental para seleccionar la metodología de los gráficos de recurrencia, es que proporciona mayor información sobre los estados no lineales que la transformada del Hilbert y otras técnicas de análisis. Por un lado, proporciona los gráficos de fase que revelan el comportamiento general del sistema, el cambio de régimen, la estabilidad y la periodicidad, entre otros. Por otro lado, al ser una matriz se pueden cuantificar las características contenidas en el espectro, ya sea como el valor total de la matriz, o como de las diagonales, horizontales y verticales. Todas ellas están ligadas a propiedades específicas del sistema.

RP se ha aplicado con buenos resultados en muchos campos del conocimiento, tales como la física, química, biología, ingeniería, ciencias de la tierra, finanzas y economía, entre otras de acuerdo con [11] y [12], quienes concluyen que, gracias al desarrollo de los nuevos sistemas de cómputo, los procesos de cálculo se han hecho más fáciles, rápidos y por ende menos tediosos.

Hoy en día con los sistemas *Big Data* y el Internet de las Cosas se da un nuevo impulso en favor de estas metodologías. [11] publicó, 25 años después de que los gráficos de recurrencia fueran presentados por Eckman en 1987, un artículo en el cual aporta una mejora en la cuantificación de los datos medidos respecto al nivel de confianza de las mediciones y la sensibilidad para detectar los cambios dinámicos del sistema.

[12] hizo público otro artículo donde hizo una reseña histórica de los gráficos de recurrencia,

**Tabla 5.** Comparativo entre las principales metodologías para análisis dinámicos [44].

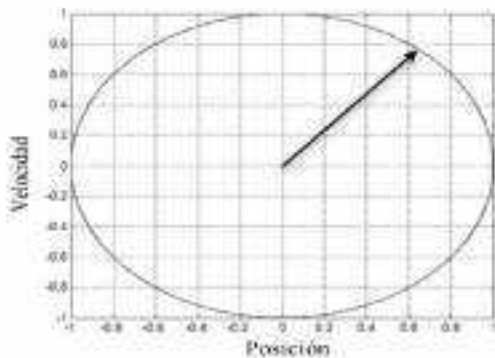
Característica	Fourier	Wavelet	Hilbert	Recurrence Plot
No lineal	No	No	Si	Si
No estacionario	No	Si	Si	Si
Base teórica	Completamente teórico	Completamente teórico	Empírico	Empírico

en él confirma que gracias al desarrollo de los sistemas de cómputo se ha intensificado la investigación mediante la comparación de todas las posibles combinaciones de pares de series de datos a través de una matriz de similitud.

En los últimos 7 años, se establecieron los análisis de recurrencia cuantitativos, dentro de los que se encuentran los siguientes: porcentaje de recurrencia, porcentaje determinístico, longitud de línea y de divergencia máxima, y entropía de la distribución de la longitud de líneas y tendencias.

De acuerdo con [10], el método de RP muestra las recurrencias de un sistema dinámico: Supóngase una trayectoria de un sistema con su fase en el espacio [50]. Las componentes de dicho vector pueden representar la posición, la velocidad, la aceleración o alguna otra variable.

El desarrollo del sistema está descrito por una serie de vectores que representan la trayectoria en el espacio como se muestra en la Figura 4, en la cual sólo se aprecia una vista de planta. La trayectoria completa representa un ciclo del movimiento.



**Figura 4.** Vector en el espacio,

$$\chi(t) = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n], [14]$$

El diagrama correspondiente se basa en la siguiente matriz de recurrencia:

$$R_{i,j} = \begin{cases} 1: \vec{\chi}_i \approx \vec{\chi}_j, \\ 0: \vec{\chi}_i \not\approx \vec{\chi}_j, \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

La diferencia entre los valores  $\vec{\chi}_i \approx \vec{\chi}_j$  representa un error  $\epsilon$ , que puede quedar expresado de la siguiente manera:  $\chi_i - \chi_j < \epsilon$ .

Con ello, se genera una matriz de dimensión  $N \times N$  que compara los estados  $i, j$  del sistema en el tiempo. Si los estados son similares se asigna un  $R_{i,j} = 1$  en la matriz, si son diferentes se asigna el valor  $R_{i,j} = 0$ .

De tal forma que, una vez completa la matriz, se tienen los estados similares o recurrentes en el sistema.

Cada casilla se convierte en una especie de píxel que la transforma en una fotografía del estado dinámico analizado.

Algunos significados de los patrones que resultan en las matrices se listan en la Tabla 6.

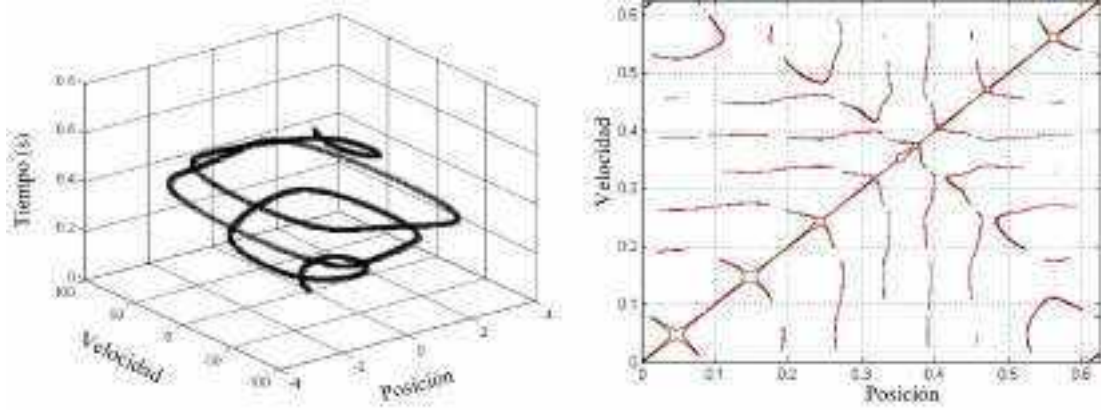
**Tabla 6.** Interpretación de los patrones de las matrices RP [10].

Patrón de la gráfica	Significado
Homogeneidad	Estacionario
Movimiento periódico	Proceso cíclico
Líneas diagonales	Proceso determinístico
Agrupamientos	Diferentes estados
Estructuras curvadas	Cambios dinámicos

Para deformaciones grandes, el gráfico RP representativo se ilustra en la Figura 5. Se trata de las flexiones de una viga en voladiza empotrada en un extremo.

Nótese que los ciclos quedan debidamente registrados en el gráfico de fase.

Un indicador crítico en los gráficos de recurrencia es la selección del error permitido  $\epsilon$ . Es por ello que se busca un compromiso entre los extremos, una aproximación práctica consiste en escoger un valor de 10% de la media del diámetro máximo de la fase, entre otros criterios que deben analizarse para cada caso particular de estudio. En la Figura 6 se ilustran los resultados de un mismo análisis considerando diferentes valores para  $\epsilon$ . La Figura 6A es de tipo homogénea, propia de un ruido blanco uniforme; la Figura 6B viene de un movimiento periódico; la Figura



**Figura 5.** RP de una viga en voladizo con deformaciones largas [15].

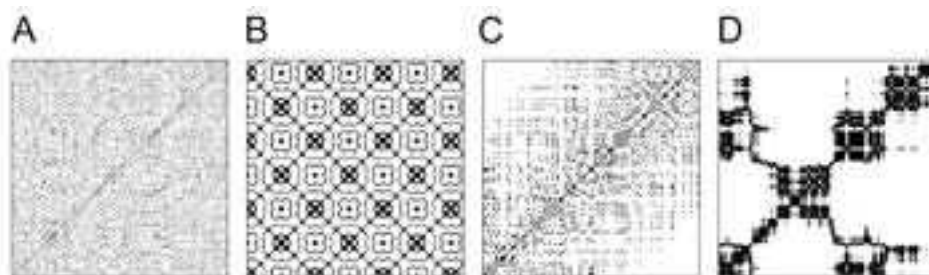
6C es de un mapa logístico con base en una fórmula dada; y la Figura 6D es resultado de un movimiento disruptivo. Los parámetros RP de  $\epsilon$  equivalen a 0.2 en A, C y D, y 0.4 en B, con sus respectivas características complementarias cada una. Esto da una idea de lo diferente que puede llegar a ser el gráfico dependiendo del valor que se asigne al parámetro  $\epsilon$  [12].

Una de las características fundamentales de RP son sus parámetros cuantitativos: razón de recurrencia, definida por los puntos de recurrencia en la matriz; determinismo, el porcentaje de puntos de recurrencia en las líneas diagonales; laminaridad, porcentaje de puntos de recurrencia en las líneas verticales; la relación definida por el determinismo entre la razón de recurrencia; los valores máximos y mínimos de las sumatorias de las líneas; además de la divergencia, Entropía de Shannon y la tendencia [62].

De acuerdo con la metodología de los gráficos de recurrencia, se requieren dos variables para la realización del mapa: la velocidad

y el desplazamiento. En maquinaria rotativa, los acelerómetros son los elementos más comunes para la adquisición de señales de vibración. Esto significa que se necesita realizar dos integraciones para encontrar la función de la velocidad y del desplazamiento [63].

Para obtener una correcta integración de la aceleración, se deben conocer los valores iniciales de la velocidad y del desplazamiento, sin embargo, estos valores son difíciles de obtener con precisión. En muchos casos tales valores son desconocidos o inconsistentes con respecto a los valores reales, lo cual provoca una desviación o error en los datos obtenidos para la velocidad y desplazamiento. Existen varias técnicas utilizadas para corregir las desviaciones como resultado de la integración numérica de la aceleración; entre ellas se encuentra la propuesta por [53] y [54], que propone una línea base flotante para calcular la razón de la desviación. Otra metodología para la integración de la aceleración es la propuesta por [55], la cual se



**Figura 6.** Sensibilidad del RP para detectar cambios de la fase de un sistema.

basa en el ajuste de las curvas por medio de sus envolventes generadas por los puntos de medición. Yang logró realizar los ajustes en la velocidad y desplazamiento mediante el cálculo del valor medio entre las envolventes superior e inferior. [56] Propone un método para corregir el corrimiento generado por la doble integración de la aceleración mediante dos filtros de Kalman. La técnica consiste en dividir la serie de tiempo en cuatro intervalos: inicialización, estático, transitorio y permanente. Durante el intervalo de tiempo en el cual se reconoce el corrimiento de la línea base del transitorio, se aplica un sistema de filtro para corregir el corrimiento en la integración. [57] desarrolló un esquema de integración de la aceleración en línea combinando sistemáticamente la corrección de la línea base, con mínimos cuadrados y filtros pasa altas para la obtención del desplazamiento en tiempo real. En ingeniería civil, [58] combina las nuevas tecnologías de los teléfonos celulares con los sistemas de posición globales (GPS por sus siglas en inglés, *Global Positioning System*) y los acelerómetros para el monitoreo de los puentes en tiempo real y con base al desplazamiento. Concluyó que es factible el uso de sensores inteligentes para ciertos casos, lo cual abre nuevas puertas de aplicaciones. [59] implementó un filtro análogo y un circuito integrado para obtener el desplazamiento y concluyó que sólo puede hacerse en un dominio continuo y limitado a bajas frecuencias. [60] aplicó un método de integración en el cual descompone las señales de resonancia en el espectro de vibración y lo combina con la wavelet para el diagnóstico de fallas en rodamientos. [61] Realizó un experimento en el cual utilizó un micro sistema-mecánico (MEMS por sus siglas en inglés, *Micro-Electro-Mechanical System*) combinado con potenciómetros y la aplicación de filtros para determinar el desplazamiento a partir de la aceleración mediante integración; concluyó que la forma más efectiva consiste en medir directamente el desplazamiento por medio de un láser, sin embargo, es una solución más costosa.

Se ha observado que en el mundo real las altas frecuencias pueden ser modeladas de mejor manera con herramientas de carácter estocástico [63], en tanto que las frecuencias bajas son mejor modeladas con herramientas de sistemas mecánicos [64]. [65] realizó una comparación entre los diferentes métodos de integración: Euler, Heun, Runge-Kutta y Adams-Bashforth-Molton. Uno de los métodos que atraen la atención es el implícito [66]. Debido a la popularidad de los RP, se presenta el concepto de *fuzzy recurrence plot* como un método alternativo para cuantificar las similitudes entre dos estados de fase en el espacio de una trayectoria en las series del tiempo [67]. Los resultados mostraron una textura diferente que mejora la visualización de los estados dinámicos; esta técnica tiene gran aplicación en el área biomédica [68]. Un estudio sobre la tendencia de los eventos de falla dentro del mantenimiento predictivo usando el manejo de datos más eficientes [69], [70]. Su aportación parte de la necesidad e importancia que tiene la predicción de una falla con mayor precisión [71]. Algunos métodos similares a los gráficos de recurrencia son *close returns plot*, *contact map*, *dot plot*, *dot matrix*, *graphic matrix*, *link plot*, *sequence matrix*, *dynamic time warping*, *first return map*, *order matrix*, *recurrence time statistics*, *SDC plots*, *self-similarity matrix*, *similarity plot*, *space time-index plot*, *space time separator plot*, *variogram cloud/madrogram* [51].

La aportación que los análisis de los gráficos de recurrencia pueden hacer sobre el campo del mantenimiento predictivo es significativa, ya que al tomar en cuenta la parte no lineal y no estacionaria de los fenómenos se da una comprensión más profunda y real de los mismos. Actualmente, la base de las técnicas para la identificación de fallas, su cuantificación y predicción se basan en técnicas que asumen que todos los fenómenos físicos son no lineales y estacionarios pero a pesar de ello se han tenido muy buenos resultados. Con la aportación de los análisis de recurrencia se mejorarán aún más los recursos



para realizar análisis más complejos y hacer mejores predicciones [67]. Schultz encontró que RP demanda un gran esfuerzo computacional cuando trata con series de tiempo, sin embargo, el cálculo del determinante de la matriz resulta en una técnica de análisis efectiva [64].

A continuación se mencionan algunos campos de aplicación de RP:

[72] aplica EMD con RP para estudiar el comportamiento del flujo de tráfico en una ciudad. Se ha empleado en el área médica para el estudio del corazón [73]. También hay estudios sobre RP en pruebas de fatiga [74]. Mediante la propiedad de cuantificación se emplea en la caracterización del viento [75]. La caracterización de las vibraciones transmitidas al cuerpo humano por medio del análisis cuantitativo de RP [76]. Las comunicaciones con simulaciones no lineales son otra aplicación [77]. Estudios sobre la radiación solar con series de tiempo también es una aplicación [78]. Topología y mapas logísticos están en el alcance [79]. Hay aplicación en electroquímica [80]. Estudios de termoacústica con base en series de tiempo para caracterización de motores experimentos térmicos y fluidos [81]. Recientemente se han venido realizando estudios de corrosión mediante el ruido electroquímico y el análisis de cuantificación [82]. Por supuesto, la caracterización de procesos de maquinado es una aplicación común del método [83]. El análisis cuantitativo de recurrencia también se ha aplicado en la exploración del autismo [84]. Las aplicaciones en fallas de rodamientos en combinación de otras técnicas como redes neuronales comienzan a explorarse [3], [81]. Otros autores han estudiado la velocidad instantánea de un motor diésel junto con HHT con buenos resultados [85], [86]. Monitoreo de falla en rodamientos y engranes.

La lista de aplicaciones es larga y de ella sólo se han dado algunos ejemplos como demostración de su aplicación en muchas áreas de la ciencia.

Una tendencia generalizada es la aplicación de redes neuronales para enfrentar los fenómenos dinámicos complejos [86], [87].

RP es un método basado en datos de adquisición y su principio está en la recurrencia en cada ciclo representado por su fase en el espacio. Además de los retos descritos en párrafos anteriores, tiene la dificultad de que se requiere de una correlación de la matriz de recurrencia contra el fenómeno físico, y resolver la doble integración requerida para el gráfico del vector de fase en el espacio [48].

## Revisión de patentes

De la revisión de patentes, se concluye que no se encontraron registros sobre alguna metodología igual a la propuesta basada en el diagnóstico de falla del mantenimiento predictivo, por lo que se descarta alguna posible violación de derechos de autor. Dentro de las patentes encontradas destacan las siguientes: CN102889987A (2013), que da una metodología para el diagnóstico de falla en engranes basada en una proyección con el clasificador de Bayes [88] en la transformada de Kermel y algoritmos de Laplace para el procesamiento de datos.

Una patente adicional de gran interés es la CN103471708B (2013); trata sobre un método para el diagnóstico de fallas en maquinaria basado en el análisis no lineal de la rotación de partículas, así como gráficos de frecuencia, picos de vibración y espectrogramas. La patente CN105841961A (2016), propone un método para el diagnóstico de fallas en baleros basado en las *wavelets* de Morlet y redes neuronales. La patente número CN104374575A del año 2014 describe una metodología para el diagnóstico de falla en baleros basado en un proceso de separación para determinar las fallas en regímenes no estacionarios.

La patente con registro CN105628383A (2017) desarrolla una propuesta para el diagnóstico de baleros modificando el vector de soporte de máquina por mínimos cuadrados y para mejorar la migración basada en el aprendizaje; es un método para comportamientos no lineales mediante la aplicación de los gráficos de recurrencia.

## Revisión de recursos de programas de cómputo

Existe una amplia gama de empresas desarrolladoras de tecnología y técnicas para el diagnóstico de fallas, pero todas giran en torno a las nuevas tecnologías de información y sobre el manejo de grandes bases de datos a través de la nube. Sin embargo, las tecnologías siguen siendo las tradicionales descritas en la Tabla 5. En cuanto a *softwares* de esta aplicación, se tienen registros de 20 desarrollos con la herramienta relacionada a los gráficos de recurrencia, algunos de ellos son las que se listan en las siguientes Tablas 7a y 7b [89]:

**Tabla 7a.** Programas de cálculos relacionados con los gráficos de recurrencia [89].

PROGRAMA	DESARROLLADOR
CRP Toolbox 5.5	Norbert Marwan
Commandline Recurrence Plots	Norbert Marwan
rqaGUI	Stefan Schinkel
Pyunicorn	Jonathan Donges <i>et al.</i>
PyRQA	Tobias Rawald
Recurrence Analysis.jl	Helios De Rosario
DynamicSystem.jl	Julia Dynmics
RSA	Peter beim Graben
Crqa: Cross-Recurrence Quantification Analysis for Categorical and Continuous Time	Moreno I. Como and Rick Dale

**Tabla 7b.** Programas de cálculos relacionados con los gráficos de recurrencia [89].

PROGRAMA	DESARROLLADOR
casnet: An R toolbox for studying Complex	Fred Hasselmann
RQA Software	Charles Webber Jr.
RQA X	Andrew Keller

Visual Recurrence Analysis 4.9	Eugene Kononov
Bios Analysis	Lazar Kovacevic
RecPlot 1.0	Krishna Nayak
Recurrence Plots	Max Keilbach
Recurrence Plots	Paul Bourke
Dataplore 2.2	Ixellence GmbH
TISEAN 3.01	Rainer Hegger, Helger Kants
fNonlinear: Nonlinear and Caohic Time	Dethelm Wertz and many other
RCPLOT	Tom Wouters
GenomDiff	Caluss Wimmer

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la revisión bibliográfica efectuada sobre el tema en cuestión, queda claro que el diagnóstico de fallas en maquinaria rotativa es de suma importancia en la industria. La globalización y los avances tecnológicos demandan maquinaria más esbelta, eficiente y segura; para que las técnicas de análisis estén a la altura de los requerimientos, es necesario mejorar los sistemas de diagnóstico actuales. Los costos de las reparaciones en maquinaria llegan al 60% del costo de la producción, sin embargo, con el PdM se pueden reducir los costos de mantenimiento en un 30%, los paros no programados en un 75% e incrementar la producción en un 25%. Estos valores están basados en las tecnologías de análisis convencionales y, obviamente, al mejorar dichas técnicas, se incrementarán los beneficios señalados. Por otro lado, las inversiones en el mercado del mantenimiento predictivo muestran una tendencia de crecimiento del 39% CAGR hasta el año 2022. Actualmente, nuevas tecnologías emergentes, tales como la eólica, reportan que el factor de planta se ve afectado por altos porcentajes de fallas en todos los sistemas. Una característica de



operación de esta maquinaria es la dependencia del viento y, dado que el viento no es estable, las técnicas convencionales para el diagnóstico de falla se ven expuestas, debido a que los regímenes dinámicos son de índole no estacionarios, con lo cual la incertidumbre tanto del diagnóstico como de las predicciones de falla es mayor. La tendencia del desarrollo del diagnóstico de falla y del mantenimiento predictivo es hacia el pronóstico de la probabilidad de falla y de la vida útil de las máquinas de forma integral. Esto obliga a que las técnicas de diagnóstico de falla actuales se complementen con la tecnología emergente para realizar análisis más completos y precisos.

Las metodologías para el diagnóstico de fallas se clasifican en tres grupos: análisis en el dominio del tiempo y frecuencia, modelos con filtro, y análisis estadísticos. Se tienen registros de 53 técnicas que manejan datos en función de tiempo; de ellas, la más extendida y comercial es el análisis de vibraciones por Fourier. Industrialmente, las técnicas más utilizadas son el análisis de vibraciones, ruido, termografía, ultrasonido, análisis de corriente y tierras físicas, calidad de la energía y análisis de aceites. Una característica de los métodos para el diagnóstico actuales es que se implementaron bajo la concepción de que todos los fenómenos dinámicos son lineales y estacionarios; sin embargo, es bien conocido que en la realidad todos los fenómenos son no lineales.

Afortunadamente, las nuevas técnicas de análisis que consideran los sistemas dinámicos no lineales y los regímenes no estacionarios comienzan a ganar terreno por sus resultados. Los RP son una de estas nuevas técnicas, la cual es experimental y cuya principal característica es que tiene una alta sensibilidad al cambio de estado del sistema dinámico y considera las no linealidades del sistema y los regímenes no estacionarios. Es un método gráfico que ayuda a la cuantificación de la falla y tiene propiedades para cuantificar los gráficos analíticamente. Se ha descrito la infinidad de aplicaciones

cuyos resultados demuestran su versatilidad para el análisis de cualquier sistema dinámico y existe mucha literatura sobre el método y comienza a ganar terreno en el análisis de falla de maquinaria. También se han encontrado alrededor de 22 *softwares* sobre RP, y dentro de ellos hay algunas versiones gratuitas disponibles en la red. La revisión de patentes mostró que no existe tecnología industrial en el mercado basada en RP, esto indica que esta metodología está en vías de desarrollo e investigación.

Un requisito para la construcción de RP es tener la función de los desplazamientos del sistema objetivo, pues a partir de ella se traza el vector de fase en el espacio en los sistemas cíclicos. En mantenimiento predictivo, el acelerómetro industrial es el medio más utilizado para medir las vibraciones; una de las ventajas de los acelerómetros es que se pueden medir altas frecuencias, sin embargo, sus desventajas son que a bajas frecuencias están limitados hasta los 3Hz aproximadamente, y obtener los desplazamientos para RP a partir de los datos obtenidos por el acelerómetro representa una tarea compleja y determinante. Otra de las dificultades al integrar la aceleración son las constantes que se generan con cada integración y que no pueden calcularse debido a que las condiciones de entrada de la función son generalmente desconocidas. Esta condición ha dado origen a varias metodologías para encontrar las integrales de la aceleración.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con la revisión bibliográfica, queda claro que existe la necesidad de mejorar las técnicas para el diagnóstico de falla debido al desarrollo industrial y a las exigencias de la competitividad global, para incrementar la seguridad y proteger el medio ambiente.

Hoy en día, están surgiendo técnicas facilitadas por el desarrollo del procesamiento masivo de datos y que comienzan a considerar las no linealidades y a los sistemas mecánicos



no estacionarios con la idea de mejorar el diagnóstico y la predicción de fallas en maquinaria. Dentro de ellas está RP, la cual es una técnica probada en otras áreas del conocimiento y que ha dado resultados interesantes, porque tiene la particularidad de analizar los sistemas no lineales y no estacionarios, y genera más información sobre el fenómeno analizado.

Sin embargo, a pesar de que RP es un método establecido desde hace algunas décadas, se continúan proponiendo nuevas técnicas para realizar la doble integración de la aceleración para obtener las funciones de velocidad y desplazamiento, las cuales son la base para el gráfico de fase y de RP. La característica de la sensibilidad de RP a los cambios dinámicos de un estado tiene su fundamento en los gráficos de fase, sin embargo, pequeños errores en las integrales significan errores en los resultados de los gráficos de recurrencia: esta situación es un área de oportunidad.

De igual forma, se tiene otra oportunidad para aplicar de manera generalizada RP en el diagnóstico de falla para el mantenimiento predictivo. La tendencia en las técnicas para el análisis de falla es complementarse con otras técnicas emergentes y la automatización tanto del diagnóstico como del pronóstico de falla en las máquinas rotativas. Se concluye que RP puede ser aplicado al mantenimiento predictivo de manera sistemática y queda evidenciado que las propiedades gráficas y cuantificables darían mayor y mejor información para el diagnóstico de fallas, a diferencia de los métodos convencionales actuales.

## REFERENCIAS

[1] Zhixiong Li, Yu Jiang, Chao Hud, Z. Peng, "Recent progress on decoupling diagnosis of hybrid failures in gear transmission systems using vibration sensor signal: A review," *Elsevier, Measurement*, vol. 90, pp. 4–19, 2016.

[2] W. Olarte, M. Botero, Benhur A., Z. Cañon, "Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo", *Scientia et Technica*, No 45, 2010.

[3] BS EN 13303:2017, Maintenance terminology, British Standards Institution, 2019.

[4] G. H. Martin, *Kinematics and dynamics of machines*, Waveland Press Inc., Second edition 2002.

[5] B. T. Atmaja, D. Arifianto, "Machinery Fault Identification Using Blind Sound Separation and Fuzzy System," *Conference: IFSA - AFSS*, 2011.

[6] H. Nayfeh, P. Frank Pai, *Linear and Nonlinear Structural Mechanics*, 1<sup>st</sup> Edition, Wiley-Vch, Julio 2004.

[7] E. Macau, *A Mathematical Modeling Approach from Nonlinear Dynamics Complex Systems*, Springer International Publishing, 2019.

[8] V. Marinca & N. Herişanu, "Nonlinear dynamic analysis of an electrical machine rotor-bearing system by the optimal homotopy perturbation method," *Computers & Mathematics with Applications*, 61(8), 2019–2024, 2011.

[9] J.P. Eckmann, S. Oliffson, D. Ruelle, "Recurrence Plots of Dynamical Systems," *Europhysics Letters* 4 973–977, 1987.

[10] S. Samborski, J. Wierzchowicz, R. Rusinek, "A numerical-experimental study on damaged beams dynamics," *Eksploracja Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 17 (4), 624–631, 2015.

[11] N. Marwan, S. Schinkel, J. Kurths, "Recurrence Plots 25 years later - gaining confidence in dynamical transitions," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 2013.

[12] N. Marwan, "Historical Review of Recurrence Plots," *Eur. Phys. Jour. Sp. Topics*, vol 164, pp.3-12, 2008

[13] S. Kan, A. C. Tan, J. Mathew, "A review on prognostic techniques for non-stationary and non-linear rotating systems," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 62, issue 63, pp. 1-20, 2015.



- [14] J. C. Jáuregui-Correa, "Identification of nonlinearities in mechanical systems using Recurrence Plots," *UAQ*, 2019.
- [15] J. C. Jáuregui-Correa, *Nonlinear Structural Dynamics and Damping*, 1<sup>st</sup> Edition, Springer International Publishing, 2019.
- [16] A. Qin, Q. Hu, Y. Lv, Q. Zhang, "Concurrent Fault Diagnosis Based on Bayesian Discriminating Analysis and Time Series Analysis with Dimensionless Parameters," *IEEE Sensors Journal*, Vol 19, Issue 6, 2019.
- [17] ISO 5348, *Mechanical Vibration and Shock – Mechanical mounting of accelerometers*, ISO International Organization for Standardization, 1988.
- [18] ISO 18436, *Machine Condition Monitoring*, International Organization for Standardization, 2014.
- [19] N. E. Huang, Nii O. Attoh-Okine, *The Hilbert-Huang Transform in Engineering*, 1st Edition, Taylor & Francis, 2005.
- [20] B. Schmidt, L. Wang, "Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox: A review," *Elsevier, Mechanical Systems and Signal Processing*, vol 126, pp. 662–685, 2019.
- [21] R. Keith Mobley, *An introduction to predictive maintenance*, Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [22] S. Spiegel, F. Mueller, D. Wiesmann, "Cost-Sensitive Learning for Predictive Maintenance," *IBM Research Zurich, Saeumerstrasse 4, 8803 Rueschlikon, Switzerland*, 2018.
- [23] B. Känge, S. Lundell, "Evaluation of the Potential for Predictive Maintenance," Chalmers University of Technology, Sweden, 2015.
- [24] IoT Analytics, "Predictive Maintenance market by segment," *IoT Analytics GmbH*, 2017-22.
- [25] P. F. Landrin, G. Rilling, P. Goncalves, "Empirical mode decomposition as a filter bank," *IEEE Signal Process. Lett.* vol. 11(2) pp. 112–114, 2004.
- [26] J. P. Salameh, S. Cauet, E. Etien, "Gearbox condition monitoring in wind turbines: A review," *Elsevier, Mechanical Systems and Signal Processing* vol. 111 pp. 251–264, 2018.
- [27] S. Baltazar, C. Li, H. Daniel, & J. Valente de Oliveira, (2018). "A Review on Neurocomputing Based wind Turbines Fault Diagnosis and Prognosis," *2018 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chongqing)*, 2018.
- [28] D. H. Mesa, Y. Ortiz Sánchez, M. Pinzón, "La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al Mantenimiento," *Scientia et Technica*, Año XII, No 30, 2006.
- [29] J. F. López López, "Pronóstico de fallas en máquinas rotativas con base en modelos matemáticos. Caso de estudio: Rodamientos radiales de bolas," Tesis Doctoral en Ingeniería, Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda, Colombia, 2017.
- [30] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, H. H. Liu, "Empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear random-stationary time series analysis," *R. Soc. Lond. Proc. Ser. A454* pp. 903–995, 1998.
- [31] L. Tang, H. Lv, F. Yang, & L. Yu, "Complexity testing techniques for time series data: A comprehensive literature review," *Chaos, Solitons & Fractals*, vol 81, pp. 117–135, 2015.
- [32] G. Sun, H. Zhu, C. Ding, Y. Jiang, & C. Wei, "On the boundedness of running-in attractors based on recurrence plot and recurrence qualification analysis" *Friction*, vol. 7(5), pp. 432–443, 2019.
- [33] Y. Wang, B. Zhou, M. Cheng, H. Fu, D. Yu, W. Wu, "A Fault Diagnosis Scheme for Rotating Machinery Using Recurrence Plot and Scale Invariant Feature Transform," *3rd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology, ICMEIT*, 2019.
- [34] B. Abrozkievics, G. Litak, P. Wolszczak, "Topics in Nonlinear Mechanics and Physics," *Springer Proceedings in Physics* 228, 2019.
- [35] C. Aldrich, "Process Fault Diagnosis for Continuous Dynamic Systems Over Multivariate Time Series" in *Time series analysis*, [Online First], IntechOpen, 2019.

- [36] T. Wang, Q. Han, F. Chu, Z. Feng, "Cloud-enhanced Predictive Maintenance," *The International Journal of advanced manufacturing technology*, vol. 99, Issue 1-4, 2018.
- [37] Y. Jiang, H. Zhu, R. Malekian, C. Ding, "An improved quantitative recurrence analysis using artificial intelligence based image processing applied to sensor measurements," *Concurrency Computat Pract Exper.* vol. 31 (10), 2019.
- [38] Y. Lei, F. Jia, J. Lin, S. Xing, and S. X. Ding, "An intelligent fault diagnosis method using unsupervised feature learning towards mechanical big data," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 5, pp. 3137–3147, 2016.
- [39] J.S. Rao, "History of Rotating Machinery Dynamics," Springer, 2011.
- [40] R. Martinez-Guerra, J. L. Mata-Machuca, *Fault Detection and Diagnosis in Nonlinear Systems: A Differential and Algebraic Viewpoint*, Springer International Publishing, 2014.
- [41] Y. Wang, "Research on the Fault Diagnosis of Mechanical Equipment Vibration System Based on Expert System," *International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control*, 2018.
- [42] Y. Hsueh, V.R. Ittangihala, W.B. Wu, H.C. Chang, C.C. Kuo, "Condition Monitor System for Rotation Machine by CNN with Recurrence Plot," *Energies* vol. 12 (17), 3221, 2019.
- [43] K. Chen, S. Wang, B. Qiao, Q. Chen, "Basic research on machinery fault diagnostics: Past, present, and future trends," *Springer, Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 13, Issue 2, pp. 264-291, 2018.
- [44] A. Nurul , A. Majid, G.A. Muthalif, "Mechatronics technology in predictive maintenance method," 6th International Conference on Mechatronics - ICOM'17, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 260, 2017.
- [45] J. Sun, C. Yan, and J. Wen, "Intelligent Bearing Fault Diagnosis Method Combining Compressed Data Acquisition and Deep Learning," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67(1), 185–195, 2017.
- [47] Norden E. Huang, Nii O. Attoh-Okine, *The Hilbert-Huang Transform in Engineering*, 1st Edition, Taylor & Francis, 2005.
- [48] N. Tsakalozos, K. Drakakis, S. Rickard, "A formal study of the nonlinearity and consistency of the empirical mode decomposition," *Signal Process.* vol. 92, pp. 1961–1969, 2012.
- [49] Y. Wang, L. Yang, J. Xiang, J. Yang, & S. He, "A hybrid approach to fault diagnosis of roller bearings under variable speed conditions," *Measurement Science and Technology*, vol. 28(12), 2017.
- [50] L. Tang, H. Lv, F. Yang, and L. Yu, "Complexity testing techniques for time series data: A comprehensive literature review," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 81, pp. 117–135, 2015.
- [51] N. Marwan, M. C. Romano, M. Thiel, J. Kurths, "Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems," *Physics Reports*, vol. 438(5-6), pp. 237-329, 2007.
- [52] R. Araújo Rios, R. Fernandes de Mello, "Applying Empirical Mode Decomposition and mutual information to separate stochastic and deterministic influences embedded in signals," *Signal Processing* vol. 118, pp. 159–176, 2016.
- [53] C. Pan, R. Zhang, H. Luo, H. Shen, "Baseline correction of vibration acceleration signals with inconsistent initial velocity and displacement," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8(10) pp. 1–11, 2016.
- [54] M. A. Dokainish, K. Subbaraj, "A Survey of direct Time-Integration Methods in Computational Structural Dynamics-I," *Comp. & Struct.* vol. 32(6), 1989.
- [55] Y. Yang, Y. Zhao, D. Kang, "Integration on acceleration signals by adjusting with envelopes," *Jour. Meas. in Eng.* vol. 4 (2), 2016.
- [56] R. Tu, R. Wang, T. R. Walter & F. Diao, "Adaptive recognition and correction of baseline shifts from collocated GPS and accelerometer using two phases Kalman filter," *Advances in Space Research*, vol. 54(9), pp. 1924–1932, 2014.
- [57] W. Zheng, D. Dan, W. Cheng, & Y. Xia, "Real-time dynamic displacement monitoring with double integration of acceleration based on recursive least squares method" *Measurement*, vol 141, pp. 460–471, 2019.



- [58] G. M. Guzman-Acevedo, G. E. Vazquez-Becerra, J. R. Millan-Almaraz, H. E. Rodriguez-Lozoya, A. Reyes-Salazar, J. R. Gaxiola-Camacho, & C. A. Martinez-Felix, "GPS, Accelerometer, and Smartphone Fused Smart Sensor for SHM on Real-Scale Bridges" *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, pp. 1–15, 2019.
- [59] Gilbert, H. B., Celik, O., & O'Malley, M. K. (2010, July). Long-term double integration of acceleration for position sensing and frequency domain system identification. In *2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* (pp. 453-458). IEEE.
- [60] Baojia, C., Baojia, S., Fafa, C., Hongliang, T., Wenrong, X., Zhang, F., & Zhao, C. (2018). Fault diagnosis method based on integration of RSSD and wavelet transform to rolling bearing. *Measurement*. doi:10.1016/j.measurement.2018.07.043.
- [61] Haylett, J. and Johnson, P., "Comparison of Measurement Methods for Evaluating Displacement of Commercial Vehicle Seats," SAE Technical Paper 2019-01-1481, (2019), <https://doi.org/10.4271/2019-01-1481>.
- [62] Marwan, M. C. Romano, M. Thiel, J. Kurths: Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems, *Physics Reports*, 438(5-6), 237-329, 2007.
- [63] Ricardo Araújo Rios, Rodrigo Fernandes de Mello, Applying Empirical Mode Decomposition and mutual information to separate stochastic and deterministic influences embedded in signals, *Elsevier, Signal Processing* 118(2016)159–176.
- [63] E. Delechelle, J. Lemoine, O. Niang, Empirical mode decomposition: S. Osman, W. Wang, A leakage-free resonance sparse decomposition technique for bearing fault detection in gearboxes. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(3), 035004. DOI:10.1088/1361-6501/AA9D5A.
- [64] D. Schultz, S. Spiegel, N. Marwan, and S. Albayrak, "Approximation of diagonal line based measures in recurrence quantification analysis," *Phys. Lett. A*, vol. 379, no. 14–15, pp. 997–1011, 2015.
- [65] Fathoni, M. F., & Wuryandari, A. I. (2015). Comparison between Euler, Heun, Runge-Kutta and Adams-Bashforth-Moulton integration methods in the particle dynamic simulation. *2015 4th International Conference on Interactive Digital Media (ICIDM)*. doi:10.1109/idm.2015.7516314
- [66] Li Chang qing. (2011). Transformation of implicit method to explicit method in solving vibration equation. *2011 International Conference on Multimedia Technology*. doi:10.1109/icmt.2011.6003361
- [67] T.D. Pham, "Fuzzy recurrence plots," *A Letters Journal Exploring the Frontiers of Physics*, 116 (2016) 50008.
- [68] Pham, T. D. (2018). Texture Classification and Visualization of Time Series of Gait Dynamics in Patients With Neuro-Degenerative Diseases. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(1), 188–196. doi:10.1109/tnsre.2017.2732448.
- [69] Baptista, M., Sankararaman, S., de Medeiros, o.P., Nascimento Jr., C., Prendinger, H., Henriquesa, E.M.P., Forecasting Fault Events for Predictive Maintenance using Data-driven Techniques and ARMA Modeling, *Computers & Industrial Engineering* (2017), doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.033>
- [70] Y. Lei, F. Jia, J. Lin, S. Xing, and S. X. Ding, "An intelligent fault diagnosis method using unsupervised feature learning towards mechanical big data," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 5, pp. 3137–3147, 2016.
- [71] C. Li, R.-V. Sanchez, G. Zurita, M. Cerrada, and D. Cabrera, "Fault" diagnosis for rotating machinery using vibration measurement deep statistical feature learning," *Sensors*, vol. 16, no. 6, p. 895, 2016
- [72] H. Xiong, P. Shang, and S. Bian, "Detecting intrinsic dynamics of traffic flow with recurrence analysis and empirical mode decomposition," *Physica A*, vol. 474, pp. 70–84, 2017.
- [73] U. R. Acharya, O. Faust, E. J. Ciaccio, J. E. W. Koh, S. L. Oh, R. S. Tan, H. Garan; Application of nonlinear methods to discriminate fraction-

ated electrograms in paroxysmal versus persistent atrial fibrillation; *Computer Methods And Programs In Biomedicine*, 175, 163–178p. (2019) DOI:10.1016/j.cmpb.2019.04.018.

[74] N. Acuña-González, E. García-Ochoa, J. González-Sánchez: "Assessment of the dynamics of corrosion fatigue crack initiation applying recurrence plots to the analysis of electrochemical noise data," *International Journal of Fatigue*, 30(7), 1211–1219p. (2008). DOI:10.1016/j.ijfatigue.2007.09.002

[75] C. A. Kitio Kwuimiyand S. A. Adewusi, C. Nataraj: "Characterization of the vibration transmitted in the human arm using selected recurrence quantification parameters," *Nonlinear Dynamics*, 88(4), 2873–2887p. (2017). DOI:10.1007/s11071-017-3417-1.

[76] A. E. Adeniji, O. I. Olusola, A. N. Njah: "Comparative study of chaotic features in hourly wind speed using recurrence quantification analysis," *AIP Advances*, 8(2), 025102p. (2018). DOI:10.1063/1.4998674.

[55] George H. Martin, "Kinematics and dynamics of machines," Waveland Press Inc., Second edition 2002.

[77] S. Bian, P. Shang: "Recurrence quantity analysis based on singular value decomposition," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 46, 1–13p. (2017). DOI:10.1016/j.cnsns.2016.10.016.

[78] N. Bigdeli, M. S. Borujeni, K. Afshar: "Time series analysis and short-term forecasting of solar irradiation, a new hybrid approach," *Swarm and Evolutionary Computation*, 34, 75–88p. (2017). DOI:10.1016/j.swevo.2016.12.004.

[79] P. Chandran, R. Gopal, V. K. Chandrasekar, N. Athavan: "Chimera states in coupled logistic maps with additional weak nonlocal topology," *Chaos*, 29, 053125p. (2019). DOI:10.1063/1.5084301.

[80] J. Cruz-Borbolla, E. Garcia-Ochoa, J. Narayanan, P. Maldonado-Rivas, T. Pandiyan, J. M. Vasquez-Perez: "Electrochemical and theoretical studies of the interactions of a pyridyl-based corrosion inhibitor with iron clusters (Fe<sub>15</sub>, Fe<sub>30</sub>, Fe<sub>45</sub>, and Fe<sub>60</sub>)", *Journal of Molecular Modeling*, 23(12), 342p. (2017). DOI:10.1007/s00894-017-3510-x.

[81] Y. Guan, P. J. Liu, B. N. Jin, V. Gupta, L. K. B. Li: "Nonlinear time-series analysis of thermoacoustic oscillations in a solid rocket motor", *Experimental Thermal And Fluid Science*, 98, 217–226p. (2018). DOI:10.1016/j.expthermflusci.2018.06.002.

[82] Y. Hou, C. Aldrich, K. Lepkova, B. Kinsella: "Identifying corrosion of carbon steel buried in iron ore and coal cargoes based on recurrence quantification analysis of electrochemical noise," *Electrochimica Acta*, 283, 212–220p. (2018). DOI:10.1016/j.electacta.2018.06.129.

[83] P. Lajmert, R. Rusinek, B. Kruszynski: "Chatter identification in milling of Inconel 625 based on recurrence plot technique and Hilbert vibration decomposition", *MATEC Web of Conferences*, 148, 09003p. (2018). DOI:10.1051/mateconf/201814809003.

[84] N. V. Manyakov, A. Bangerter, M. Chatterjee, L. Mason, S. Ness, D. Lewin, A. Skalkin, M. Boice, M. S. Goodwin, G. Dawson, R. Hendren, B. Leventhal, F. Shic, G. Pandina: "Visual Exploration in Autism Spectrum Disorder: Exploring Age Differences and Dynamic Features Using Recurrence Quantification Analysis," *Autism Research*, 11(11), 1554–1566p. (2018). DOI:10.1002/aur.2021.

[85] Hsueh, Y.; Ittangihala, V.R.; Wu, W.-B.; Chang, H.-C.; Kuo, C.-C. Condition Monitor "System for Rotation Machine by CNN with Recurrence Plot." *Energies* 2019, 12, 3221.

[86] S. Devendiran, K. Manivannan; "Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies For Bearing and Gear Components-A Review;" *International Journal of Applied Engineering Research* ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 6 (2016) pp 3966-3975.

[86] X. Liu, M. Li, S. Qin, X. Ma, and W. Wang, "A predictive fault diagnose method of wind turbine based on k-means clustering and neural networks," *Journal of Internet Technology*, vol. 17, no. 7, pp. 1521–1528, 2016.

[87] T. Liu, "Fault diagnosis of gearbox by selective ensemble learning based on



artificial immune algorithm," vol. 85, pp. 460–464, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 2016.

[88] Qin, A., Hu, Q., Lv, Y., & Zhang, Q. (2018). "Concurrent Fault Diagnosis Based on Bayesian Discriminating Analysis and Time Series Analysis with Dimensionless Parameters." *IEEE Sensors Journal*, 1–1. doi:10.1109/jsen.2018.2885377.

[89] N. Marwan, M. C. Romano, M. Thiel, J. Kurths: "Recurrence Plots for the Analysis of Complex Systems," *Physics Reports*, 438(5-6), 237-329.



# **REDUCCIÓN Y EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS FACIALES EN IMÁGENES UTILIZANDO ANÁLISIS DISCRIMINANTE LINEAL (LDA) Y ANÁLISIS DEL COMPONENTE PRINCIPAL (PCA)**

---

Reduction and Extraction of Facial Features in Images Using Linear Discriminant Analysis (LDA) and Principal Component Analysis (PCA)

Francisco Emiliano Aguayo Serrano<sup>1</sup>, Jesús Carlos Pedraza Ortega<sup>1</sup>  
Marco Antonio Aceves Fernández<sup>1</sup>, Efrén Gorrostieta Hurtado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia  
microstudio.aguayo@gmail.com



## RESUMEN

En este trabajo de investigación se muestra la implementación de dos algoritmos para la reducción y la extracción de características en imágenes: el de Análisis del Componente principal (PCA) y el de Análisis Discriminante Lineal (LDA), en la base de datos pública conocida como Cohn-Kanade (CK+), como parte del avance del trabajo de investigación de la detección y clasificación de expresiones faciales con una Máquina de Soporte Vectorial (SVM). Se prueban estos dos algoritmos debido a que son los más utilizados en la literatura, donde se demuestra de forma empírica que realizan una buena reducción en la dimensión de los datos. En este trabajo, se reporta parte de la metodología empleada para la clasificación y detección de expresiones faciales, y se resalta la importancia de reducir la escala de los datos en un espacio dimensional. Resulta de gran relevancia saber si estos datos son realmente representativos del conjunto original, y si aportan imágenes que sean representativas de las expresiones que se busca clasificar (enojo, felicidad, tristeza, miedo, sorpresa, neutral). Se demuestra que, para este caso en específico, LDA lleva a cabo una mejor agrupación de los datos, porque se aporta una gran cantidad de imágenes que representan adecuadamente cada una de las expresiones faciales; además, se trata de un algoritmo supervisado.

**Palabras clave:** IAR, Reducción, Dimensionalidad, Extracción, PCA, LDA.

## ABSTRACT

This research paper shows the implementation of two algorithms for the reduction and extraction of characteristics in images: the Principal Component Analysis (PCA) algorithm and the Linear Discriminant Analysis (LDA) algorithm, in the public database known as Cohn-Kanade (CK +) as part of the progress of the research work on the detection and classification of facial expressions

with a Support Vector Machine (SVM). These two algorithms were chosen because they are the most used in the literature, where it is empirically demonstrated that they make a good reduction in the data dimension. This paper reports a part of the methodology used for the classification and detection of facial expressions, and remarks the importance of reducing the dimension of the data in a dimensional space. It is of great relevance to know if these data are really representative of the original set, and if they contribute with images that are representative of the expressions (anger, happiness, sadness, fear, surprise, neutral) to be compared. It is shown that for this specific case, LDA carries out a better grouping of data thanks to the fact that a large number of images that represent each of the facial expressions can be provided, additionally, it is a supervised algorithm.

**Keywords:** IAR, Dimensionality, Reduction, Extraction, PCA, LDA.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se han propuesto diversas metodologías y estrategias para mejorar la clasificación de las expresiones faciales considerando 3 pasos generales: preprocesamiento, extracción de características y clasificación para imágenes 2D y 3D [1], [2], [3]. El reconocimiento de expresiones faciales es uno de los problemas más importantes para el ser humano, y al que se le ha puesto especial atención en la actualidad. Las expresiones faciales forman una pieza clave en la comunicación no verbal [4], y se ha demostrado que transmiten emociones e intenciones. Esta área es muy interesante y desafiante, ya que dichas expresiones son subjetivas e incluso parecidas en algunas situaciones; asimismo, ocasionan confusión cuando al momento de ser interpretadas. En los últimos años se han desarrollado diversos sistemas automáticos que ayudan a detectar diferentes expresiones faciales, este tipo de sistemas se caracterizan por realizar una estimación del estado emocional de una perso-



na. Tales sistemas realizan un entrenamiento a partir de un conjunto de imágenes, a las que se les aplica una etapa pre-procesamiento y, posteriormente, una extracción de características faciales. Dichas características se clasifican dentro de seis emociones consideradas como universales: felicidad, tristeza, enojo, disgusto, sorpresa y miedo; por último, se hace una predicción de la emoción que muestra la imagen. Esta técnica podría aplicarse en la publicidad, para analizar el rostro de una persona mientras visualiza ya sea un anuncio, un comercial de televisión o un producto en una tienda; también sería posible utilizarla como herramienta médica dirigida a personas con autismo o Alzheimer, donde resulta útil monitorear la expresión facial de un paciente ante un determinado estímulo, con el propósito de ayudar en el diagnóstico o seguimiento durante la enfermedad. Otra posible aplicación sería como herramienta en interrogatorios policíacos o en la evaluación psicológica de una persona.

Como ejemplo de un desarrollo de un marco de trabajo para la clasificación de expresiones faciales [5], se muestra la siguiente técnica, que consta de dos pasos: primero, una extracción de características y, posteriormente, su clasificación. A partir de una imagen de entrada, se localizan ciertos puntos de interés en un rostro con el propósito de dividirlo en siete triángulos, que serán los puntos de apoyo utilizados como descriptores base. Para la extracción de características locales y globales, se realiza una transformación de Fourier combinada con el algoritmo de Análisis Discriminante Lineal (LDA, por sus siglas en inglés), con la que se obtienen los discriminantes lineales. Después, en la parte de clasificación, se aplica un *kernel* propio en una Máquina de Soporte Vectorial (SVM, por sus siglas en inglés). Este marco de trabajo fue evaluado con las bases de datos JAFFE, Cohn-Kanade (CK) y FER-2013, donde se obtuvieron diferentes mediciones con éxito en cada una de las seis emociones evaluadas.

Una manera de implementar un sistema de reconocimiento de expresiones faciales,

es mediante la metodología [6]. En dicha metodología se aplica el algoritmo del Análisis del Componente Principal (PCA, por sus siglas en inglés) a una imagen recortada del rostro, con el objetivo de obtener sus componentes principales y reducir su dimensión. Después se lleva a cabo una extracción de características con ondas de Gabor o bien, con Patrones Locales Binarios (LBP por sus siglas en inglés). Una vez hecho esto, la información se almacena en una base de datos que luego se utiliza para realizar la clasificación de las expresiones con SVM, y así se predice en tiempo real la emoción que se muestra en la imagen (capturada con una cámara web). En el modelo propuesto se obtienen diferentes porcentajes de éxito en bases de datos públicas. Por el método de ondas de Gabor se obtuvo un porcentaje de 84.17 % en JAFFE, del 93.00 % en MMI, y del 85.83 % en Cohn Kanade. En la base de datos JAFFE se obtuvo el 88.00 %, un 88.16 % en MMI, y 96.83 % en Cohn Kanade, mediante la técnica de extracción de características LBP.

También es posible ver la implementación de un sistema automático de reconocimiento de expresiones faciales para rostros 3D en [7]. Aquí se combina la técnica de extracción de características faciales conocida como PCA, con un clasificador SVM. En dicho trabajo, se implementa un algoritmo SVM binario y otro multi-clase, con el fin de llevar a cabo la clasificación de las expresiones faciales. La tarea de extracción con 3D PCA se apoya del algoritmo Puntos de Referencia Medios (MLPs, por sus siglas en inglés), que ubica puntos en zonas del rostro y, a partir de estos puntos, realiza una alineación y extrae el rostro de una forma muy delimitada. En tal investigación se concluye que utilizar algoritmos de extracción de características, así como contar con un mayor número de rostros con más diversidad en las expresiones, es vital para llevar a cabo una mejor clasificación y ahorrar tiempo computacional. Por último, se muestra la posibilidad de mejora en el sistema, para clasificar expresiones en rostros

que muestran diferentes poses, grados de oclusión e iluminación.

En [8] se muestra una propuesta de esquema de tres pasos para un sistema de reconocimiento de expresiones faciales. El primer paso consiste en la extracción de características a través de la transformación ondulada tipo II (ripplelet-II), cuya implementación es híbrida, debido a que combina la extracción de características de apariencia y geométricas. El algoritmo ripplelet-II devuelve coeficientes de espacio dimensional alto, por tal motivo, en el segundo paso se combinan PCA y LDA con el fin de reducir la dimensión de los datos, esto devuelve un vector de 6 características y mejora el tiempo computacional. Como tercer y último paso, se clasifican las características mediante el algoritmo LS-SVM, donde se usa un kernel Función Radial Base (RBF, por sus siglas en inglés). Las pruebas y validaciones de este sistema se llevaron a cabo con bases de datos públicas conocidas como CK+ y JAFFE. A pesar de haber obtenido una tasa de éxito del 98.97 % y 99.46 % respectivamente, en dichas bases de datos públicas, no se documentan resultados con imágenes que no tengan condiciones de iluminación controladas; por ende, es de suponer que las imágenes de la vida real afectan el desempeño del sistema, esto demuestra la existencia de oportunidades de mejora.

La longitud de los datos a analizar es un problema en el rendimiento de muchos algoritmos de aprendizaje automático. Es por eso que el objetivo principal de este trabajo de investigación es reducir la cantidad de datos que un algoritmo

de aprendizaje máquina debe procesar. Se dice, entonces, que el conjunto de datos de entrada es  $d$ -dimensional, sin embargo, se busca proyectar un nuevo conjunto de datos  $k$ -dimensional, donde  $k < d$ , aquí es importante saber si el nuevo tamaño y el espacio de características representan bien a los datos. Para ilustrar lo anterior, se propone implementar dos algoritmos de extracción y reducción de características conocidos como Análisis del Componente Principal (PCA), propuesto por [9], y Análisis del Discriminante Lineal (LDA), propuesto por [10]. La investigación describe cada algoritmo para comprender su funcionamiento, y compara sus resultados con el propósito de tener un punto de partida para posteriormente elegir uno de ellos y aplicarlo a futuro con un algoritmo de clasificación; dichas implementaciones se basan en [11] para PCA y [12] para LDA.

## METODOLOGÍA

### Obtención de las imágenes

La primera adquisición de imágenes se realizó a partir de bases de datos públicas. La primera base de datos con la que se trabajó fue [13], conocida como Cohn-Kanade (CK+). Esta base de datos brinda una vasta colección de imágenes secuenciales de personas mostrando una expresión, tanto en forma de pose (no espontánea) como espontánea; se parte de una expresión que va de un estado neutral, hasta exhibir una expresión facial que denote una emoción en específico, tal y como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Extracto de imágenes con signos de sorpresa de la base de datos pública Cohn-Kanade (CK+).



Esta base de datos tiene un número distinto de secuencias y expresiones en cada persona; asimismo, cada individuo cuenta con un número diferente de expresiones faciales denotando una misma emoción. Por ende, se decidió seleccionar de forma discrecional las imágenes que mejor representen una emoción en concreto. El procedimiento y criterios fueron los siguientes: 1) seleccionar tres imágenes de cada individuo que muestren diferentes intensidades de una emoción, 2) no tomar en cuenta que en cada tipo de expresión facial aparezca el mismo individuo (debido a la inconsistencia de la base de datos); 3) separar las imágenes tomando en cuenta únicamente las expresiones faciales.

Tal y como se muestra en la figura 2, se tienen separadas 66 imágenes del mismo tipo de emoción que reflejan 3 tipos de intensidades por persona: un total de 22 personas distintas mostrando una misma emoción con tres diferentes intensidades.

Tras haber extraído manualmente cada una de las imágenes de la base de datos Cohn-Kanade (CK+), se separaron dichas imágenes en 6 carpetas nombradas a partir del nombre de las emociones conocidas como enojo, felicidad, miedo, neutral, sorpresa y tristeza, tal y como se muestra en la figura 4. Así resultó una nueva base de datos con un total de 396 imágenes de 640 x 490 píxeles cada una.



**Figura 2.** Extracción de rostros con rasgos visibles de sorpresa.



**Figura 3.** Carpetas donde se almacenan las imágenes que forman la base de datos pública Cohn-Kanade (CK+).



**Figura 4.** Extracción de rostros con rasgos visibles de sorpresa.

## Extracción de rostros

Una vez obtenidas las imágenes en la etapa de adquisición, se procedió a la extracción del rostro de cada una de las imágenes de las bases de datos. Se desarrolló un algoritmo que realiza esta tarea de forma automática a partir del algoritmo propuesto por [14], las imágenes están almacenadas en el disco local en un directorio llamado BaseDeDatos. Dentro de este directorio se encuentran las demás carpetas con las imágenes clasificadas manualmente, tal como se muestra en la figura 3. Este algoritmo itera a través de cada una de las carpetas de la base de datos y procede a leer cada una de las imágenes que están almacenadas. Posteriormente, detecta el rostro y realiza un recorte de la zona de interés, la redimensiona a  $50 \times 50$  píxeles, la convierte a escala de grises y la almacena en la ubicación de salida. Al terminar de procesar todas las imágenes de una carpeta, se actualiza la ubicación de salida para guardar el siguiente conjunto de imágenes en otra carpeta y continuar con el proceso en el resto de carpetas e imágenes. El acervo total cuenta con 396 imágenes de  $50 \times 50$  píxeles, separadas en 6 carpetas.

Las razones para procesar las imágenes de esta forma fueron las siguientes:

- Detectar la zona del rostro ayuda a eliminar aquellas zonas de la imagen que no son relevantes para distinguir expresiones faciales.
- Una imagen de 2500 píxeles es una buena representación del rostro y no se pierde información relevante que ayude a identificar distintas expresiones faciales.
- A pesar de que algunas imágenes parecen estar en escala de grises, la imagen realmente tiene los 3 canales de color; al convertirla a escala de grises, se reduce considerablemente el tiempo de procesamiento.

## Preparar el conjunto de entrenamiento

El conjunto de nuevos datos formados consta de 396 filas y 2500 columnas. Las imágenes de  $50 \times 50$  píxeles forman las 2500 columnas, además se añade una columna de etiqueta adicional que es esencialmente una etiqueta de clase para indicar si la instancia de cada fila pertenece a una clase (1 enojo, 2 felicidad, 3 tristeza, 4 sorpresa, 5 miedo, 6 neutral). Cada componente de la fila contiene un valor entre 0 y 255, esto describe la intensidad de cada píxel, tal como se muestra en la figura 5.



	label	pixel0	pixel1	pixel2	pixel3	pixel4	pixel5	pixel6	pixel7	pixel8	...
83	2	34.0	23.0	21.0	24.0	19.0	21.0	31.0	31.0	40.0	...
84	2	58.0	73.0	53.0	31.0	35.0	28.0	19.0	19.0	19.0	...
386	6	62.0	83.0	79.0	76.0	77.0	53.0	49.0	53.0	53.0	...
387	6	62.0	80.0	79.0	81.0	76.0	59.0	48.0	51.0	53.0	...
388	6	65.0	80.0	79.0	82.0	75.0	63.0	49.0	53.0	55.0	...
389	6	53.0	65.0	67.0	66.0	56.0	36.0	15.0	14.0	13.0	...
390	6	54.0	68.0	65.0	65.0	54.0	31.0	15.0	15.0	13.0	...
391	6	55.0	67.0	66.0	62.0	50.0	24.0	14.0	15.0	16.0	...
392	6	23.0	23.0	22.0	25.0	32.0	37.0	41.0	43.0	74.0	...
393	6	24.0	19.0	20.0	23.0	27.0	34.0	40.0	39.0	71.0	...
394	6	22.0	20.0	20.0	27.0	30.0	39.0	41.0	41.0	70.0	...
395	6	127.0	134.0	87.0	63.0	63.0	55.0	39.0	64.0	88.0	...
0	1	1.0	63.0	38.0	50.0	47.0	34.0	34.0	35.0	46.0	...
1	1	64.0	82.0	56.0	40.0	50.0	48.0	33.0	30.0	41.0	...
2	1	61.0	73.0	41.0	43.0	49.0	38.0	31.0	35.0	41.0	...

Figura 5. Representación de las imágenes de la base de datos usada en forma de tabla.

## Análisis Discriminante Lineal

Es uno de los algoritmos supervisados más populares para la reducción de la dimensión de los datos en el preprocesamiento de grandes cantidades de información, que posteriormente es procesada por un algoritmo de clasificación de patrones o máquina de aprendizaje. El objetivo de este algoritmo es hacer una proyección de los datos originales dentro de un nuevo subespacio de características que sea de una menor dimensión, para lograr una buena reducción de la información y, al mismo tiempo, conseguir una mejor separación entre los datos.

Debido a que LDA toma en cuenta *a priori* la naturaleza de los datos —es decir, los clasifica antes—, maximiza la separación con el propósito de evitar el sobreajuste en el algoritmo de clasificación y, de esa manera, reduce los costos computacionales. La implementación del algoritmo de LDA puede ser resumida en los 5 pasos que se muestran a continuación:

1. Calcular los vectores promedio  $d$ -dimensional para cada clase  $\mu_i$ , así como el vector promedio de todas las imágenes  $\mu$ .

$$\mu_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k \in D_i} x_k \quad (1)$$

Donde  $i$  representa la clase y  $x_k$  el elemento actual de la clase.

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

2. Calcular la matriz de dispersión dentro de la clase  $S_B$  y la matriz de dispersión entre clase  $S_W$ .

$$S_W = \sum_{i=1}^c \sum_{x \in X_i} (x_k - \mu_i)(x_k - \mu_i)^T \quad (3)$$

$$S_B = \sum_{i=1}^c N_i (\mu_i - \mu)(\mu_i - \mu)^T \quad (4)$$

3. Calcular los vectores propios y sus valores correspondientes de las matrices de dispersión.

$$Av = \lambda v \quad (5)$$

Donde  $A = S_W^{-1}S_B$ ;  $v$  es el vector propio y  $\lambda$  el valor propio.

4. Ordenar los vectores propios según el orden descendente de sus respectivos valores y elegir los  $k$  vectores propios con los valores más grandes para así formar la matriz  $W$  de  $d \times k$ , donde cada columna del vector  $W$  representa un vector propio.
5. Usar la matriz  $W$  para transformar los ejemplos (datos de entrada) en un nuevo subespacio de características. Para conseguir esto, se realiza la siguiente operación:  $Y = W \times X$ , donde  $X$  es la matriz  $d$ -dimensional que representa el conjunto de datos ( $n$  ejemplos), y  $Y$  es la matriz transformada de  $n$   $d$ -dimensional en un nuevo subespacio.

### Análisis del Componente Principal

El análisis del componente principal fue implementado por primera vez con fines de reconocimiento facial en [15]; se trata de un algoritmo no supervisado que realiza una transformación lineal. Dicha técnica tiene diversas aplicaciones, ya sea predicción de datos en mercado de valores, análisis de datos de expresión genética, reconocimiento facial, u otras. Al ser un algoritmo no su-

pervisado, el objetivo principal de PCA es identificar patrones en los datos, debido a que no se conoce su tipo *a priori*. El propósito de este algoritmo es encontrar una correlación entre las variables para separarlos y reducir el tamaño de los datos. Es decir, es posible declarar que PCA encuentra las direcciones de máxima varianza de datos de alta dimensión y los proyecta en un nuevo subespacio de características más pequeño, al mismo tiempo que conserva la mayor parte de la información, ya que el método PCA busca obtener las direcciones óptimas (vectores propios) que capturan la mayor varianza. En la figura 6 se muestran las 60 direcciones óptimas o ejes de componentes principales que se generaron con el método PCA en forma de imágenes para el conjunto de datos. Es imposible visualizar de una forma gráfica el primer componente desde el valor propio 1 hasta el valor propio 60, ya que se generan direcciones o componentes más complicados en la búsqueda para maximizar la varianza en el nuevo subespacio de características. La implementación del algoritmo de PCA puede ser resumida en los 4 pasos que se muestran a continuación:

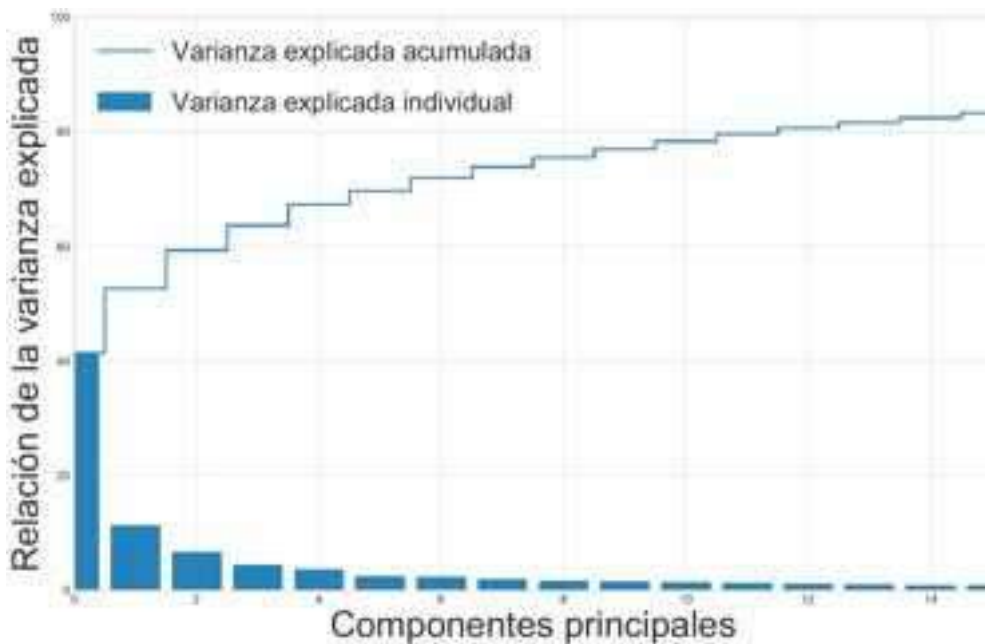
1. Obtener los vectores y valores propios de la matriz de covarianza o matriz de correlación.
2. Ordenar los valores propios en orden descendente y elegir los  $k$  vectores propios que corresponden a los  $k$  valores propios más grandes, donde  $k$  es el número de dimensiones del nuevo subespacio de entidad ( $k < d$ ).
3. Construir la matriz de proyección  $W$  de los  $k$  vectores propios seleccionados.
4. Transformar el conjunto de datos original  $X$  a través de  $W$ , para obtener un subespacio de característica  $k$ -dimensional  $Y$ .



**Figura 6.** Direcciones óptimas de los componentes principales que el algoritmo devuelve.

Los vectores propios son la dirección de la distorsión y los valores propios son el factor de escala para los vectores propios que describen la magnitud de la distorsión. Los vectores propios son importantes, ya que son los que forman los ejes del nuevo subespacio de características, y los valores propios de la magnitud son los nuevos ejes. En la figura 7, de las 2500 características o columnas

(píxeles), se muestra claramente que la mayor parte de la varianza es del 41.39 %, que puede explicarse sólo por el primer componente principal, el segundo componente principal contiene 11.28 % de información, mientras que el tercer componente contiene el 6.67 %. Los tres componentes juntos contienen el 63.72 % de la información.



**Figura 7.** Distribución de las varianzas explicadas en los componentes principales.

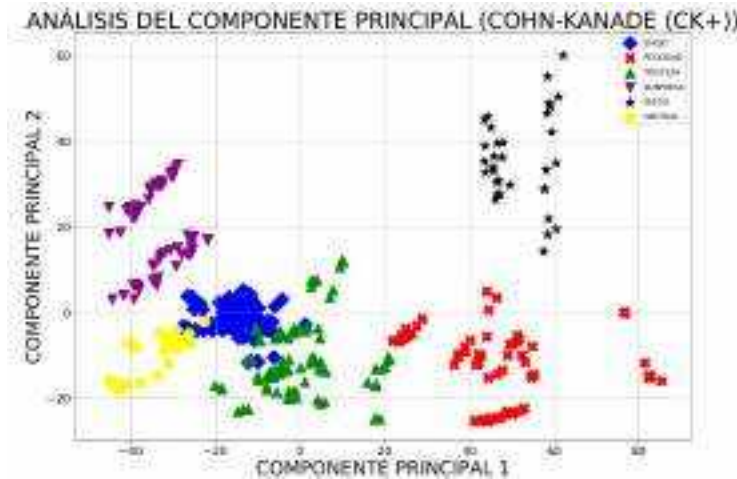


## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

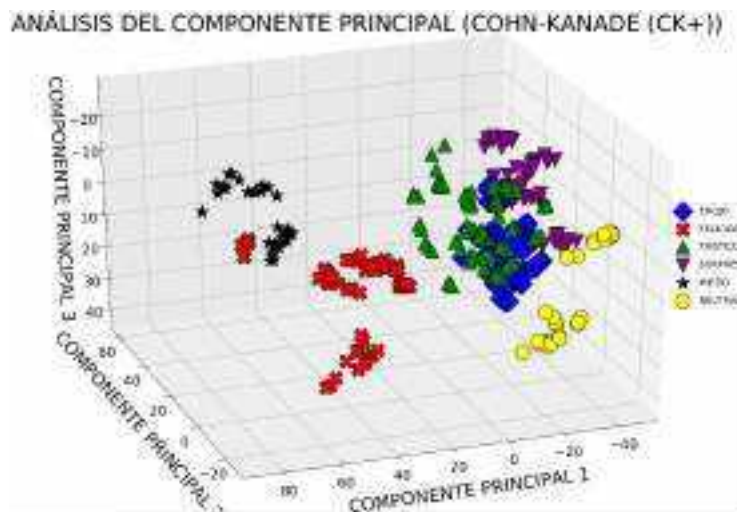
Tanto el Análisis discriminante lineal (LDA) como el PCA realizan una transformación lineal. PCA produce direcciones (componentes principales) que maximizan la varianza, mientras que LDA también busca encontrar las direcciones que maximicen la separación (discriminantes lineales) entre diferentes clases. LDA puede ser más útil en el problema de clasificación de patrones, debido a que PCA ignora las etiquetas de clase. En otras palabras, PCA proyecta todo el conjunto de datos en un subespacio de características diferentes, en cambio, LDA intenta determinar

un subespacio de características para distinguir entre patrones que pertenecen a diferentes clases.

En las figuras 8 y 9, es posible ver los primeros 2 y 3 componentes principales, respectivamente, que representan el 63.72 % de la información, dependiendo de los resultados que se deseen obtener. Como se sabe que PCA encuentra los ejes con la máxima varianza para todo el conjunto de datos, mientras que LDA intenta encontrar los ejes para la mejor capacidad de clase, en la práctica se realiza a menudo un LDA seguido de un PCA para la reducción de la dimensión de



**Figura 8.** Proyección de Cohn-Kanade (CK+) en un nuevo espacio de 2 dimensiones con PCA.



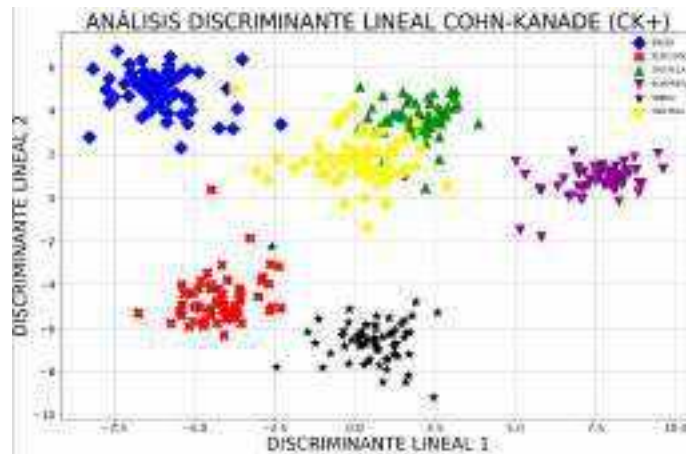
**Figura 9.** Proyección de Cohn-Kanade (CK+) en un nuevo espacio de 3 dimensiones con PCA.



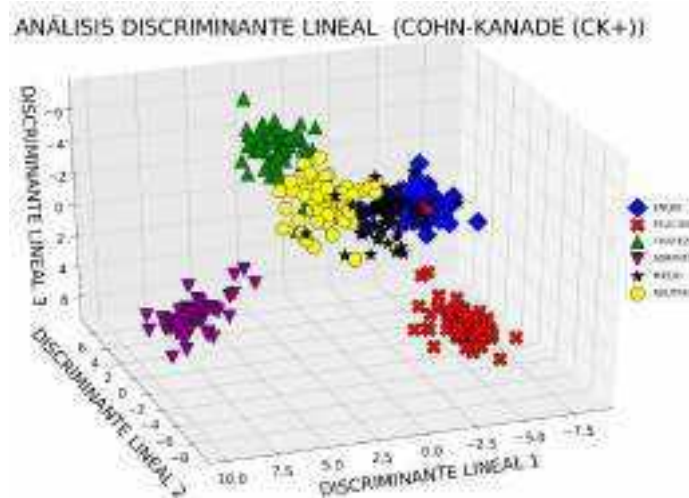
los datos. El objetivo de LDA es preservar la información de separación de clases sin dejar de reducir las dimensiones del conjunto de datos.

En la figura 10, es posible ver que los puntos de datos se agrupan mejor cuando se usa LDA, en comparación con la implementación de PCA con etiquetas de clase; ésta es una ventaja inherente para supervisar el método. Al contrastar las figuras 8 y 10, es claro que PCA representa la mayor variación en todo el conjunto de datos, mientras que el algoritmo

LDA y sus ejes explican la mayor variación entre las clases individuales. La implementación de LDA es muy similar a la de PCA, por lo cual se llama a los métodos de ajuste y transformación, que ajustan el modelo LDA con los datos, y luego se realiza una transformación mediante la reducción de dimensión de LDA. Sin embargo, dado que LDA es un algoritmo de aprendizaje supervisado, hay un segundo argumento que el usuario debe proporcionar para el método: las etiquetas de clase, es decir, las etiquetas de las emociones.



**Figura 10.** Proyección de Cohn-Kanade (CK+) en un nuevo espacio de 2 dimensiones con LDA.



**Figura 11.** Proyección de Cohn-Kanade (CK+) en un nuevo espacio de 3 dimensiones con LDA.

## CONCLUSIONES

El trabajo demostró que LDA fue superior a PCA al momento de reducir y extraer las características de las imágenes de la base de datos pública Cohn-Kanade (CK+), debido a que conocen las etiquetas de clase, aunque no siempre es así. Por ejemplo, en las comparaciones entre las precisiones de clasificación para el reconocimiento de imágenes, PCA tiende a superar a LDA si el número de muestras por clase es relativamente pequeño [16]. Varios experimentos en distintos trabajos muestran la superioridad de PCA sobre LDA, mientras que otros muestran lo contrario.

Cuando PCA supera a LDA, el número de muestras de entrenamiento por clase es pequeño, pero no es atípico de los tamaños de datos utilizados previamente por algunos investigadores.

Debido a que en este trabajo se reporta únicamente la parte de una metodología más compleja donde se busca detectar y clasificar expresiones faciales, la investigación se enfoca sólo en la extracción y reducción de las características en imágenes. Se plantea como trabajo futuro utilizar este avance como referencia; el siguiente paso es realizar una clasificación de expresiones faciales a través de una máquina de soporte vectorial con varios tipos de núcleos, y así llevar a cabo la detección de expresiones faciales en un sistema más elaborado.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca recibida durante los dos años en la Maestría en Ciencias de Inteligencia Artificial. Asimismo, a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por el apoyo de la beca de inscripción durante el mismo periodo, así como por la infraestructura prestada. Por último, al investigador y profesor de tiempo completo, Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega, por dirigir este trabajo de investigación.

## REFERENCIAS

- [1] S. Li, W. Deng, "Deep facial expression recognition: A survey," *arXiv preprint arXiv:180408348*, 2018.
- [2] I.M. Revina and W.S. Emmanuel: "A survey on human face expression recognition techniques", *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2018.
- [3] F. Nonis, N. Dagnes, F. Marcolin and E. Vezzetti, "3d approaches and challenges in facial expression recognition algorithms: A literature review", *Applied Sciences*, vol. 9, no.18, pp. 3904, 2009.
- [4] Y. O. López, *Inteligencia emocional*. México D. F.: Plaza y Valdes, 2000.
- [5] J. H. Shah, M. Sharif, M. Yasmin, and S. L. Fernandes, "Facial expressions classification and false label reduction using lda and threefold svm," *Pattern Recognition Letters*, 2017.
- [6] S. Bellamkonda and N. Gopalan, "A facial expression recognition model using support vector machines" *Int. Jour. of Math. Sci. Comp.*, vol 4, pp. 56-65, 2018.
- [7] M. J. Leo and S. Suchitra, "Svm based expression-invariant 3d face recognition system," *Procedia computer science*, vol. 143, pp. 619–625, 2018.
- [8] N. B. Kar, K. S. Babu, A. K. Sangaiah, and S. Bakshi, "Face expression recognition system based on ripplelet transform type ii and least square svm," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 78, no. 4, pp. 4789–4812, 2019.
- [9] S. Wold, K. Esbensen, and P. Geladi, "Principal component analysis chemometrics and intelligent laboratory systems 2," in *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation Efta Volume*, vol. 2, no. 2, 1987.
- [10] R. A. Fisher, "The use of multiple measurements in taxonomic problems," *Annals of eugenics*, vol. 7, no. 2, pp. 179–188, 1936.
- [11] S. Raschka, *Python machine learning*. Packt Publishing Ltd, 2015.
- [12] S. Raschka, "Principal component analysis in 3 simple steps," Sebastianraschka.com, (Retrieved October, 2015).



[13] T. Kanade, J. F. Cohn, and Y. Tian, "Comprehensive database for facial expression analysis," in *Proceedings Fourth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (Cat. No. PR00580)*. IEEE, pp. 46–53, 2000.

[14] P. Viola and M. Jones, "Rapid object detection using a boosted cascade of simple features," *CVPR(1)*, vol. 1, no. 511-518, p. 3, 2001.

[15] K. Pearson, "LIII. on lines and planes of closest fit to systems of points in space," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 2, no. 11, pp. 559–572, 1901.

[16] A. C. Kak and A. Martinez, "Pca versus lda," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 23, no. 2, pp. 228–233, 2001.



# AVANCES EN EL USO DE MEMBRANAS SINTÉTICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA

---

Advances in the Use of Synthetic Membranes for Water Treatment

Estefanía Espinoza Márquez<sup>\*1</sup>, Genaro Martín Soto Zarazúa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia  
e\_espinozam@hotmail.com

## RESUMEN

En el presente artículo se revisan los progresos de la tecnología de membranas para su aplicación en los procesos de tratamiento de agua y su potencial para generar sistemas de reutilización y potabilización mediante estrategias más eficientes y costeables que las convencionales. Los avances en el área de nanomateriales han ofrecido la posibilidad de manipular las características físicas y químicas de las membranas para mejorar su permeabilidad y selectividad a cierto tipo de contaminantes y disminuir el problema de incrustación, el cual es su principal factor de disminución de rendimiento. El objetivo de esta revisión es describir cómo los avances en la ciencia de materiales y nanotecnología, integrados con la tecnología de membranas para el tratamiento de agua, permiten disminuir el problema de incrustación en membranas, así como mejorar la selectividad de contaminantes, por lo que demuestran ser una estrategia efectiva para optimizar los procesos de tratamiento existentes y hacer viable el desarrollo de sistemas de bajo consumo de energía con un uso más eficiente de los recursos.

**Palabras clave:** Membrana, nanomateriales, nanofibras, tratamiento de agua, incrustamiento, procesos integrados

## ABSTRACT

This paper reviews the progress of membrane technology for its application in water treatment processes and its potential to generate reuse and purification systems through more efficient and affordable strategies than conventional ones. Advances in the area of nanomaterials have offered the possibility of manipulating the physical and chemical characteristics of the membranes to improve their permeability and selectivity to certain types of pollutants and reduce the problem of fouling, which is their main factor of decrease in performance. The objective of

this review is to describe how advances in materials science and nanotechnology integrated with membrane technology for water treatment reduce the problem of membrane fouling, as well as improve the selectivity of contaminants, thus proving to be an effective strategy to optimize the existing treatment processes, and enabling the development of low energy consumption systems with a more efficient use of resources.

**Keywords:** membrane, nanomaterials, nanofibers, water treatment, fouling, integrated processes.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de desarrollar sistemas de tratamiento de agua mediante la integración de tecnología avanzada que optimice los rendimientos y recuperen energía y recursos ha surgido a raíz de que el manejo convencional del agua es cada vez más difícil de sostener, debido a factores que impiden el suficiente abasto de los suministros públicos, tales como el crecimiento de la población, la urbanización y el cambio climático [1].

Las aguas superficiales y subterráneas se extraen del medio ambiente, a menudo, desde ubicaciones remotas y se transportan a las áreas urbanas, donde tras su recolección, uso y tratamiento, su calidad inicial disminuye; posteriormente, se transportan y descargan de vuelta al medio ambiente en lugares alejados. Este modo de manejo del agua se conoce como sistema lineal, y se requiere de un esfuerzo inmenso y nuevas estrategias para conseguir un sistema de recuperación y reciclaje que haga un uso óptimo del agua, la energía y los nutrientes en el sistema de agua urbano para satisfacer las cambiantes necesidades [2].

Una forma de lograr este objetivo es mediante el aumento de la reutilización del agua, para lo que es necesario crear un modelo de infraestructura avanzada con diseños de sistemas orientados a este fin específico. Por lo tanto, se deben desarrollar sistemas integrados para diseñar nuevas



plantas de tratamiento de aguas que optimicen los rendimientos y recuperen energía y recursos [1]. La creación de instalaciones que tomen estas consideraciones se reflejará en el valor del agua, nutrientes, energía y otros recursos; además, garantizará la calidad requerida de los efluentes.

Esta revisión tiene el objetivo de ilustrar cómo el uso de la tecnología de membrana para el tratamiento de agua ha logrado aumentar su versatilidad a través de los avances en el área de materiales y la nanotecnología, lo que hace viable el desarrollo de sistemas que permiten no sólo la descontaminación del agua, sino el aumento de su eficiencia, el ahorro de energía, la recuperación de nutrientes y su adaptabilidad a los sistemas de tratamiento existentes para lograr la optimización de estos.

## Principio del Tratamientos de Agua

El tratamiento del agua puede definirse como el procesamiento de ésta para proporcionarle una calidad que cumpla con los estándares establecidos por el usuario final o una comunidad a través de sus agencias reguladoras. Tradicionalmente los tratamientos de agua están compuestos por la combinación de distintos procesos unitarios que resultan en tres fases: 1) el tratamiento primario, que incluye procesos de purificación de naturaleza física y química; 2) el secundario, que consta del tratamiento biológico de las aguas residuales; y 3) el tratamiento terciario, en el cual el agua se convierte en agua de alta calidad que puede utilizarse para diferentes tipos de propósitos, es decir, para consumo humano y uso industrial, medicinal y agrícola [3]. Los procesos

**Tabla 1.** Procesos unitarios del tratamiento de agua.

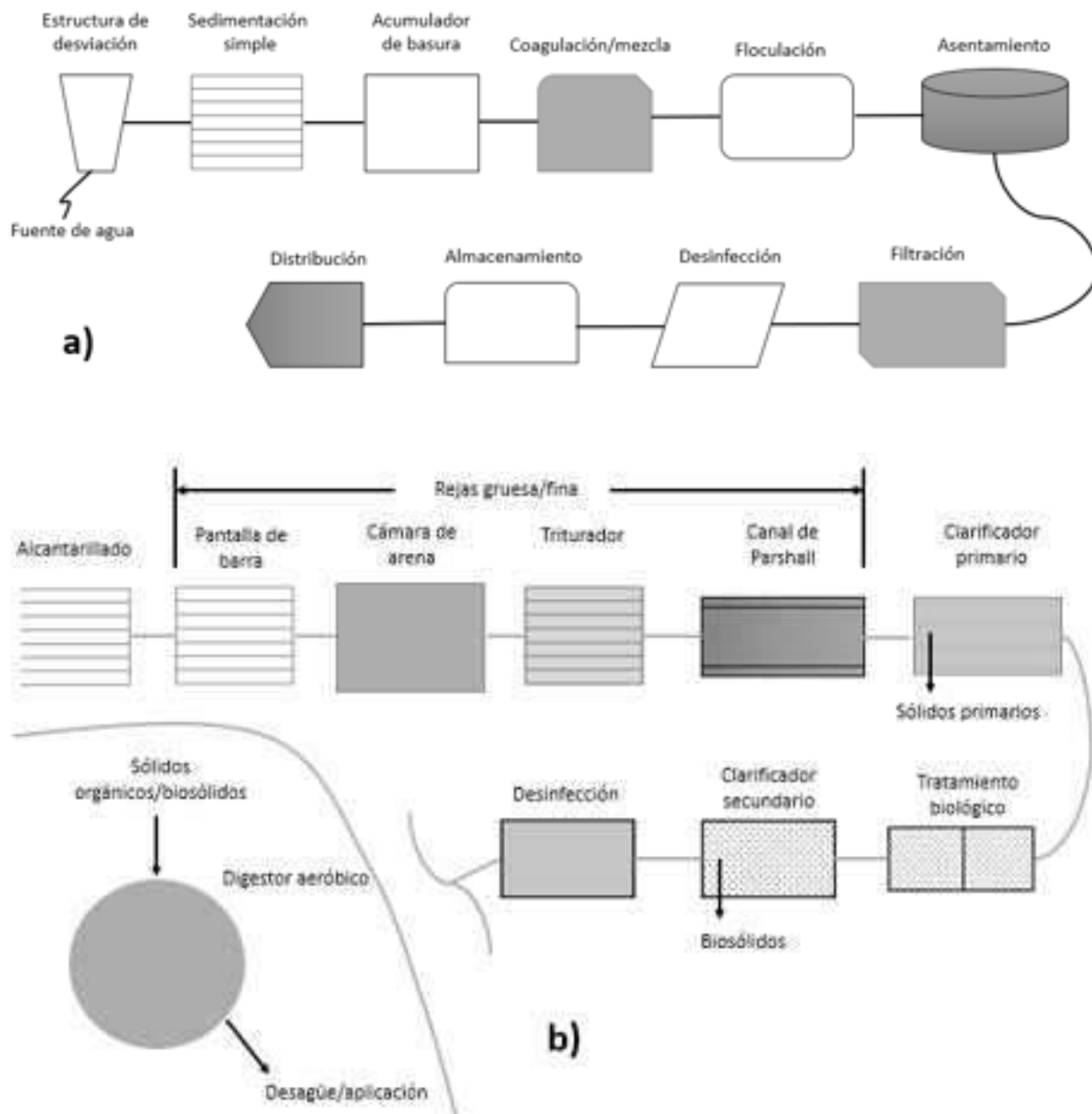
Proceso	Descripción
Cribado	La retención de una sustancia por una pantalla que tiene un tamaño de malla más pequeño que la sustancia a retener.
Gravedad de asentamiento	Una partícula que cae bajo la influencia de la gravedad se llama sedimentación.
Coagulación	La neutralización de carga de un coloide cargado negativamente, generalmente por medios químicos, como el uso de alumbre o compuestos férricos.
Floculación	Un proceso unitario que promueve colisiones entre partículas que se unen entre sí al contacto, creciendo en tamaño para aumentar la velocidad de asentamiento.
Filtración	La convección de una corriente de agua a través de un medio poroso con la intención de retener partículas suspendidas dentro del medio.
Transferencia de gas	El transporte de gas entre la fase disuelta en agua y una fase gaseosa.
Adsorción	La unión de una molécula a un sitio de adsorción proporcionado por la superficie interna de un material adsorbente. El carbón activado es el adsorbente más conocido para un sistema de ingeniería, aunque prácticamente cualquier material sólido puede proporcionar sitios de adsorción.
Separación de membranas	Microfiltración, Ultrafiltración, Nanofiltración, Ósmosis inversa.



unitarios del tratamiento del agua se definen como un sistema diseñado para efectuar ciertos cambios de estado previstos para el agua; éstos se incluyen en la Tabla 1 [5].

Los procesos unitarios se combinan para formar los trenes de tratamiento, cuyas combinaciones pueden llegar a ser muy numerosas. Los más comunes son (a) para agua potable y (b) para aguas residuales, como se muestra en la figura 1 [4].

Dentro de los procesos unitarios, pueden incluirse los tratamientos terciarios para mejorar la calidad del agua final. El tratamiento terciario exige una calidad más alta y, por lo tanto, requiere la aplicación de métodos más sofisticados y costosos. La tecnología de membrana tiene un gran potencial para acortar y simplificar las largas cadenas de tratamiento de los procesos unitarios fisicoquímicos y biológicos necesarios para satisfacer estrictos criterios de calidad del agua.



**Figura 1.** Ejemplo de trenes de tratamiento: (a) agua potable; (b) aguas residuales municipales.



## Tecnología de Membranas para el tratamiento de agua

El término “membrana” se define como una barrera que separa dos corrientes de fluido y facilita el transporte de masa selectiva entre estas dos corrientes [5]. La tecnología de membrana se ha convertido en una importante técnica de separación en las últimas décadas. Ésta tiene una amplia aplicación industrial tanto en gestión del agua como en tecnología química y se utiliza en una extensa gama de aplicaciones [6]. La tecnología de membrana se aplica a varios procesos de separación, cada uno de los cuales utiliza un tipo distinto de membrana y los detalles del método difieren [7]. En general, las membranas son capas delgadas que pueden tener estructuras significativamente diferentes, pero todas tienen la característica común de transporte selectivo a diferentes componentes en una alimentación. Las membranas pueden ser homogéneas o heterogéneas, simétricas o asimétricas y porosas o no porosas. La alta porosidad, el tamaño de poro ajustable, la distribución del tamaño de poro, la amplia gama de materiales elegidos y la funcionalización de la superficie disponible han proporcionado la flexibilidad de diseñar a medida las membranas para numerosas aplicaciones, existentes y emergentes [8]. Según sus aplicaciones técnicas pueden clasificarse por las características que se muestran en la Tabla 2 [9]:

Hoy en día, la membrana ha ganado una amplia aceptación e importancia en diversas áreas debido a la flexibilidad y la fiabilidad del rendimiento de su sistema, la competitividad de costos, la creciente demanda y la conciencia ambiental; además, tiene diseño modular y bajos costos operativos [9]. Los procesos de filtración por membrana son reconocidos como las tecnologías más efectivas para la reutilización y recuperación de aguas residuales gracias a sus excelentes resultados, especialmente para la eliminación de micro contaminantes [10], [11]. Dadas las características inherentes de las membranas, no se necesitan aditivos químicos, insumos térmicos ni regeneración de vida media gastada, lo que las hace más populares que otras tecnologías de tratamiento de aguas [12]. Los avances recientes de estas membranas para aplicaciones de filtración de agua incluyen microfiltración (MF) ( $d = 50\text{--}500\text{ nm}$ ), ultrafiltración (UF) ( $d = 2\text{--}50\text{ nm}$ ), nanofiltración (NF) ( $d = 1\text{--}2\text{ nm}$ ) y ósmosis inversa (OI) ( $d < 1\text{ nm}$ ) (Figura 2) [13]; todos ellos son procesos de membrana impulsados por presión que se aplican con frecuencia en plantas de tratamiento de agua [14]. La filtración por membrana permite el paso de solventes de agua pero rechaza solutos, gases, fluidos y varias partículas presentes en el agua contaminada. Como regla general, la MF es adecuada para la eliminación de sólidos en suspensión, incluidos microorga-

**Tabla 2.** Características de las membranas.

Características de las membranas	
Material que la compone	Polímeros orgánicos, materiales inorgánicos (óxidos, cerámicas, metales), matriz mixta o materiales compuestos.
Sección transversal	Isotrópico (simétrico), integralmente anisotrópico (asimétrico) o compuesto de matriz mixta.
Método de preparación	Separación de fases (inversión de fase) del polímero, proceso sol-gel, reacción de interfaz, estiramiento, extrusión, grabado de huellas o micro fabricación
Forma de membrana	Lámina plana, fibra hueca, capilar, tubular o cápsula

nismos como los protozoos y las bacterias; se requiere UF para la eliminación de virus y macromoléculas orgánicas hasta un tamaño alrededor de 20 nm; el NF puede eliminar los iones orgánicos más pequeños y los iones multivalentes; mientras que la OI es adecuada incluso para la eliminación de todas las especies disueltas (0.2 –0.4 nm), hasta los iones monovalentes [11], [15]. Tanto el agua de mar, que presenta concentraciones de sales de 30,000–40,000 mg/l, como el agua salobre, con concentración de 500–17,000 mg/l, se pueden desalinizar mediante un proceso de OI: aproximadamente 19 % de las plantas de desalinización del mundo han instalado con éxito la membrana de OI [16], [17].

La (OI) tiene aceptación mundial en aplicaciones de tratamiento de agua y desalinización. Es un proceso impulsado por la presión mediante el cual una membrana semipermeable rechaza los componentes disueltos presentes en el agua de alimentación. Este rechazo se debe a la exclusión de tamaño, la exclusión de carga y las interacciones físicoquímicas entre soluto, disolvente y membrana [3], [18]. La eficiencia del proceso depende de los parámetros operativos y de las propiedades de la membrana y el agua de alimentación [11]. Aunque el gasto de energía que requieren los procesos de OI es

alto, el consumo promedio de energía en las plantas de DOI (desalinización por ósmosis inversa) se ha reducido a un quinto durante estos 40 años gracias a los avances en la tecnología de membranas y a la implementación de nanomateriales para aumentar su eficiencia y selectividad [19]. Si el objetivo es producir agua potable, se puede agregar OI junto con varios otros procesos de filtración con tecnologías de membranas [4].

### Incrustación en membranas

El principal obstáculo para la aplicación de los procesos de membrana para el tratamiento de agua es la rápida disminución del flujo de permeado y, por lo tanto, de la eficiencia de la filtración a lo largo del tiempo como resultado de la incrustación en la membrana [20], [21]. La incrustación se refiere a la acumulación de contaminantes en la superficie o dentro de la matriz porosa de una membrana [22]. Conseguir un sistema de tratamiento de agua confiable, segura, sensible y rentable se ha convertido en el aspecto más difícil de lograr respecto a la purificación y desalinización del agua [16]. La incrustación de las membranas es causada por complejas interacciones físicas y químicas entre los diversos componentes presentes en el flujo de alimentación y la superficie de la membrana;



Figura 2. Técnicas de filtración por membrana.



el transporte masivo puede conducir a la fijación, acumulación o adsorción de materiales en las superficies y/o dentro de los poros. Se ha demostrado que las características de tipo de incrustaciones están determinadas por la composición del agua de alimentación, la concentración de los principales componentes, la química del agua (pH, fuerza iónica y concentración de cationes divalentes), las propiedades de la membrana (morfología de la superficie, hidrofobia, carga y corte de peso molecular), temperatura, modo de operación y condiciones hidrodinámicas (flujo de permeado inicial y velocidad de flujo cruzado) [23]. Por lo tanto, cualquier factor que pueda cambiar las características hidrodinámicas de los módulos de membrana y las características químicas de las aguas de alimentación afectaría el rendimiento general de la membrana. En consecuencia, los efectos físicos y químicos combinados controlarán la gravedad de la incrustación y qué estrategias serán efectivas para controlarla [21]. Los contaminantes que generan la incrustación se pueden clasificar en las siguientes cuatro categorías [21]:

### **Incrustación en membranas por materia orgánica natural**

En los procesos de filtración por membranas la desinfección aún es necesaria, ya que éstas no pueden eliminar los compuestos de carbono orgánico asimilable (COA), que son uno de los factores más importantes que afectan el nuevo crecimiento de microorganismos en el agua potable y promueven el taponamiento sobre ellas [24], [25]. Al ser estos componentes de degradación biológica lenta, los tratamientos de membrana se vuelven ineficaces; por lo tanto, se requieren tratamientos más específicos y avanzados.

La materia orgánica natural (MON) es uno de los componentes primarios de la incrustación en la filtración de membrana a baja presión, y puede presentarse sola o mezclada con partículas coloidales. La MON es una mezcla compleja de productos orgánicos disueltos en partículas generada por la descomposición microbiana de plantas y vegetales, cuyas características varían de una fuente de agua a otra. Tiene una amplia gama de distribuciones en peso molecular (PM) y grupos funcionales (fenólicos, hidroxilo y

**Tabla 3.** Contaminantes formadores de incrustación en membranas.

<b>Partículas</b>	Las partículas / coloides inorgánicos u orgánicos actúan como contaminantes que pueden cegar físicamente la superficie de la membrana y bloquear los poros, o dificultar el transporte a la superficie mediante el desarrollo de una capa de torta.
<b>Orgánicos</b>	Componentes disueltos y coloides (por ejemplo, ácidos húmicos y fúlvicos, materiales y proteínas hidrofílicas e hidrofóbicas) que se unirían a la membrana por adsorción.
<b>Inorgánicos</b>	Componentes disueltos (por ejemplo, hierro, manganeso y sílice) que tienden a precipitarse sobre la superficie de la membrana debido al cambio de pH o a la oxidación. Los residuos coagulantes / floculantes también pueden estar presentes como contaminantes inorgánicos.
<b>Organismos microbiológicos</b>	La categoría microbiológica abarca la materia vegetal, como las algas y los microorganismos, que pueden adherirse a las membranas y causar bioincrustaciones (formación de biopelículas).

grupos carboxilo), que se origina a partir de entradas alóctonas (por ejemplo, desechos terrestres y vegetativos) y autóctonas (por ejemplo, algas). Se tiene el informe de los principales contaminantes en membranas de todo el mundo y su distribución presenta porcentajes de 50.2 % para compuestos orgánicos y 7.6, 13.5, 4.7, 3.6, 3.7, 2.6 y 14.1 para  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaPO}_4$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  y otros compuestos incrustantes, respectivamente [21].

### Métodos para reducir incrustación en membranas

Debido a la complejidad que tiene la MON y la gran cantidad de reacciones que puede presentar en las diferentes condiciones químicas del medio, es difícil determinar exactamente cómo se da su comportamiento en el fenómeno de incrustación y qué propiedades de la composición de la membrana deben modificarse para conseguir un proceso ideal que la disminuya. Se han desarrollado y probado ampliamente diversas medidas preventivas para interferir con la incrustación de MON, como el uso de pretratamientos de coagulación, la oxidación, el intercambio iónico, la adsorción de carbono y la adsorción de óxido mineral [26].

Sin embargo, se necesitan más investigaciones sobre el diseño óptimo y la operación de tales procesos y sus combinaciones, ya que pueden tener desventajas, como la necesidad de mantener condiciones muy estrictas sobre el control de las incrustaciones, la posibilidad de que las membranas se degraden, la precipitación de metales, y tener un efecto poco significativo o poca flexibilidad de operación [26].

Otros enfoques para reducir la incrustación consisten en aumentar la hidrofilia de la membrana y la integración de nanomateriales en la matriz membranal. El aumento de la hidrofilia de la membrana es una técnica que incluye la adición de polímeros hidrofílicos a la solución de moldeo, la inmovilización de polímeros con segmentos hidrofílicos

por fotopolimerización o por plasma y el recubrimiento de la superficie. La integración de la nanotecnología acoplada a las técnicas de membranas puede utilizarse para mejorar la eficiencia de los tratamientos, ya que existe una gran cantidad de nanomateriales que presentan distintas propiedades y mecanismos que permiten mayores aplicaciones y ventajas en comparación con los procesos existentes [27]. Las membranas de nanofibras electrohiladas se pueden aplicar para diversos fines, incluida la filtración de aire/agua, almacenamiento de gas, sensores/electrónica y atención médica/cosmética.

## APLICACIÓN DE NANOMATERIALES EN MEMBRANAS PARA TRATAMIENTO DE AGUA

### Propiedades de los nanomateriales

La nanotecnología ofrece oportunidades para desarrollar sistemas de suministro de agua de última generación y ha brindado oportunidades inmensurables para purificar el agua incluso en estado iónico. Los diversos materiales nanoestructurados se han fabricado con características tales como alta relación de aspecto, reactividad y volumen de poro sintonizable, interacciones electrostáticas, hidrofílicas e hidrofóbicas que son útiles en adsorción, catálisis, sensores y optoelectrónica.

Los metales a nanoescala (plata, titanio, oro y hierro) y sus óxidos se han utilizado ampliamente en la mitigación ambiental. Las nanopartículas de plata son efectivas para desinfectar contaminantes biológicos como bacterias, virus y hongos [14]. Las nanopartículas de titanio se han utilizado en contaminantes que se transforman por medio de reacciones redox en especies inofensivas [28]. La mayoría de los nanomateriales han aumentado la porosidad de la superficie, lo que mejora el rechazo de sales y evita la formación de macrovoides.



Los nanomateriales han jugado un papel importante en la degradación de diversos colorantes y compuestos halogenados y la eliminación de metales pesados con microbios desinfectantes. Las nanopartículas de oro y hierro son especialmente adecuadas para eliminar metales pesados inorgánicos de aguas superficiales y residuales [29].

Las extraordinarias propiedades de los nanomateriales, como la alta área superficial, la fotosensibilidad, la actividad catalítica y antimicrobiana, las propiedades electroquímicas, ópticas y magnéticas, el tamaño de poro sintonizable y la química de la superficie proporcionan características útiles para muchas aplicaciones.

Estas aplicaciones incluyen sensores para el monitoreo de la calidad del agua, adsorbentes especiales, desinfección / descontaminación solar y membranas de alto rendimiento. Los procesos de modulación para diseñar aplicaciones multifuncionales y de alta eficiencia habilitados por la nanotecnología proporcionan una ruta prometedora tanto para modernizar la infraestructura obsoleta como para desarrollar sistemas de tratamiento descentralizados de alto rendimiento y bajo mantenimiento, incluidos dispositivos de punto de uso [27].

### **Nanomateriales utilizados para el tratamiento de agua**

Dentro de las áreas de tratamiento de agua se pueden utilizar varios nanomateriales en la fabricación de membranas compuestas para aprovechar sus propiedades. Esto mejora la capacidad de retención de sal y reduce los costos, el área de tierra y la energía para la desalinización.

Por ejemplo, las nanopartículas de zeolita se mezclan con la matriz polimérica para formar una membrana OI de película delgada, lo que aumenta el transporte de agua y la capacidad de retención de sal en un 99.7 % [30].

Las nanopartículas de sílice se han utilizado para dopar matrices de polímeros de OI para la desalinización del agua, con lo que se

logró mejorar las propiedades de transporte y modificar las redes poliméricas y los diámetros de poro [31]. Los CNT y el grafeno se han utilizado para la desalinización basada en la adsorción debido a sus extraordinarias capacidades de adsorción [16].

La separación de contaminantes específicos que depende del tamaño de poro es posible a través de la fabricación de membranas compuestas de nanofibras, ya que éstas poseen una alta porosidad y el tamaño de poro se puede ajustar a través del proceso de fabricación. Debido a la capacidad de ajuste en la composición y estructura de las membranas compuestas de nanofibras, éstas poseen capacidades prometedoras, tales como alta permeabilidad y selectividad, así como poca acumulación de suciedad. Existe una gran variedad de mezclas de polímeros, tanto orgánicos como inorgánicos, que se usan según las necesidades de filtración.

La producción de nanofibras consta de varias vías, como plantillas sintéticas, separación por diferentes fases, autoensamblaje de nanopartículas y, más ampliamente usado, el electrohilado. El giro eléctrico es frecuente debido a su facilidad de uso y bajo costo en comparación con los procesos de plantilla y autoensamblaje [32]. Algunos otros ejemplos de aplicaciones de los nanomateriales para el tratamiento de agua se muestran en la Figura 3 [27].

### **Electrohilado para la generación de membranas**

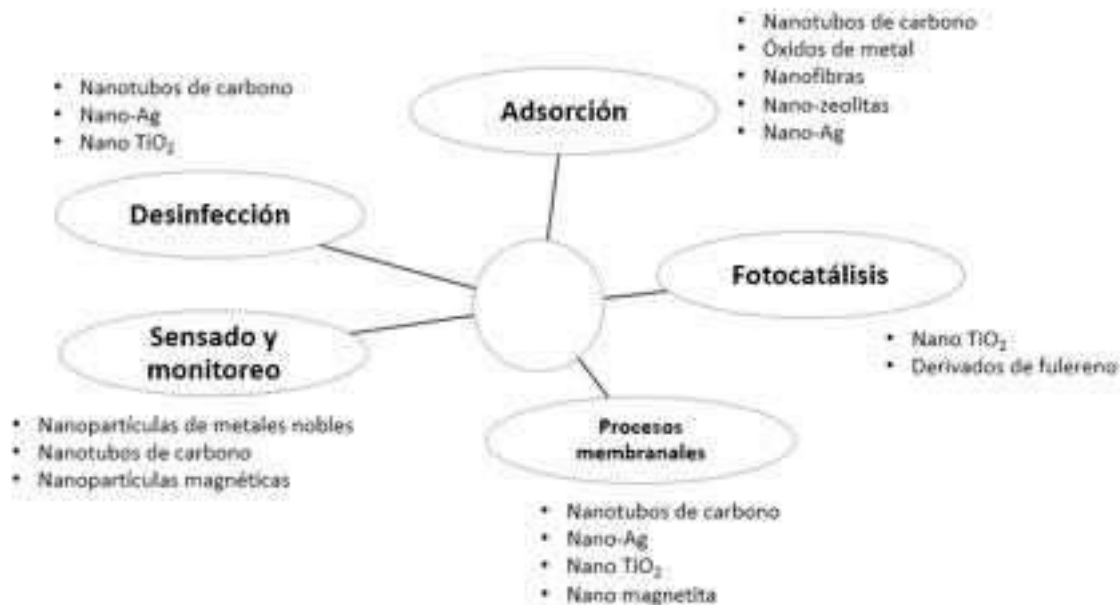
Las membranas de nanofibras electrohiladas tienen diversas aplicaciones, incluida la filtración de aire/agua, almacenamiento de gas, sensores/electrónica y atención médica/cosmética. La alta porosidad, el tamaño de poro ajustable/la distribución del tamaño de poro, la amplia gama de materiales elegidos y la funcionalización de la superficie disponible han proporcionado la flexibilidad para diseñar a medida las membranas. Los recientes avances en la tecnología de electrohilado han ofrecido una variedad de vías

para la producción a escala de membranas electrohiladas, tras el descubrimiento de su potencial para la purificación del agua [8].

Más que eso, la morfología y las propiedades de las nanofibras electrohiladas podrían diseñarse y fabricarse utilizando una amplia variedad de materiales (p. ej., polímeros inorgánicos u orgánicos, incluidos materiales naturales y sintéticos e híbridos) y ajustando los parámetros de la solución de polímero (p. ej., concentración, viscosidad, conductividad, tipo de polímero, disolvente), proceso de electrohilado (p. ej., voltaje aplicado, velocidad de flujo, distancia de desplazamiento del chorro, materiales objetivo de recolección) y variables ambientales (p. ej., temperatura, humedad, presión de la cámara) [33]. Cabe mencionar que la mayoría de los parámetros están estrechamente relacionados en el proceso de electrohilado; en consecuencia, el electrohilado es complejo y versátil. Combinando las características físicas de las nanofibras con la funcionalidad química, las estructuras de nanofibras electrohiladas se pueden utilizar para una amplia gama de aplicaciones, incluida la purificación de aire y agua [34], suministro de fármacos (genes), apósito para heridas, inmovilización

enzimática, ingeniería de tejidos, almacenamiento de gas [35], sensores y electrodos en electrónica [36]. En el caso de la purificación de agua, las estructuras nanofibras electrohiladas pueden usarse directamente como una capa barrera para eliminar grandes contaminantes en la microfiltración, o indirectamente como una capa de sustrato para soportar una capa barrera para la ultrafiltración, la nanofiltración, o la ósmosis inversa para la desalinización [8].

A pesar de que las membranas basadas en nanomateriales están entre las tecnologías más avanzadas y con más potencial dentro de los sistemas de tratamiento de agua, pueden presentar una gran cantidad de inconvenientes. Entre estos se tienen inestabilidad térmica, requerimiento de alta presión, incrustación, precipitación de contaminantes, bloqueo de poros, reacción lenta, formación de productos intermediarios tóxicos, formación de partículas de iones recién sintetizados y agregación en el almacenamiento. Estos problemas causan que existan bajas posibilidades de reutilizar las membranas compuestas de estos materiales, además de que hay riesgos desconocidos para los ecosistemas [23].



**Figura 3.** Aplicación de nanomateriales para el tratamiento de agua.



## MEMBRANAS INTEGRADAS A BIORREACTORES

### Biorreactores

Las aguas residuales domésticas contienen los desechos de nuestra vida cotidiana: heces, grasas, restos de comida, detergentes y productos farmacéuticos. En términos químicos, 1 metro cúbico de aguas residuales domésticas contiene de 300 a 600 gramos de materia orgánica rica en carbono (conocida como demanda química de oxígeno carbonosa o DQO), 40 - 60 gramos de nitrógeno (en forma de amonio y compuestos orgánicos), 5 - 20 gramos de fósforo (en fosfatos y compuestos orgánicos), 10 - 20 gramos de azufre (principalmente como sulfato) y trazas de iones de metales pesados.

El uso de biorreactores se aplica desde el siglo pasado, cuando la mayor parte de las aguas residuales domésticas se trataban mediante el método de "lodos activados", un proceso aeróbico simple y efectivo que utiliza agitación con aire y bacterias para oxidar los contaminantes y eliminar compuestos orgánicos, nitrógeno y fósforo [37]; sin embargo, tiene una gran huella de energía y carbono. Algunas plantas de aguas residuales digieren el lodo anaeróbicamente; en ausencia de oxígeno, los microorganismos descomponen la materia orgánica compleja en moléculas orgánicas más simples [38] que luego se convierten en metano.

Al quemar el metano para producir electricidad y calor, la digestión anaeróbica puede compensar del 20 al 30 % de los costos de energía y gases de efecto invernadero del proceso de lodos activados, pero la digestión es lenta, demora de 10 a 20 días [37].

### Sistemas de disminución de incrustación en biorreactores de membrana

La aplicación de prácticas anaeróbicas directamente a las aguas residuales domésticas

podría generar un exceso de energía y revertir los altos costos y los bajos rendimientos en el uso de biorreactores, pero actualmente no es posible lograrlo a temperatura ambiente y con bajas concentraciones de compuestos orgánicos [38]. Eso podría cambiar con dos nuevas tecnologías:

La primera tecnología es el biorreactor de membrana anaeróbica (BRMAN), que utiliza una membrana porosa para retener y concentrar los sólidos (incluida la materia orgánica en partículas y los microbios de crecimiento lento que producen gas metano) y más del 90 % de la materia orgánica disuelta en las aguas residuales [39]. Al prolongar el tiempo de degradación de los materiales, permite que se produzca un 25 - 100 % más metano por metro cúbico de agua tratada. Más del 90 % del metano disuelto (en concentraciones de 10 - 20 miligramos por litro) puede extraerse con técnicas de gas o vacío, utilizando relativamente poca energía (menos de 0.05 kilovatios-hora por metro cúbico, kWh m<sup>-3</sup>) [37]. Aunque el BRM convencional ha progresado enormemente y se ha convertido en un enfoque prometedor en el tratamiento de aguas residuales, todavía posee varias limitaciones; por lo tanto, surgió un BRM integrado para la tecnología de tratamiento de aguas residuales [23]. La rápida expansión de la población en los países en desarrollo provocó la sobrecarga de las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales existentes [40].

En vista de esto, BRM ha atraído crecientes intereses ya que tiene algunas ventajas distintivas, tales como menor huella, menor producción de lodos, mayor eficiencia de separación y calidad de efluente altamente mejorada en comparación con el tratamiento convencional de lodos activados [41]. Asimismo, a diferencia del proceso convencional de lodos activados, BRM también es capaz de retener los microcontaminantes orgánicos de bajo peso molecular y algunos tipos de virus [23].



## CONCLUSIÓN

El desarrollo de sistemas de tratamiento de agua —sustentables y capaces de resolver el problema del agua superficial limitada— será alcanzable si se aplican sistemas integrados de tratamiento con diferentes métodos de filtración de membranas, algunos incluso ya se aplican para procesos de desalinización y generación de biorreactores de membrana. La limitante para la aplicación de estos procesos es la necesidad de su optimización para producir sistemas de membranas con propiedades multifuncionales de costos más alcanzables y que disminuyan el problema de la incrustación, el cual implica un aumento en los gastos de mantenimiento. Sin embargo, la rapidez con la que avanza el área de materiales y técnicas de membrana indica que existe el potencial para resolver estos problemas. No obstante, para esto es necesario determinar cuáles de estas nuevas técnicas son las más efectivas para eliminar cada tipo de contaminante, y la manera de integrarlas en un tren de proceso de la forma más eficiente, económica y con menor impacto al ambiente.

## REFERENCIAS

[1] H. L. Leverenz, G. Tchobanoglous, and T. Asano, "Direct potable reuse: a future imperative," *J. Water Reuse Desalin.*, vol. 1, no. 1, pp. 2–10, 2011.

[2] V. Lazarova, *Water-Energy Interactions in Water Reuse*, vol. 11. 2015.

[3] V. K. Gupta, I. Ali, T. A. Saleh, A. Nayak, and S. Agarwal, "Chemical treatment technologies for waste-water recycling - An overview," *RSC Adv.*, vol. 2, no. 16, pp. 6380–6388, 2012.

[4] D. G. Hendricks, *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes. Physical, Chemical and Biological*. IWA, 1997.

[5] M. Paidar, V. Fateev, and K. Bouzek, "Membrane electrolysis—History, current status and perspective," *Electrochimica Acta*, vol. 209. Elsevier Ltd, pp. 737–756, 2016.

[6] Y. Pouliot, V. Conway, and P. Leclerc, "Separation and Concentration Technologies in Food Processing" in *Food Processing: Principles and Applications*, Second Edition, USA: Wiley, pp. 33–60, 2014.

[7] Seader, Henley, and Roper, *Separation Process Principles. Chemical and Biochemical Operations*, 3rd ed. Utah: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

[8] H. Ma and B. S. Hsiao, "Current advances on nanofiber membranes for water purification applications," *Filter. Media by Electrospinning Next Gener. Membr. Sep. Appl.*, pp. 25–46, 2018.

[9] S. H. Mohamad, M. I. Idris, H. Z. Abdullah, and A. F. Ismail, "Short Review of Ultrafiltration of Polymer Membrane As a Self-Cleaning and Antifouling in the Wastewater System," *Advanced Materials Research*, vol. 795, pp. 318–323, 2013.

[10] C. Jarusutthirak and G. Amy, "Membrane filtration of wastewater effluents for reuse: Effluent organic matter rejection and fouling," *Water Sci. Technol.*, vol. 43, no. 10, pp. 225–232, 2001.

[11] S. Bunani, E. Yörüko lu, Ü. Yüksel, N. Kabay, M. Yüksel, and G. Sert, "Application of reverse osmosis for reuse of secondary treated urban wastewater in agricultural irrigation," *Desalination*, vol. 364, pp. 68–74, 2015.

[12] M. M. Pendergast and E. M. V. Hoek, "A review of water treatment membrane nanotechnologies," *Energy and Environmental Science*, vol. 4, no. 6. pp. 1946–1971, 2011.

[13] H. Liu and C. D. Vecitis, "CNT-based Electrochemical Filter for Water Treatment: Mechanisms and Applications," *Sch. Eng. Appl. Sci.*, vol. Doctor of, p. 184, 2015.

[14] M. M. Khin, A. S. Nair, V. J. Babu, R. Murugan, and S. Ramakrishna, "A review on nanomaterials for environmental remediation," *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, no. 8, pp. 8075–8109, 2012.

[15] S. Burn *et al.*, "Desalination techniques - A review of the opportunities for desalination in agriculture," *Desalination*, vol. 364, pp. 2–16, 2015.

[16] R. Das, M. E. Ali, S. B. A. Hamid, S. Ramakrishna, and Z. Z. Chowdhury, "Carbon



nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination," *Desalination*, vol. 336, no. 1, pp. 97–109, 2014.

[17] L. N. Nthunya, S. Maifadi, B. B. Mamba, A. R. Verliefde, and S. D. Mhlanga, "Spectroscopic determination of water salinity in brackish surface water in Nandoni Dam, at Vhembe District, Limpopo Province, South Africa," *Water (Switzerland)*, vol. 10, no. 8, 2018.

[18] P. Bernardo, E. Drioli, and G. Golemme, "Ind. Eng. Chem. Res. 2009, 48, 4638–4663 Gas Sep State of the art Bernardo *et al.* pdf," pp. 4638–4663, 2009.

[19] T. Uemura, K. Kotera, M. Henmi, and H. Tomioka, "Membrane technology in seawater desalination: History, recent developments and future prospects," *Desalin. Water Treat.*, vol. 33, no. 1–3, pp. 283–288, 2011.

[20] H. K. Shon, S. Vigneswaran, J. K. and asamy, "Membrane technology for organic removal in wastewater," *Water and wastewater*, 2011.

[21] W. Guo, H. H. Ngo, and J. Li, "A mini-review on membrane fouling," *Bioresour. Technol.*, vol. 122, pp. 27–34, 2012.

[22] F. Ahmed, B. S. Lalia, V. Kochkodan, N. Hilal, and R. Hashaiekeh, "Electrically conductive polymeric membranes for fouling prevention and detection: A review," *Desalination*, vol. 391, pp. 1–15, 2016.

[23] C. H. Neoh, Z. Z. Noor, N. S. A. Mutamim, and C. K. Lim, "Green technology in wastewater treatment technologies: Integration of membrane bioreactor with various wastewater treatment systems," *Chem. Eng. J.*, vol. 283, pp. 582–594, 2016.

[24] S. Metsämuuronen, M. Sillanpää, A. Bhatnagar, and M. Mänttari, "Natural organic matter removal from drinking water by membrane technology," *Sep. Purif. Rev.*, vol. 43, no. 1, pp. 1–61, 2014.

[25] X. Fan, H. Zhao, Y. Liu, X. Quan, H. Yu, and S. Chen, "Enhanced permeability, selectivity, and antifouling ability of CNTs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> membrane under electrochemical assistance," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 4, pp. 2293–2300, 2015.

[26] X. Cui and K. H. Choo, "Natural organic matter removal and fouling control in low-pressure membrane filtration for water treatment," *Environ. Eng. Res.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–8, 2014.

[27] X. Qu, P. J. J. Alvarez, and Q. Li, "Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment," *Water Res.*, vol. 47, no. 12, pp. 3931–3946, 2013.

[28] P. V. Kamat and D. Meisel, "Nanoscience opportunities in environmental remediation," *Comptes Rendus Chim.*, vol. 6, no. 8–10, pp. 999–1007, 2003.

[29] R. Das, S. B. Abd Hamid, M. E. Ali, A. F. Ismail, M. S. M. Annuar, and S. Ramakrishna, "Multifunctional carbon nanotubes in water treatment: The present, past and future," *Desalination*, vol. 354, pp. 160–179, 2014.

[30] M. Fathizadeh, A. Aroujalian, and A. Raisi, "Effect of lag time in interfacial polymerization on polyamide composite membrane with different hydrophilic sub layers," *Desalination*, vol. 284, no. October, pp. 32–41, 2012.

[31] G. L. Jadav and P. S. Singh, "Synthesis of novel silica-polyamide nanocomposite membrane with enhanced properties," *J. Memb. Sci.*, vol. 328, no. 1–2, pp. 257–267, 2009.

[32] M. R. Kulak and R. L. Liang, "Electrospun polymeric nanofibrous membranes for water treatment," no. December, pp. 1–31, 2018.

[33] W. Wu, Z. H. Huang, and T. T. Lim, "Recent development of mixed metal oxide anodes for electrochemical oxidation of organic pollutants in water," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 480, pp. 58–78, 2014.

[34] G. G. Chase, J. S. Varabhas, and D. H. Reneker, "New methods to electrospin nanofibers," *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 6, no. 3, pp. 32–38, 2011.

[35] M. . Paridah, A. Moradbak, A. . Mohamed, F. Abdulwahab taiwo Owolabi, M. Asniza, and S. H. Abdul Khalid, "Hydrogen Storage for Energy Application," *Intech*, vol. i, no. tourism, p. 13, 2016.

[36] J. Miao, M. Miyauchi, T. J. Simmons, J. S. Dordick, and R. J. Linhardt, "Electrospinning of nanomaterials and applications in electronic

components and devices," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 10, no. 9, pp. 5507–5519, 2010.

[37] W.-W. Li, H.-Q. Yu, and B. E. Rittmann, "Extracting carbon, nitrogen and phosphorus from wastewater could generate resources and save energy," *Nature*, vol. 528, no. 7580, pp. 29–31, 2015.

[38] A. L. Smith, L. B. Stadler, L. Cao, N. G. Love, L. Raskin, and S. J. Skerlos, "Navigating wastewater energy recovery strategies: A life cycle comparison of anaerobic membrane bioreactor and conventional treatment systems with anaerobic digestion," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, no. 10, pp. 5972–5981, 2014.

[39] P. L. McCarty, J. Bae, and J. Kim, "Domestic wastewater treatment as a net energy producer-can this be achieved?," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 17, pp. 7100–7106, 2011.

[40] L. Grady, G. T. Daigger., N. G. Love., and C. D. M. Filipe, *Biological Wastewater Treatment*, 3rd ed., vol. 67, no. 6. Taylor and Francis Group, 2011.

[41] N. S. A. Mutamim, Z. Z. Noor, M. A. A. Hassan, and G. Olsson, "Application of membrane bioreactor technology in treating high strength industrial wastewater: A performance review," *Desalination*, vol. 305, pp. 1–11, 2012.

# COMPARACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN OBTENIDA POR EL MÉTODO DE *EDDY COVARIANCE* Y MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS EN UNA ZONA SEMIÁRIDA

---

Comparison of the Evapotranspiration Estimated by the Eddy Covariance  
Method and Semiempirical Methods in a Semiarid Zone

Elvia Olivia Pérez Hernández<sup>1\*</sup>, Enrique González Sosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia  
\*elvia.ph@hotmail.com

## RESUMEN

Esta investigación estudia la evapotranspiración real (ET), medida con una estación *Eddy Covariance* (EC), la cual obtiene datos que son necesarios, para el cálculo de la evapotranspiración por medio de metodologías micrometeorológicas. Este tipo de estaciones se caracterizan por que la inversión en ellas es alta y la colocación debe hacerse en un lugar seguro para que lleve a cabo registros continuos cada 30 minutos en el periodo de interés. La evapotranspiración observada con EC es comparada con los métodos que estiman la ET por medio de una correlación. Los métodos a su vez se dividen en dos tipos por la forma en que calculan la ET: ya sea potencial ( $ET_p$ ) o de referencia ( $ET_0$ ). Los métodos semiempíricos utilizados en el estudio para calcular la  $ET_p$  diariamente fueron Makkink, Hargreaves, Hamon; mientras que el cálculo mensual se hizo a través del método de Turc. Para la evapotranspiración de referencia  $ET_0$  se empleó el método de la FAO-56 Penman-Monteith para cálculos diarios; adicionalmente, fue comparada la ET mensual que generan los productos de MODIS mediante percepción remota. Las correlaciones 1:1 entre EC y los métodos semiempíricos en general mostraron una correlación  $R^2$  de 0.6, sin embargo, se pone en evidencia que los métodos teóricos subestiman la evapotranspiración y que su respuesta no es pertinente para zonas semiáridas, incluso si modulan los datos para condiciones secas (estiaje) y húmedas (estación de lluvias), debido a que la respuesta de los sistemas semiáridos es muy sensible a la disponibilidad del agua para su desarrollo y equilibrio.

**Palabras clave:** Evapotranspiration, *Eddy Covariance*, FAO 56 Penman-Monteith, Hargreaves, Hamon, Sensores remotos.

## ABSTRACT

This research studies the actual evaporation, measured with an Eddy Covariance sta-

tion (EC), which, through micrometeorological methodologies obtains data that is necessary but difficult to measure for the calculation of evapotranspiration (ET). These types of stations are characterized by the fact that the investment in them is high and the placement must be planned carefully to carry out their activities. The real data of evapotranspiration from EC will be compared with other methods that estimate ET by correlation. The methods in turn are divided in two types by the way they calculate either potential ET ( $ET_p$ ) or reference ET ( $ET_0$ ). The theoretical-semi-empirical methods that handled ETP daily were Makkink, Hargreaves, Hamon, and the Turc method was used for monthly calculations. The FAO-56 Penman-Monteith method was used for daily calculations of the  $ET_0$ ; this work also includes the monthly ET downloaded from MODIS which is part of estimates through remote perception. The 1:1 correlation between EC and the semiempirical methods usually show a correlation  $R^2 = 0.6$ , however, it is shown that the theoretical and semiempirical methods underestimate the evapotranspiration and that their answer is not adequate for the semiarid zone, even when modulated for dry (runoff) and wet (flood) conditions for the data base, since the answer of the semiarid systems is very sensible to the availability of water for their essential development and balance.

**Keywords:** Evapotranspiration, Eddy Covariance, FAO 56 Penman-Monteith, Hargreaves, Hamon, remoting sensors.

## INTRODUCCIÓN

A pesar de todas las alternativas que actualmente se manejan para distribuir agua, en muchos rincones del planeta no hay disponibilidad para satisfacer la demanda de la población, por lo cual ésta se vuelve un elemento significativo y vital para el ser humano y, a su vez, condiciona sus actividades agropecuarias, forestales y pesqueras. Conocer cuánta lluvia se ha presentado, cuánta



agua se tiene disponible y las condiciones de evaporación es básico para hacer una planeación de la actividad productiva agroalimentaria [1].

Para una mejor gestión de los recursos hídricos y manejo de riesgos potenciales causados por los fenómenos hidrometeorológicos extremos, es necesario evaluar y analizar todos los componentes del balance hídrico. Uno de los principales retos es la cuantificación de la evaporación total, cuya mayor parte la integran la evaporación del suelo y la transpiración, denominada evapotranspiración (ET) [2].

En climas semiáridos, las pérdidas de agua por evaporación pueden ser elevadas, lo que reduce su disponibilidad, el nivel de eficiencia de los sistemas de riego y el uso eficiente por parte de la vegetación —a pesar de que se ha alcanzado mejorar la eficiencia mediante técnicas como la presurización de los sistemas tradicionales de transporte y distribución—, por lo que pueden tener un impacto significativo en el desarrollo y economía de una región o país [3].

La estimación de la evaporación a partir de superficies de agua libre y suelo, así como de la evapotranspiración a partir de superficies cubiertas por vegetación, y la relevancia de su medición, ejercen un papel de gran importancia en la modelación hidrológica, en los estudios hidrometeorológicos de sistemas agrícolas y en lo que respecta al diseño y a la explotación de los embalses y de las redes de riego y drenaje [4].

El problema radica en que tanto los ecosistemas semiáridos como el desarrollo y producción de cultivo se ven afectados por el estrés hídrico, el cual tiene una relación lineal entre la producción y la evapotranspiración del cultivo.

La evapotranspiración representa entre 7 % y 80 % de la precipitación en varios ecosistemas áridos y semiáridos de la región de Norte América [5].

En México son mayormente para usos agrícolas y abastecimiento público, y forman el 90.9 % del uso consultivo nacional, según cifras publicadas en el Atlas del Agua en México de 2015 [6]. La publicación de Estadísticas del Agua en México (EAM) 2016, menciona que anualmente 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua provienen de la precipitación y se estima que el 72.5 % se evapotranspira y regresa a la atmósfera [7].

Encontrar la forma de emplear los métodos empíricos y semiempíricos que no fueron diseñados para ambientes semiáridos es de gran relevancia en el establecimiento de los volúmenes disponibles para satisfacer la demanda de los usos del agua en nuestro país, ya que su superficie representa el 60 % del territorio nacional.

Este trabajo no sólo pretende obtener la bondad de los métodos que calculan la evapotranspiración potencial y de referencia respecto a la ET real observada en una torre de *Eddy Covariance*, sino también tener otras opciones que permitan monitorear la evapotranspiración en regiones semiáridas del país.

## **MONITOREO DE LA EVAPORACIÓN CON EL SISTEMA EDDY COVARIANCE (EC)**

Aunque existen diversos métodos, como los directos e indirectos para estimar la evapotranspiración, suele recurrirse a los métodos indirectos porque son ampliamente utilizados: isotopía, *Eddy Covariance*, Bowen y sapflow, entre otros.

Entre los métodos semiempíricos podemos destacar los métodos de Thornthwaite [9], Makkink [10], Priestley-Taylor [11], y la fórmula establecida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA), más conocida como FAO-56 Penman-Monteith [2], [12].



**Figura 1.** Estación Bernal y sus sensores.

Dentro de los métodos indirectos destacan los denominados de gradiente y turbulencia, éstos se sustentan en la medición de las tres componentes de la velocidad del viento,

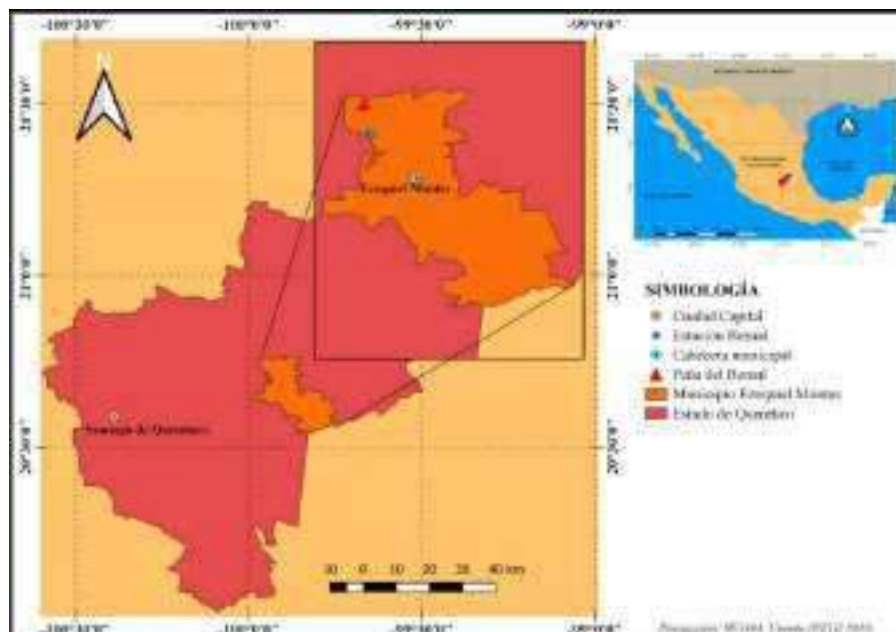
temperatura del aire, estimación del flujo de calor latente (LE) y el flujo de calor sensible (H). En su caso, como el residuo del balance de energía de superficie, método de las covarianzas o *Eddy Covariance* (en Inglés).

Por el contrario, el método directo del lisímetro, a pesar que suele ser costoso, es un método que requiere de una buena instrumentación para estimar la evaporación sobre el principio de balance de masa [3].

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de estudio

El sitio experimental se encuentra dentro del municipio de Ezequiel Montes en el estado de Querétaro, denominado como la estación Bernal. Se encuentra entre las coordenadas: LAT: 20.7168617, LONG: -99.941391, con una elevación de 2,053 msnm. El paisaje de la zona es típicamente volcánico (Fig. 1), presenta contrastes geomorfológicos asociados con la variada composición de las rocas. Las más antiguas, de composición riolítica y andesítica, constituyen las montañas escarpadas y mesetas.



**Figura 2.** Mapa de localización de la Estación Bernal.



El tipo de clima es semiárido, por lo cual es de importancia el monitoreo de la evaporación, ya que se llevan a cabo actividades primarias ganadería y agricultura, actividad que más demanda agua en el país [1]. La Fig. 2 muestra la ubicación de la estación Bernal y, como se puede observar, se encuentra en el centro del estado de Querétaro.

### Eddy Covariance

*Eddy Covariance* (EC) es un método de medición que usa aparatos con funciones micrometeorológicas, para obtener la evaporación. El método de EC arroja mediciones de emisiones de gas de agua (vapor) y CO<sub>2</sub>, la cual permite establecer el balance de energía de superficie ya que también permite estimar los flujos de calor sensible (H) y el calor latente (LE), integrados a partir de áreas representativas de varios tamaños [13].

En general, el principio de las mediciones de EC se establece a partir de las covarianzas entre la concentración de partículas de interés dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O) y las tres componentes de velocidad del viento (Ecs. 2 y 3). En otras palabras, este método trabaja con las mediciones de turbulencias verticales que transportan los gases en la superficie.

Los registros de gases y energía son cada 30 minutos, los cuales son el promedio de las mediciones tomadas a los flujos de gases a una frecuencia de 10 Hz. Por esto los datos de esta estación son tomados directamente del ambiente como reales.

Estos datos reales de ET caracterizan la zona y permiten un entendimiento cuando se observan las diferencias con los métodos empíricos que también para calcular la evaporación.

Como se menciona EC permite estimar los flujos de dióxido de carbono y de vapor en combinación con la ecuación de balance energético Ec. (1) [14].

$$Rn + H + LE + G \approx 0 \quad (1)$$

donde  $Rn$  representa a la radiación neta,  $H$  es el flujo de calor sensible,  $LE$  es el flujo de calor latente y  $G$  es flujo de calor acumulado en el suelo, todo en  $Wm^{-2}$ .

El calor sensible, que es el calor del aire que se encuentra en la superficie de la Tierra, puede ser determinado con la Ec. (2), donde  $\rho$  es la densidad del aire  $kgm^{-3}$ ,  $C_p$  es el calor específico del aire seco en  $MJkg^{-1}K^{-1}$ , la multiplicación de la covarianza de  $w'$  que es la desviación instantánea de la velocidad vertical del viento y la covarianza de  $T'$  la temperatura en grados Kelvin.

$$H = \bar{\rho} C_p \overline{w'T'} \quad (2)$$

El flujo de calor latente LE Ec. (3), considerado como la energía disponible para generar evapotranspiración y la fotosíntesis,

$$LE = \lambda E = \lambda(1 + \mu \cdot \sigma) \cdot \left( \overline{w'\rho'_v} + \bar{\rho}_v \frac{\overline{w'T'}}{\bar{T}} \right) \quad (3)$$

donde  $\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua  $Jkg^{-1}$ .

El flujo de calor en el suelo  $G$  Ec (4), es el que se almacena y desprende del suelo, calculado con:

$$G = c_z d_s \left( \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t} \right) \quad (4)$$

Donde  $c_z$  es el calor específico en  $MJm^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ;  $d_s$  profundidad del suelo efectivo en metros;  $T_n$  temperatura en el día y  $T_{n-1}$  temperatura del día precedente en  $^\circ C$  [13].

La base de datos en este estudio consta de 24736 registros, los cuales fueron preprocesados, para identificar datos anómalos y nulos, que queden fuera de los rangos en comparación con otros sitios similares y de orden de magnitud. Después de esta depuración se obtuvo un total de 20 894 registros, que corresponden al periodo del 18 de mayo del 2017 al 25 de diciembre del 2018. La serie de datos contiene espacios en blanco: en el



año 2017 faltan los meses de agosto y septiembre, en el año 2018 hay una ausencia de datos del mes de marzo, y también los meses de junio, julio, noviembre y diciembre, esto debido a que no había registros de ET.

Para un buen manejo de ET, se asumió que todos los datos nocturnos de flujo de calor latente (LE) tuvieran el valor de  $0 \text{ Wm}^{-2}$  y se dejaron sólo los valores de los datos diurnos en un filtro donde se presentara una radiación neta mínima de  $10 \text{ Wm}^{-2}$ .

En total, los datos diurnos evaluados para este estudio fueron 7118, de mediciones cada 30 minutos, estos datos primero se sometieron a una correlación de las variables del balance energético, el cual se presentará en la sección de resultados, esto para comprobar que los datos presentados tienen una buena calidad en sus mediciones, reflejo de una adecuada calibración en los equipos.

Otro caso con la base de datos final de ET, fue que para realizar el cierre de balance energético (CEB) se filtraron los datos solo con calidad 0 y 1, según arrojó la base de datos procesada de EC, pero al hacer esto se perdían cerca de dos mil datos, por lo cual en una nueva base de datos se rellenaron primero estos huecos con NaN y posteriormente se rellenaron con una interpolación lineal.

Con esta base de datos rellenada fue que se trabajó las correlaciones con los métodos que se mencionarán a continuación.

## Métodos de evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial ( $ET_p$ ) es la ET máxima que se produce si la humedad de un suelo y su cobertura vegetal se encuentran en condiciones óptimas, es decir, totalmente cubierto de vegetación y con suministro ilimitado de agua [9].

A continuación, se presenta el primer método de  $ET_p$ , que es Makkink Ec. (5), el cual se basa en la radiación solar y fue desarrollada para climas húmedos.

$$ET_p = \alpha \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left( \frac{R_s}{2.45} \right) - 0.012 \quad (5)$$

donde  $ET_p$  es la evapotranspiración potencial en  $\text{mm día}^{-1}$ ,  $R_s$  es la radiación solar total diaria en  $\text{MJm}^2\text{día}^{-1}$ ,  $\gamma$  es la constante psicrométrica,  $\Delta$  la pendiente de la curva de vapor, ambas en  $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\alpha$  es 0.61 y  $\beta$  es 0.012.

El siguiente método fue el de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) Ec. (6), que toma en cuenta la temperatura [15].

$$ET_p = 0.408 \cdot 0.0023(T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot R_a \quad (6)$$

siendo  $T_{max}$  la temperatura máxima a dos metros de altura,  $T_{min}$  es la temperatura mínima a dos metros de altura en  $^\circ\text{C}$ ,  $R_a$  es la radiación extraterrestre en  $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ .

También, fue incluida la ecuación de Hamon Ec. (7), que incluye el coeficiente de corrección KPEC, el cual se establece para todos los sitios. La presión de vapor a saturación es hPa y N Ec. (8) el número de horas en el día en múltiplos de 12 horas, y  $ws$  es el ángulo de la hora de puesta de sol en radianes [16].

$$ET_p = KPEC \cdot 0.165 \cdot 216.7 \cdot N \cdot \left( \frac{e_s}{T+273} \right) \quad (7)$$

$$N = \frac{\left( \frac{24}{\pi} \right) \cdot ws}{12} \quad (8)$$

Por último, se utilizó la ecuación de Turc [17], este método es uno de los más utilizados para estimar la  $ET_p$  en climas húmedos [18], y está basado en mediciones de temperatura máxima, mínima y radiación solar.

La ecuación para Turc que se utilizó en este cálculo es la modificada, la cual tiene dos formas, la primera es para aquellos meses que tienen una humedad relativa media mensual superior al 50 % Ec. (9).

$$ET_p = K \left( \frac{T}{T+15} \right) (Rg + 50) \quad (9)$$

Y para humedad relativa media mensual inferior a 50% Ec. (10)



$$ET_p = K \left( \frac{T}{T+15} \right) (Rg + 50) \left( 1 + \frac{50-HR}{70} \right) \quad (10)$$

En este caso  $ET_p$  es la evapotranspiración potencial en  $\text{mm mes}^{-1}$ ,  $K$  es una constante igual a 0.40 para meses de 30 y 31 días, 0.37 para febrero,  $T$  es la temperatura media mensual en  $^{\circ}\text{C}$  y  $Rg$  es la radiación solar global incidente del mes en  $\text{calcm}^{-2}\text{día}^{-1}$ .

### Método de evapotranspiración de referencia

El concepto de una superficie de referencia fue introducido con el fin de obviar la necesidad de definir los parámetros únicos de evaporación para cada cultivo y etapa de crecimiento [2].

En este trabajo se muestra la ecuación FAO-56 Penman-Monteith Ec. (11), en este caso la ecuación considera un cultivo hipotético, el cual conserva ciertas características como lo son, una altura de 12 cm con una resistencia superficial fija de  $70 \text{ sm}^{-1}$  y un albedo de 0.23, este cultivo se trata de un pasto verde bien regado, como lo menciona el documento de la FAO de Evaporación de cultivo.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (11)$$

donde  $ET_0$  es la evapotranspiración de referencia en  $\text{mm día}^{-1}$ ,  $Rn$  es la radiación neta,  $G$  es el flujo de calor en el suelo, ambos valores en  $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ,  $T$  es la temperatura media del aire a dos metros de altura en  $\text{ms}^{-1}$ ,  $e_s - e_a$  es el déficit de presión de vapor en  $\text{kPa}$ ,  $\Delta$  la pendiente de la curva de la presión de vapor y finalmente  $\gamma$  es la constante psicrométrica ambos valores en  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}$ .

### Sensores Remotos

La evaporación actual puede ser estimada en forma indirecta por medio de datos de sensores remotos usando el modelo de ba-

lance de energía de la Tierra y modelos para estimación de la evapotranspiración. Sin embargo, la mayoría de estos métodos requieren muchos parámetros y variables como entrada, incluyendo velocidad del viento y resistencia aerodinámica [19].

En esta ocasión se utilizaron datos del satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) que corresponden a dos instrumentos lanzados por la NASA.

Se trata de imágenes satelitales de diferentes propiedades. Las imágenes MODIS son generadas con frecuencia diaria por cada uno de estos satélites, pero desfasados entre ellas por 12 horas (TERRA obtiene imágenes durante el día y AQUA durante la noche). Dichas imágenes de resolución moderada son generadas a través de espectrometrías, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales, desde longitudes de onda de  $0.4 \mu\text{m}$  hasta  $14.4 \mu\text{m}$ .

Esta información se traduce en diferentes características de la superficie de la tierra, tales como, reflectividad de la superficie, manto de nieve y mares de hielo, cobertura de la superficie, dinámica, índice de vegetación, índice foliar, anomalías térmicas y/o incendios, productividad primaria bruta, albedo, campo continuo de vegetación, área quemada y finalmente, temperatura de la superficie terrestre (LST) [20].

El producto temperatura de la superficie terrestre es obtenido en pixeles de 500 metros, generado por un algoritmo de ventanas separadas (*Split-window*) y una malla de 6 km para el algoritmo día-noche. En el algoritmo de ventanas separadas, la emisividad en las bandas 31 y 32 son estimadas desde los diferentes tipos de cobertura terrestre, donde el vapor de agua en la columna atmosférica y la temperatura límite inferior de la columna de aire son separados en subrangos, para una mejor obtención de información.

En el algoritmo día-noche, durante el día y la noche la LST y la emisividad de la superficie terrestre son extraídas a partir del par

de imágenes día y noche de las capturas de MODIS en siete bandas Termal Infrarrojas (TIR). Para la obtención de la evapotranspiración con las imágenes de MODIS, la NASA utiliza la ecuación de balance energético (Ec. 1), mediante el despeje de la variable LE se puede obtener el valor de la evapotranspiración. Esto ya que todos los valores del balance energético tienen la misma escala de medición.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Depuración de datos de *Eddy Covariance*

El total de datos registrados en la base de datos de la torre EC fue de 24736, al hacer una depuración de estos, estuvieron disponibles 20894. La serie de tiempo de los datos que se calificaron con buena calidad fueron de mayo en 2017 hasta el mes de octubre del año 2018. LI-COR sugiere una depuración primaria mediante su barra de control de calidad de los datos, o también llamado *Quality Control (QC)* [13].

Estas llamadas QC son calculadas para todos los flujos (calor sensible y latente, flujos de gases y momento). El indicador final, completamente descrito por Foken y Whichura en 1996 y ampliamente adoptado, muestra la salida de archivos que están basados en una combinación de estos indicadores calculados como resultados de dos pruebas.

Los indicadores o banderas de calidad se enumeran del 0 al 9 dependiendo de qué tan confiable es el dato, siendo 0 un dato dentro del rango aceptable y 9 un dato con muy baja aceptación. En estas bases de datos encontramos sólo 3 valores de la escala que van del 0 al 2, para tener datos buenos se determinó continuar con aquellos datos que en su celda QC hubiese 0 o 1, después también se rellenaron datos y obtuvo una correlación entre las variables del balance energético.

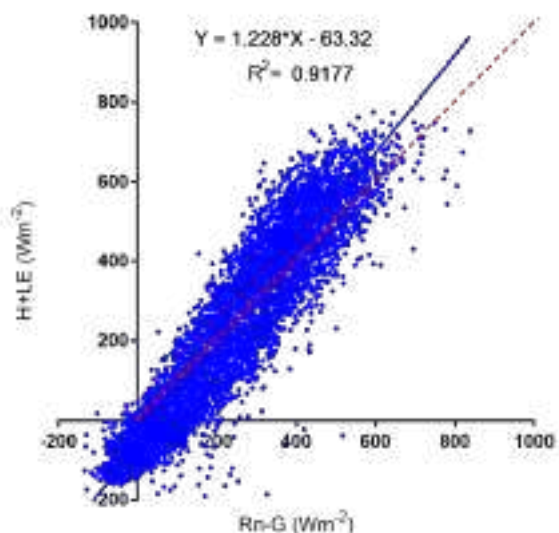
Como se observa en la Fig. 3, la correlación  $R^2$  fue de 0.9177, lo que es aceptable, e indica que las variables tienen una buena calidad. Este indicador, está asociado con la energía que llega a la Tierra y es aprovechable en términos del balance de energía de superficie.

Otro dato que arroja este cierre de balance es que la instrumentación está calibrada y trabajando correctamente.

### Correlación con los métodos de evapotranspiración potencial

El primer método evaluado fue Makkink Ec. (5), la cual muestra una correlación general con los datos de EC que se muestran a continuación.

Como se observa en la Fig. 4 la  $R^2 = 0.479$ , lo cual indica que este método tiene una relación aceptable entre la ET real y la potencial, aun cuando este método en unos casos sobreestima y otros subestima. Por lo cual toda la serie se separó en dos partes, y se clasificó en dos estaciones: húmeda y seca, como se muestra a continuación.



**Figura 3.** Cierre de balance energético para el período 2017-2018.

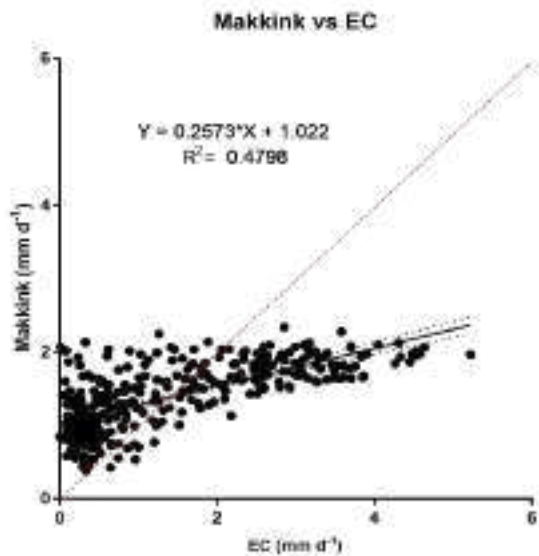


Figura 4. Correlación de Makkink contra EC.

En la Fig. 5 se observan las dos estaciones antes mencionadas, aunque en este caso la mejor correlación se encuentra en la estación húmeda, mientras la estación seca tiene una correlación baja y, en este caso, el rango entre 0 y 1 no tiene una correlación, por lo cual esta sólo se puede observar en una ET mayor a 1 mm por día

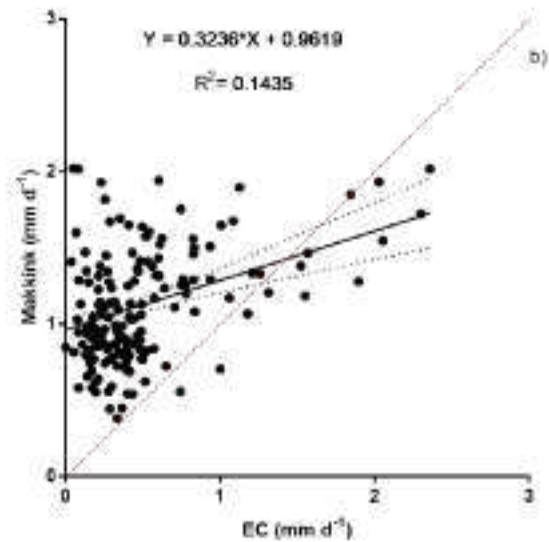
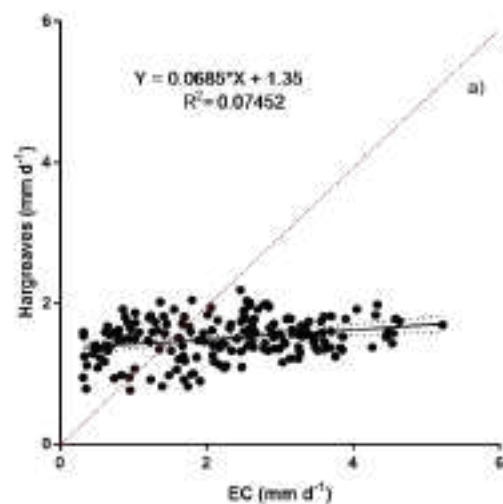
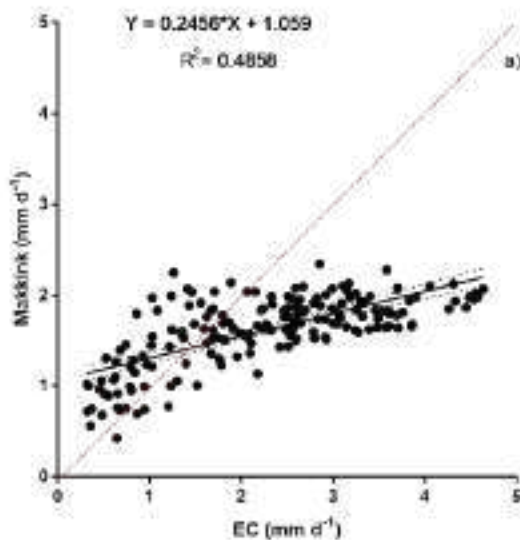
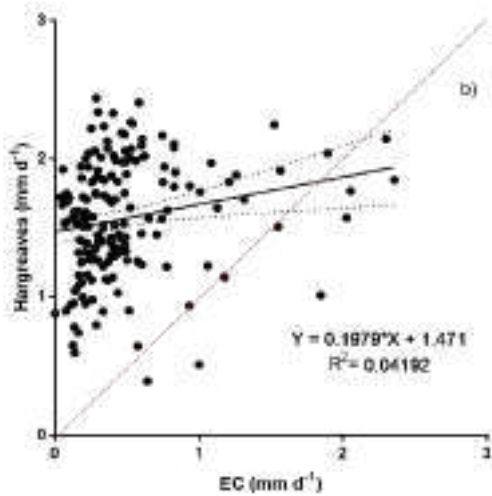


Figura 5. Correlaciones de Makkink contra EC, a) estación húmeda y b) estación seca.

En el caso de la ecuación de Hargreaves, no se encontró una correlación general con el método de EC, sin embargo, separando por estación como se muestra en la Fig. 6. es baja la correlación Makkink Hargreaves, al igual que en la estación seca. En la estación húmeda, aunque hay una correlación más alta, tampoco existe un valor suficiente para señalar que es una ecuación aplicable al sitio.

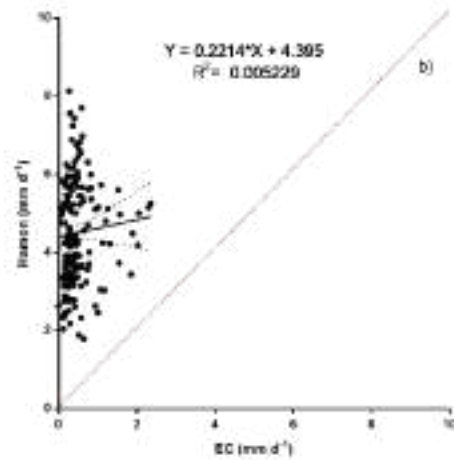
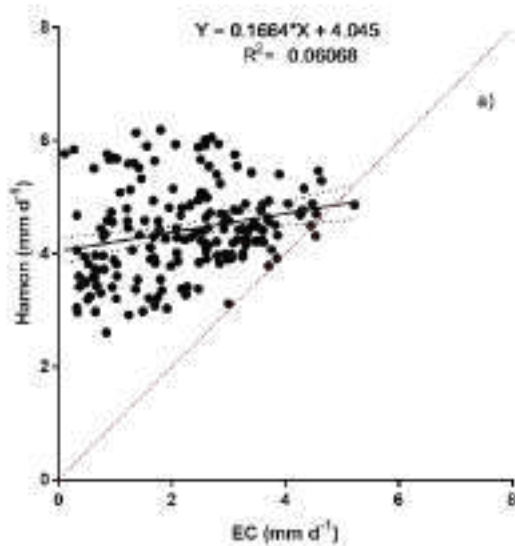




**Figura 6.** Correlación entre Hargreaves y Eddy covariance, a) estación húmeda y b) estación seca.

La siguiente correlación analizada fue la de Hamon contra EC, solo se muestran las correlaciones estacionales Fig. 7.

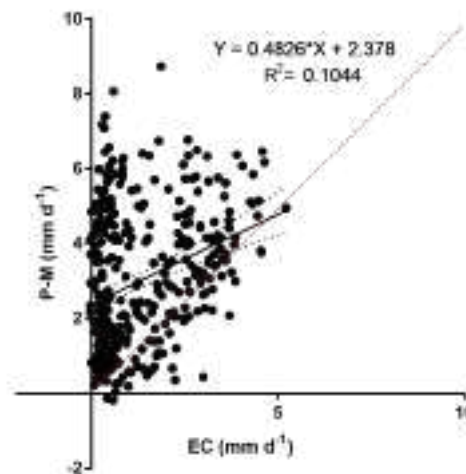
Al igual que en los casos anteriores casos la estación húmeda presenta una mayor correlación, como se puede observar en los rangos comparados con el método de Hamon la ET también es sobreestimada.



**Figura 7.** Correlación entre Hamon contra EC, a) estación húmeda y b) estación seca.

En el caso de la estación seca, la situación es similar que en el método anterior, pero la correlación es casi nula

Para la situación del método de Turc, el cual estima la ET en mm por mes, la evapotranspiración es la total que se puede presentar en el mes, ya que se refiere a la ET potencial. La Fig. 8 muestra las correlaciones de los datos mensuales de la estación húmeda y seca. Y aunque la  $R^2$  es alta, los rangos que se muestran de ET en caso de Turc son altos y la suma mensual de EC es baja, en este sentido cabe destacar que la correlación alta se debe a la escasez de datos.



**Figura 8.** Grafica de correlación entre Turc y Eddy covariance, a) estación húmeda y b) estación seca.



## Correlación con los métodos de referencia

El método de referencia, como ya se mencionó anteriormente, es el de la FAO 56; la correlación entre éste y los datos de *Eddy covariance* se presentan en la Fig. 9. La  $R^2 = 0.10$ , es baja, por lo cual también se llevaron a cabo comparaciones estacionales.

La estación que se observa en la Fig. 10 corresponde a la correlación en la estación húmeda, pero en la estación seca la correlación disminuyó de forma importante.

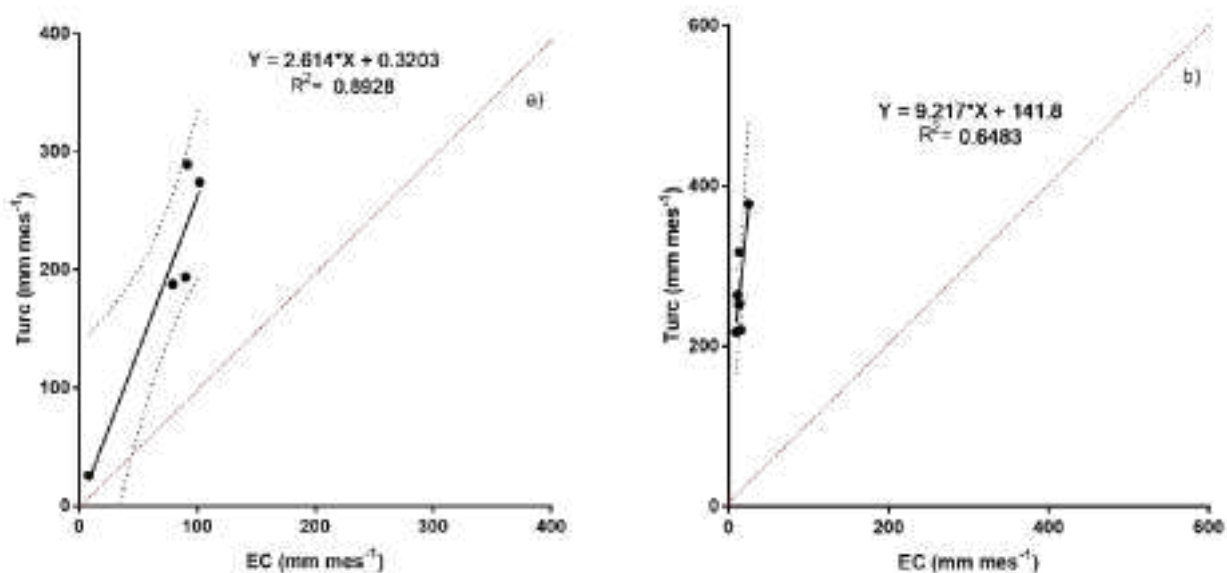


Figura 9. Correlación entre el método de la FAO-56 Penman-Monteith y los datos de *Eddy Covariance*.

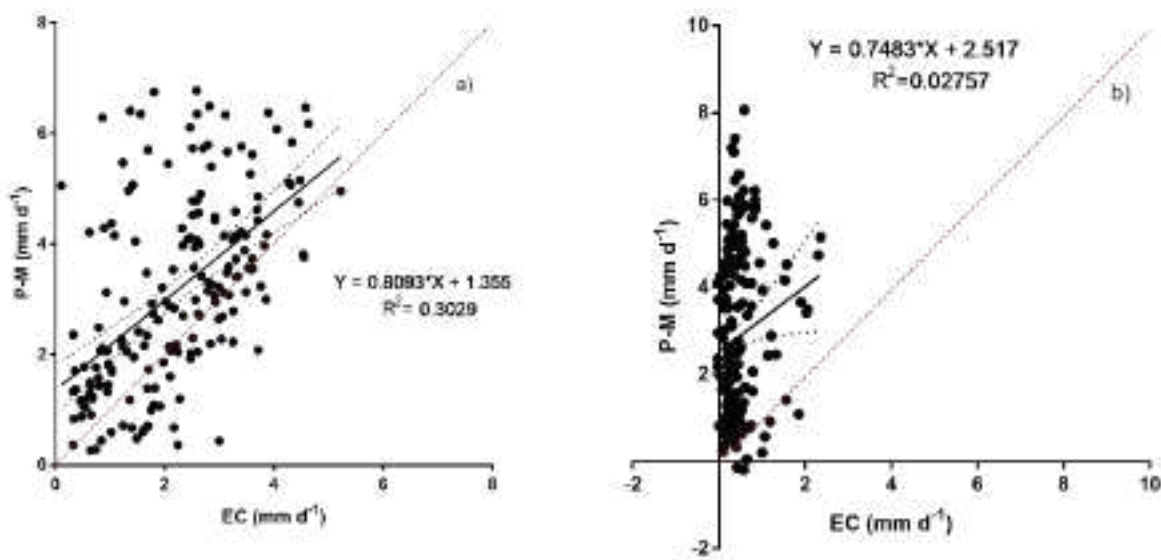


Figura 10. Correlación entre ET de referencia (Penman-Monteith) y EC, a) estación húmeda y b) estación seca.

## Correlación con los Sensores Remotos

En el caso de la comparación entre la evaporación reportada por MODIS a la determinada con EC se muestra en la Fig. 11. En este caso se tomaron los 4 datos por mes de MODIS, se promediaron y se multiplicaron por el número de días del mes para obtener el total de ET mensual; las correlaciones se obtuvieron estacionalmente. Para la estación húmeda la correlación resultó con un  $R^2$  de 0.627, valor similar al caso del método de Turc, y con valores muy altos respecto a la estimación con MODIS, mientras que la evaporación con EC es menor. Claramente, el producto de MODIS sobreestima la ET.

## CONCLUSIONES

Los métodos semiempíricos que se conocen actualmente para estimar la evapotranspiración no siempre actúan con precisión para ambientes semiáridos: son muy pocos los que consiguen acercarse al valor real de ET, ya que las dinámicas y las características climáticas, morfológicas y fisiológicas de cada sitio son fundamentales. Además, cada sitio

tiene condiciones particulares que influyen la cantidad de agua necesaria para satisfacer la demanda evaporativa de la atmósfera.

Se puede concluir que en este sitio la humedad relativa es sensible en las ecuaciones que estiman la ET, y esta se vuelve una variable de control para los modelos más integrales.

La precipitación que se registró dentro de la serie de tiempo que se tomó en cuenta para este estudio fue de 255 milímetros para el año de 2017, y 423 milímetros para el año 2018, esta situación se observa en las correlaciones de las estaciones secas, cuando los datos parecen no tener una relación en cierto rango.

Debido a la sensibilidad de la respuesta de los ecosistemas semiáridos, evidenciado en este estudio para el sitio de Bernal, es recomendable que los modelos que solo toman en cuenta la temperatura del lugar sean utilizados con discreción para estimaciones en sitios similares, ya que la sensibilidad es muy alta y los valores muy alejados de los de ET real.

En este contexto la correlación entre las mediciones de EC y la estimada con la relación de Makkink, resultó aceptable. De la

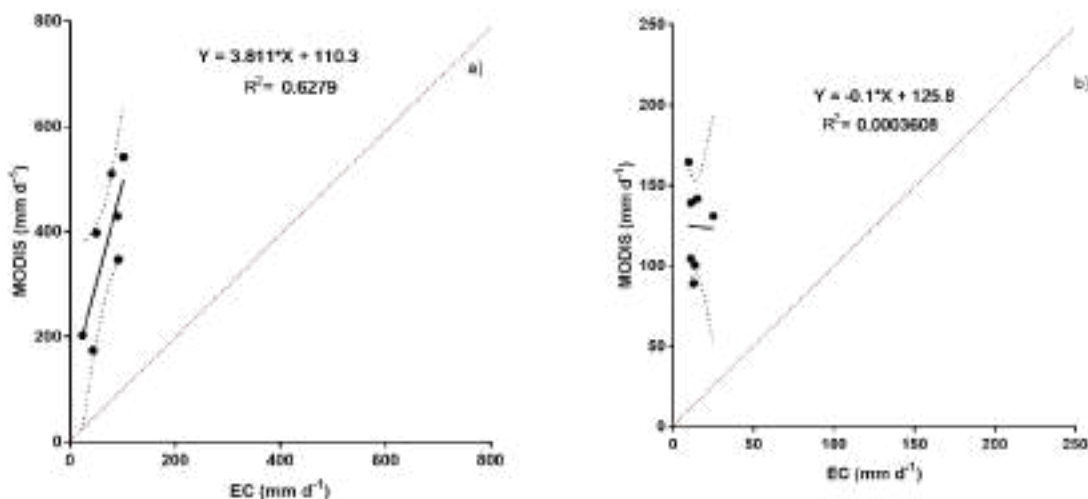


Figura 11. Grafica de correlación entre MODIS y Eddy covariance.



misma forma aconteció con los datos MODIS. Sin embargo, en ambos casos la ET, es necesario ajustar la evaporación en forma proporcional entre los métodos comparados, para ajustar la evaporación estimada con criterios semiempíricos. Por otra parte, las estaciones *Eddy Covariance* permiten tener una valoración del grado de incertidumbre de las relaciones empíricas cuando son aplicadas a climas semiáridos, y de esta manera mejorar las estimaciones de los recursos hídricos para este tipo de ecosistemas semiáridos.

## REFERENCIAS

[1] SEDEA, *Anuario Estadístico del Sector Rural*, Secretaría. Querétaro, 2016.

[2] R. G. Allen, *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Food & Agriculture Org, 2006.

[3] D. Martínez Granados, *Economic valuation of water use for irrigation in the Segura river basin. Assessment of economic instruments for aquifer management*, Universidad. Cartagena, 2015.

[4] O. M. M. OMM, *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos OMM N°8\_ actualizado 2010*. 2017.

[5] J. F. Reynolds, P. R. Kemp, and J. D. Tenhunen, "Effects of long-term rainfall variability on evapotranspiration and soil water distribution in the Chihuahuan Desert: A modeling analysis," *Plant Ecol.*, vol. 150, no. 3, pp. 145–159, 2000.

[6] CONAGUA, "Atlas," *Atlas*, vol. 119, no. 3, pp. 859–867, 2015.

[7] CONAGUA, "Estadísticas del Agua en México, Edición 2016", p. 282, 2016.

[8] F. Marini, M. Santamaría, P. Oricchio, C. M. Di Bella, and A. Basualdo, "Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS," *Rev. Teledetec.*, vol. 2017, no. 48, pp. 29–41, 2017.

[9] C. W. Thornthwaite, "An Approach toward a Rational Classification of Climate," *Geogr. Rev.*, vol. 38, no. 1, p. 55, 1948.

[10] G. F. Makkink, "Testing the Penman

formula by means of lysimeters.pdf," *J. Inst. Water Eng.*, vol. 11, pp. 277–288, 1957.

[11] E. M. Douglas, J. M. Jacobs, D. M. Sumner, and R. L. Ray, "A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types," *J. Hydrol.*, vol. 373, no. 3–4, pp. 366–376, 2009.

[12] S. Čadro, M. Uzunović, J. Žurovec, and O. Žurovec, "Validation and calibration of various reference evapotranspiration alternative methods under the climate conditions of Bosnia and Herzegovina," *Int. Soil Water Conserv. Res.*, vol. 5, no. 4, pp. 309–324, 2017.

[13] G. Burba, *Eddy Covariance Method*. Lincoln, Nebraska: LI-COR, Inc., 2013.

[14] N. An, S. Hemmati, and Y. Cui, "Assessment of the methods for determining net radiation at different time-scales of meteorological variables," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 9, pp. 239–246, 2017.

[15] M. Córdova, G. Carrillo-rojas, P. Crespo, B. Wilcox, and R. Céleri, "Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data," vol. 35, no. 3, pp. 230–239.

[16] J. Delgado-balbuena et al., "DE CARBONO EN ECOSISTEMAS TERRESTRES Y DATABASE OF VERTICAL CARBON DIOXIDE FLUXES AT TERRESTRIAL AND COASTAL ECOSYSTEMS IN MEXICO," pp. 93–108, 2018.

[17] M. E. Jensen, R. D. Burman, and R. G. Allen, "Evapotranspiration and irrigation water requirements, ASCE Manuals and Reports an Engineering Practice, No. 70," 1990.

[18] S. Trajkovic and S. Kolakovic, "Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations Under Humid Conditions," pp. 3057–3067, 2009.

[19] W. G. M. Bastiaanssen, M. Ahmad, and Y. Chemin, "Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin," vol. 38, no. 12, pp. 1–9, 2002.

[20] J. T. Yarad Zaror, "Estimación de la distribución espacial de evapotranspiración usando imágenes satelitales de temperatura de suelo. validación en la cuenca alta del río elqui," Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018.





# **ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO PARA EL PRONÓSTICO DE INDICADORES EN EDUCACIÓN SUPERIOR: CASO DE LAS TASAS DE ABSORCIÓN, COBERTURA Y ABANDONO EN MÉXICO**

---

Analysis of Time-series for the Forecast of Indicators in Higher education: The  
Case of Absorption, Coverage and Dropout Rates in Mexico

Yurixhi Andaya Hernández<sup>1</sup>, Eric Leonardo Huerta Manzanilla<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia  
\*eric.huerta@uaq.mx

## RESUMEN

En México, las tasas de absorción, cobertura y abandono son importantes indicadores de la capacidad del sistema educativo para atender a la población en edad escolar dentro de los diferentes niveles educativos. A su vez, estas tasas son parte de los indicadores de la llamada "trayectoria escolar" y, debido a los fenómenos que reflejan cada una de ellas, se espera que la evolución de la absorción y la cobertura tenga un constante ascenso a través del tiempo, mientras se espera que el abandono tienda al descenso. En las últimas décadas, se ha observado un aumento sostenido en la tasa de cobertura en el nivel superior; en tanto la tasa de absorción, por el contrario, parece disminuir y el abandono presenta ascensos y descensos constantes. Con base en datos históricos de los últimos 24 años, se realizó un pronóstico de los niveles que estas tasas podrían alcanzar durante los próximos 3 años. Fueron empleados modelos ARIMA debido a su probada capacidad para la proyección de pronósticos completos y bastante aproximados. El objetivo de este trabajo es mostrar la utilidad y pertinencia del empleo de herramientas estadísticas de pronóstico para proyectar el comportamiento de fenómenos en el campo educativo. Del pronóstico realizado, los datos sugieren que se espera un crecimiento sostenido para la tasa de cobertura en los próximos 3 años; mientras que las tasas de absorción y abandono presentan fluctuaciones en su comportamiento, de modo que no es claro si crecerán o decrecerán en este mismo periodo.

**Palabras clave:** educación superior, indicadores educativos, modelos ARIMA, pronóstico, análisis estadístico.

## ABSTRACT

In Mexico, the rates of absorption, coverage and dropout are important indicators of the ability of the education system to attend to

the school-age population, at the different educational levels. In turn, these rates are part of the indicators of the "school trajectory" and, due to the phenomena that each of them reflects, it is expected that the evolution over time of absorption and coverage will be in constant growth, while the dropout rate is expected to decrease. In the last decades, there has been a sustained increase in the coverage rate at the higher level, while the absorption rate seems to decrease, and the dropout presents constant ascents and descents. Based on historical data from previous 24 years, it is intended to forecast the levels that such rates could reach during the next 3 years. The ARIMA models were used because of their proven ability to project complete and accurate forecasts. The aim of this work is to show the usefulness and relevance of statistical forecasting tools to project the behavior of phenomena in the educational field. From the forecast made, the data suggests that a sustained growth is expected for the next 3 years for the coverage rate; while absorption and abandonment rates show fluctuations in their behavior, so it is unclear whether they will increase or decrease in this same period.

**Keywords:** higher education, educational indicators, ARIMA models, forecast, statistical analysis

## INTRODUCCIÓN

Los indicadores educativos son herramientas que sirven para analizar el funcionamiento de los sistemas educativos y son de especial importancia debido a que permiten medir y conocer el desempeño de las acciones educativas respecto a una meta o un estándar [1]. En México, hasta hace poco tiempo la información sobre el sistema educativo era escasa y usualmente poco actualizada, por lo que se contaba con pocos indicadores. En consecuencia, se analizaba e interpretaba el funcionamiento del sistema educativo con datos deficientes y limitados. El reciente avance en los campos de la informática y la



computación ha facilitado el procesamiento y distribución de la información, sin embargo, un problema inherente a la información del ámbito educativo es que ésta puede tener interpretaciones diversas debido a su naturaleza fundada en acontecimientos de índole social. En este sentido, el empleo de herramientas estadísticas permite el análisis de los distintos fenómenos educativos desde una perspectiva cuantitativa [2].

El análisis de los indicadores educativos del nivel superior se torna de interés cuando su crecimiento se compara con el de los otros niveles educativos. Como ejemplo, se puede observar que en años recientes se ha logrado una cobertura cercana a un 100 % en el nivel básico, pero los rezagos en nivel superior son evidentes, pues se atiende a poco más del 30 % de la población en la edad escolar correspondiente a este nivel. Esto implica que muchos jóvenes no tienen la oportunidad de continuar sus estudios en el nivel superior y con ello se frena la competitividad, dado que se inhibe la formación de recursos humanos que impulsen la productividad y contribuyan al desarrollo nacional, y esto representa importantes costos sociales [3].

En el escenario mexicano, de acuerdo con el Reporte de Indicadores Educativos [4], los indicadores principales en el nivel superior son: a) absorción, b) cobertura y c) abandono.

La absorción se refiere esencialmente a la proporción de estudiantes que, al final de cierto nivel educativo, acceden de inmediato al siguiente nivel; por su parte, la cobertura mide el porcentaje de estudiantes matriculados en el nivel educativo correspondiente a su edad; mientras que el abandono refleja la cantidad de alumnos que dejan la escuela entre ciclos escolares consecutivos. Estos tres indicadores incluyen a la educación normal y a las licenciaturas y, en el caso de la tasa de cobertura, ésta considera a los estudiantes pertenecientes a una cohorte que va de los 18 a los 22 años. Dentro del reporte Panorama Educativo de México [5], se establecen los referentes para cada uno de es-

tos indicadores. Para el caso de la tasa de absorción, se considera que, los estudiantes deberían mantener una trayectoria regular en educación, por lo que el objetivo de este indicador es alcanzar el 100 %. Por su parte, para la tasa de abandono se establece que el sistema educativo debe retener al 100 % de los alumnos, por lo cual el referente de este indicador queda establecido en 0 %.

Finalmente, la tasa de cobertura señala que la totalidad de estudiantes de edades normativas para cursar un determinado nivel educativo deberían encontrarse efectivamente cursándolo, a partir de lo cual se establece el referente de este indicador en 100 %. Con base en estos referentes y las técnicas de modelado estadístico, como los pronósticos, se pueden analizar y proyectar patrones de datos pasados para determinar el rango en el que probablemente se incluirán valores futuros y visualizar si, según el comportamiento histórico de estos indicadores, su evolución va en el sentido esperado o si, por el contrario, se requiere la implementación de políticas y/o acciones que las impulsen en el sentido deseado.

Los pronósticos son una herramienta que proporciona una estimación cuantitativa de la probabilidad de que ocurra uno o varios eventos futuros, además permiten llegar a comprensiones más complejas de un fenómeno a través del análisis histórico de datos [6]. Entre los modelos más conocidos se encuentran los de suavización, análisis de correlación y ARIMA (modelo autorregresivo integrado de promedio móvil).

Estos últimos son especialmente populares debido a su flexibilidad para ajustarse a los datos y su capacidad para modelar diversas series de tiempo, con o sin componentes de tendencia o estacionales, para generar pronósticos [7].

Los modelos ARIMA son modelos paramétricos que tratan de obtener la representación de una serie en términos de la interrelación de sus datos a través del tiempo. Entre sus principales ventajas se encuentran: a) se aplican para datos tanto discretos como contin-

uos, b) sólo se pueden aplicar a datos espaciados equidistantemente en intervalos discretos de tiempo, c) son útiles para tratar series que presentan patrones estacionales, y d) pueden ser aplicados a series estacionarias y no estacionarias.

Debido a sus bondades, estos modelos son empleados en diversos campos disciplinares como economía, meteorología, astronomía, demografía, marketing y sociología, entre otros [7] [8]. Tradicionalmente, estos modelos se desarrollan en 4 etapas, que son:

1. Identificación del modelo;
2. estimación de los parámetros implícitos del modelo;
3. verificación de supuestos y
4. uso del modelo (pronósticos).

Para hacer una buena representación, es necesario elegir un intervalo de tiempo que capture un comportamiento descriptivo para el patrón que se desea analizar, y este problema depende usualmente de la periodicidad con la que se obtengan los datos (índices mensuales, anuales, trimestrales, entre otros) [9]. Sus parámetros principales son los que indican el orden de los distintos componentes del modelo: autorregresivo ( $p$ ), integrado ( $d$ ) y de media móvil ( $q$ ).

Un modelo autorregresivo realiza una regresión sobre la misma variable pero en distinto periodo de tiempo ( $t-1$  y  $t$ ). Un modelo integrado es un proceso no estacionario que se convierte en estacionario después de realizar algunas operaciones de diferencias (diferenciación). Y un modelo de medias móviles describe una serie de tiempos estacionaria [10]. La finalidad de los modelos ARIMA es encontrar el arreglo de sus componentes que mejor se ajuste a una serie de datos para realizar un pronóstico de sus valores futuros. Si bien se cuenta con la metodología tradicional de cuatro etapas para su cálculo, se han desarrollado funciones automáticas para la realización de este proceso.

En este trabajo se empleó el *software* R

para el desarrollo de los modelos ARIMA de las tres series de tiempo bajo estudio. En ese sentido, para el establecimiento del modelo ARIMA más adecuado se utilizó una función automática, descrita en la metodología. Se espera que este trabajo pueda ser un apoyo para la aplicación de modelado ARIMA, incluso para las personas que tienen conocimientos básicos sobre el tema. Además, es importante mencionar que está totalmente enfocado a mostrar la aplicación de una herramienta conocida, como lo es este tipo de modelado, a un ejemplo en el campo de la investigación educativa, mas no al desarrollo de una nueva herramienta ni al análisis profundo de alguna problemática educativa en el nivel superior.

## METODOLOGÍA

Los datos que se analizan en este trabajo corresponden a un histórico de 24 años, desde el periodo 1994-1995 hasta el periodo 2017-2018. Resulta relevante señalar que, debido a que se trata de datos de ciclos escolares, estos van de agosto de un año a julio del año siguiente. Los datos analizados corresponden al Reporte de Indicadores Educativos de la Secretaría de Educación Pública [4].

### Modelado ARIMA

La construcción de modelos ARIMA se lleva a cabo de forma iterativa mediante un proceso en el que se pueden distinguir cuatro etapas [10]:

- a. Identificación. El objetivo es determinar los órdenes  $p$ ,  $d$ ,  $q$  que parecen apropiados para reproducir las características de la serie bajo estudio.
- b. Estimación. Se realizan inferencias sobre los parámetros, condicionadas a que el modelo investigado sea apropiado.
- c. Validación. Se realizan contrastes para comprobar si el modelo se ajusta a los datos, en caso de no ser así, se analizan las posibles discrepancias del modelo



- propuesto para poder mejorarlo.
- d. Predicción. Se obtienen pronósticos en términos probabilísticos de los valores futuros de la variable.

## Identificación

El objetivo de esta etapa es seleccionar el modelo ARIMA ( $p, d, q$ ) apropiado para la serie, es decir, que reproduce las características de la serie. La identificación del mejor modelo se desarrolla en dos fases:

- A. Análisis de estacionariedad. Se determinan las transformaciones que son necesarias para obtener una serie estacionaria, esto es, hacer que los datos posean una media y una varianza constantes a lo largo de la serie.
- B. Elección de los órdenes  $p$  y  $q$ . Una vez obtenida la serie estacionaria, el objetivo es determinar el proceso estacionario ARMA ( $p, q$ ) que la haya generado.

Para esta fase se realiza una serie de operaciones que van de la identificación de la tendencia y estacionalidad al cálculo de diferencias para lograr la estacionariedad de la serie. En este artículo se mencionan todas las etapas originales de la construcción de los modelos, sin embargo, se emplean algunas operaciones automáticas, de forma que la implementación sea sencilla para cualquier lector, sin importar su área de conocimiento. Se prioriza la interpretación de los datos obtenidos en cada fase sobre los aspectos técnicos de los modelos.

## Representación gráfica

En la etapa de identificación, la representación gráfica es de utilidad para visualizar la evolución de las series a lo largo del tiempo y otras características como tendencia, estacionalidad y estacionariedad. La tendencia se entiende como un componente de largo plazo que representa el crecimiento o decrecimiento de una serie histórica; la estacionariedad se refiere a las fluctuaciones estacio-

nales que se pueden encontrar en los datos que son clasificados en periodos de tiempo específicos —años, trimestres, meses o semanas— y no debe confundirse con la estacionariedad, ya que son conceptos distintos. La estacionariedad es una característica en la cual una serie tiene media y varianza constantes a lo largo del tiempo y no presenta tendencia [7].

## Análisis de la tendencia

La tendencia es un componente de largo plazo que representa el crecimiento o decrecimiento de una serie histórica. Un primer paso para su análisis es visualizar el comportamiento de las series a través de gráficas. En la Fig. 1 se puede observar que la tasa de absorción tiene una tendencia en descenso, mientras que la tasa de cobertura refleja una clara tendencia en ascenso. Por su parte, la tasa de abandono parece no presentar tendencia alguna.



**Figura 1.** Comportamiento histórico de las tasas de absorción, cobertura y abandono en educación superior.

### • Análisis de la estacionariedad

El análisis de la estacionariedad se puede realizar a través de los gráficos de la función de autocorrelación (ACF) y de autocorrelación parcial (PACF).

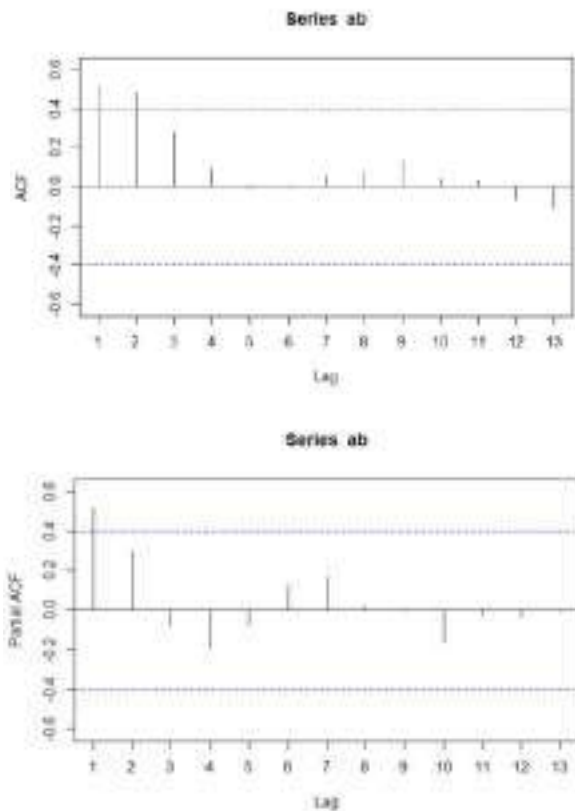
Estas funciones se utilizan para describir la presencia o ausencia de correlación entre los datos de las series de tiempo, señalando

do si las observaciones pasadas influyen en las actuales. Cuando una serie no presenta estacionariedad, esto se refleja a través de picos que sobrepasan los límites de significancia de manera repetida y en *lags* específicos. Los *lags* son el número de períodos de tiempo que separan a los datos de las series de tiempo. Por el contrario, cuando una serie es estacionaria las barras no sobrepasan los límites de significancia.

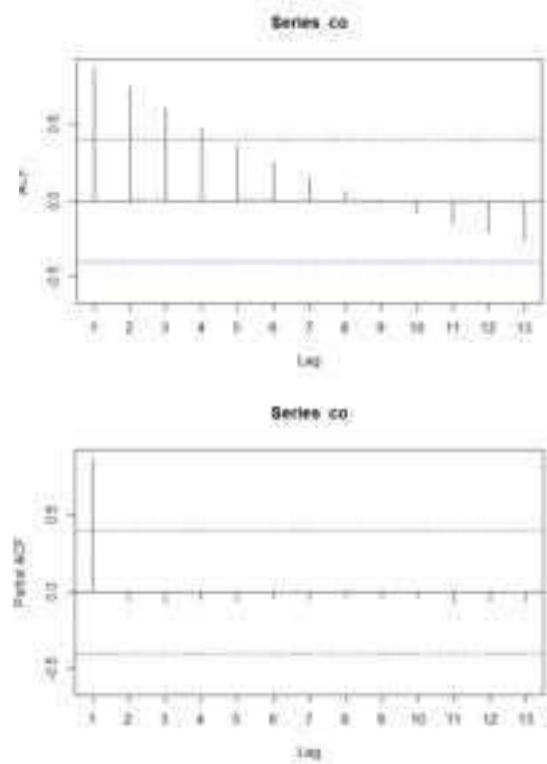
La estacionariedad es importante debido a que es una característica requerida previo a la selección de un modelo ARIMA.

Las funciones de ACF y PACF nos ayudan además a conocer a qué *lags* los datos son significativos, es decir, nos ayudan a establecer los ciclos o periodos en los que se presenta estacionalidad.

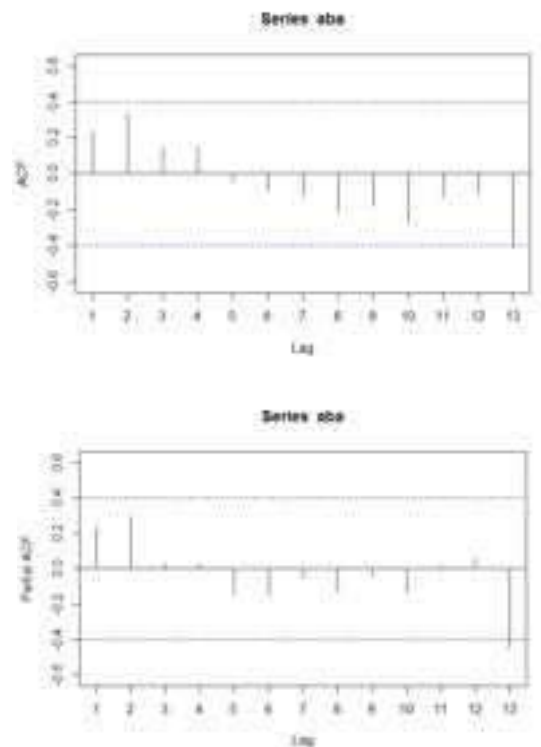
Los correlogramas para las funciones ACF y PACF de las tasas de absorción, cobertura y abandono se muestran en las Figs. 2-4.



**Figura 2.** Funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de la tasa de absorción.



**Figura 3.** Funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de la tasa de cobertura.



**Figura 4.** Funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de la tasa de abandono.



De los correlogramas se observa:

Para la tasa de absorción:

- a. Análisis de la ACF. Debe omitirse la primera barra, ya que corresponde a la autocorrelación con la misma observación; por ende, la segunda barra sí es significativa debido a que rebasa el límite de significancia, y representa un *lag* al cual la serie puede ser estacional o, en este caso, que la autocorrelación no es significativa para  $lags > 2$ .
- b. Análisis de la PACF. Al igual que en la ACF, se omite la primera barra por corresponder a la autocorrelación con la misma observación. Posteriormente, no se identifican *lags* significativos (Fig. 2).

Para la tasa de cobertura:

- a. Análisis de la ACF. Se elimina la primera barra y se observa que la segunda, tercera y cuarta barra son significativas, lo cual podría indicar que la autocorrelación no es significativa para  $lags > 4$ .
- b. Análisis de la PACF. Al igual que en la tasa de absorción, no se identifican *lags* significativos (Fig. 3).

Para la tasa de abandono:

- a. a) Análisis de la ACF. No hay barras fuera de los límites de significancia, por lo que no se identifican *lags* significativos.
- b. b) Análisis de la PACF. Se observa que la barra en el lag 13 es significativa, lo que podría significar que la autocorrelación no es significativa cuando los *lags* son  $> 13$  (Fig. 4).

La significancia de los lags o retardos es relevante porque indica el número de periodos de tiempo en los cuales los datos se correlacionan.

Por ejemplo, para un lag significativo en 5, si el periodo de tiempo bajo estudio fuera

de años, podría significar que los datos analizados tienen una relación que se contamina o confluye de alguna forma cada 5 años y, debido a eso, se genera una relación en ese periodo de tiempo específico, lo que requeriría decir que cada 5 años se espera un comportamiento inusual que lo hará significativo para esa serie de tiempo.

En el caso de las tasas de absorción, cobertura y abandono, los datos sugieren que no existen *lags* altamente significativos en ninguna de las series, o que se requieren más datos para identificar la existencia de alguno.

## Estimación

Una vez que se identificaron las tendencias y elementos estacionales y se determinó si la serie es estacionaria o no, el siguiente paso fue transformar aquellas series que de origen no fueran estacionarias, esto es, conseguir que su media y varianza sean constantes a través del tiempo; además, se requirió eliminar la tendencia y, a partir de lo observado en la transformación, se determinó el mejor modelo ARIMA para las series de tiempo de interés.

De lo observado en las Figs. 2-4 se identificó que las series de absorción y cobertura no son estacionarias y requieren de una o varias transformaciones para su ajuste, mientras que los datos sugieren que la serie de abandono es estacionaria de origen.

En este trabajo se plantea la utilización de una función automática para la realización del proceso de transformación y selección de modelo en el *software* R, como se explica a continuación:

- Para el desarrollo de modelos ARIMA en R, se debe considerar que existen diversas librerías para la realización de pronósticos, por lo que fue indispensable la instalación de aquellas que sean necesarias antes de comenzar a trabajar con las series. Para este trabajo se utilizaron las librerías "*readxl*", "*xts*", "*astsa*" y "*forecast*".



- Una vez que instaladas las librerías, el primer paso fue llamar a la base de datos que contenía la información de las series de tiempo con las que se trabajarán. En este caso, la base de datos provino de un documento de formato .xls.
- Después de ser llamada la base de datos, se le asignaron las propiedades de una serie de tiempos a los datos a través de la función "ts".
- Después se generó el modelo ARIMA de forma automática con la función `auto.arima`. De donde se obtiene lo siguiente:

### Serie: Tasa de absorción

```
ARIMA(1,1,0):
Coefficients:
    w1
    -0.4288
s.e.      0.2440

sigma^2 estimated as 17.46:  log likelihood=-65.18
AIC=134.35  AICC=134.95  BIC=136.62

Training set error measures:
Training set:  MAE      RMSE      MAE      MPE      MAPE
              -1.29258  4.00039  2.854209  -1.70429  4.206115
Training set:  0.9763676  0.1129311
```

El modelo automático calculado para la tasa de absorción es de la forma (1, 1, 0), lo que indica que se cuenta con un proceso de autorregresión, uno de integración y ninguno de promedio móvil.

### Serie: Tasa de cobertura

```
ARIMA(0,1,0) with drift
Coefficients:
    drift
    0.8397
s.e.      0.0440

sigma^2 estimated as 0.04659:  log likelihood=3.14
AIC=-2.28  AICC=-1.68  BIC=-0.01
```

El modelo automático calculado para la tasa de cobertura es de la forma (0, 1, 0), lo que indica que no se cuenta con procesos autorregresivos, se tiene un proceso de integración y ninguno de medias móviles.

Para este modelo, al no contar con procesos de autorregresión o medias móviles y siendo  $d = 1$ , la función automática agrega el parámetro conocido como deriva o *drift* para realizar el cálculo de los coeficientes [11].

### Serie: Tasa de abandono

```
ARIMA(0,0,0) with non-zero mean
Coefficients:
    mean
    7.6311
s.e.      0.1948

sigma^2 estimated as 0.9504:  log likelihood=-32.93
AIC=69.87  AICC=70.44  BIC=72.22
```

El modelo automático calculado para la tasa de cobertura es de la forma (0, 0, 0), lo que indica que no se tienen procesos autorregresivos, de integración o de promedios móviles. Esto además denota que la serie es aparentemente lo que se conoce como ruido blanco. El ruido blanco es un tipo de serie con un comportamiento aleatorio permanente, es decir, a los datos toman valores sin ninguna relación unos con otros través del tiempo. A partir de su correlograma ACF (Fig. 4), al no haber ningún coeficiente de correlación significativo, se puede decir que los datos son independientes.

## Validación

Con una primera propuesta de modelos ARIMA para las tres series de tiempo, se contrastó con otros posibles modelos para confirmar si los modelos propuestos son los mejores o si existe una configuración con un mejor ajuste.

### Serie: Tasa de absorción

## Agregando un proceso de promedios móviles

```
arma(a = ar, order = c(1, 1, 1))
Coefficients:
    ar1    ma1
    -0.3734  0.0507
s.e.      0.4089  0.1924

sigma^2 estimated as 16.68:  log likelihood = -65.17,  aic = 136.34
```

El valor de máxima verosimilitud (*log-likelihood*) aumenta de -65.18 a -65.17. El valor de AIC aumenta de 134.35 a 136.34, pero se sabe que mientras más pequeño sea el AIC, mejor se ajustará el modelo a los datos.



## Eliminando un proceso de autorregresión

```

arima(x = ab, order = c(0, 1, 1))
Coefficients:
      ma1
      0.6702
s.e.    0.1077
sigma^2 estimated as 0.3451: log likelihood = -20.7, aic = 45.4
Testing for error structure:
      var     cov     ma1     ma2     ma3
matraining var -1.69955 a -0.61818 2.42334 -1.88888 1.48978
matraining cov  0.8880318 -0.088370

```

El valor de máxima verosimilitud disminuye de -65.18 a -65.62 pero, como lo que se desea es maximizar la log-verosimilitud, el valor más alto del primer modelo es marginalmente mejor. El valor de AIC aumenta de 134.35 a 135.25.

Por lo tanto, los datos sugieren que el modelo generado en automático es el que se ajusta mejor a los datos debido a que sus valores de máxima verosimilitud y AIC son los más aceptables para la tasa de absorción.

*Serie: Tasa de cobertura*

## Agregando un proceso autorregresivo y un proceso de medias móviles

```

arima(x = co, order = c(1, 1, 1))
Coefficients:
      ar1     ma1
      0.9934  -0.1441
s.e.    0.0115  0.2420
sigma^2 estimated as 0.04929: log likelihood = 0.41, aic = 5.17

```

El valor de máxima verosimilitud disminuye de 3.14 a 0.41. El valor de AIC aumenta de -2.28 a 5.17, por lo que el valor del modelo automático es el más aceptable.

## Agregando un proceso autorregresivo

```

arima(x = co, order = c(1, 1, 0))
Coefficients:
      ar1
      0.9596
s.e.    0.0429
sigma^2 estimated as 0.06185: log likelihood = -2.08, aic = 8.18

```

El valor de máxima verosimilitud disminuye de 3.14 a -2.48. El valor de AIC aumenta de -2.28 a 8.16, por lo tanto, el valor del modelo automático es mejor.

## Agregando un proceso de medias móviles

```

arima(x = co, order = c(0, 1, 1))
Coefficients:
      ma1
      0.6702
s.e.    0.1077
sigma^2 estimated as 0.3451: log likelihood = -20.7, aic = 45.4

```

El valor de máxima verosimilitud disminuye de 3.14 a -20.7. Respecto a los valores de calidad relativa del modelo, el valor de AIC aumenta de -2.28 a 45.4.

Por lo tanto, los datos sugieren que el modelo generado en automático es el que se ajusta mejor a los datos para la tasa de cobertura.

*Serie: Tasa de abandono*

## Agregando un proceso de autorregresión

```

arima(x = aba, order = c(1, 0, 0))
Coefficients:
      ar1  intercept
      0.1982  7.531
s.e.    0.2498  0.325
sigma^2 estimated as 0.8202: log likelihood = -11.76, aic = 69.53

```

El valor de máxima verosimilitud aumenta de -32.93 a -31.76. El valor de AIC disminuye de 69.87 a 69.53.

## Agregando un proceso autorregresivo y un proceso de integración

```

arima(x = aba, order = c(1, 1, 0))
Coefficients:
      ar1
      -0.6027
s.e.    0.1805
sigma^2 estimated as 0.7267: log likelihood = -29.22, aic = 62.44

```

El valor de máxima verosimilitud aumenta de -32.93 a -29.22. El valor de AIC disminuye de 69.87 a 62.44.

## Agregando un proceso autorregresivo, un proceso de integración y un proceso de promedios móviles

```
arma(x = aba, order = c(1, 1, 1))
Coefficients:
      ar1      ma1
      -0.5089  -0.1381
s.e.      0.1072  0.1448
sigma^2 estimated as 0.7222:  Log Likelihood = -29.13, aic = 64.27
```

El valor de máxima verosimilitud aumenta de -32.93 a -29.13. El valor de AIC disminuye de 69.87 a 64.27.

Por lo tanto, de acuerdo con la evidencia, el modelo generado en automático no es el modelo que mejor se ajusta a los datos para la tasa de abandono. La evidencia sugiere que mediante procesos de autorregresión, integración y promedios móviles, se pueden obtener mejores ajustes.

### Predicción

Para realizar los pronósticos se utilizan como base los modelos resultantes de las etapas de estimación y validación mediante la función predict. Esta función permite establecer la cantidad de datos futuros o periodos que se desean predecir, así como agregar elementos estacionales si es que se consideran relevantes en alguna de las series. En este caso, la cantidad de periodos a predecir fue de 3 años para cada una de las tasas y no se agregaron elementos estacionales, ya que, como se estableció en el análisis de los correlogramas (Figs. 2-4), la evidencia sugiere que ninguna de las series cuenta con lags significativos como para suponer elementos de estacionalidad. Los resultados se muestran a continuación:

#### Pronóstico: Tasa de absorción

```
$pred
Time Series:
Start = 2018
End = 2020
Frequency = 1
[1] 73.46595 73.72448 73.98778

$se
Time Series:
Start = 2018
End = 2020
Frequency = 1
[1] 4.178271 4.618955 5.383593
```

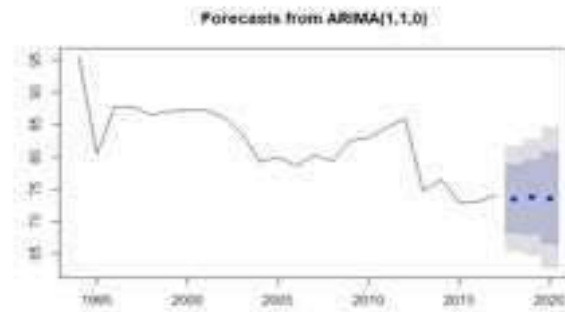


Figura 5. Valores pronosticados a tres años para la tasa de absorción.

La predicción se realizó sobre la base de un modelo de la forma (1, 1, 0). Es de notar que en la predicción se esperan ascensos y descensos en el comportamiento de la serie para los 3 años pronosticados, descendiendo de 73.95 (valor del periodo 2017-2018) a 73.47 (valor para 2018-2019), ascendiendo de nuevo a 73.72 (valor para 2019-2020) y luego descendiendo a 73.59 (valor para 2020-2021).

#### Pronóstico: Tasa de cobertura

```
$pred
Time Series:
Start = 2018
End = 2020
Frequency = 1
[1] 33.901381 34.650864 35.595439

$se
Time Series:
Start = 2018
End = 2020
Frequency = 1
[1] 0.8536112 0.9185096 1.1247839
```

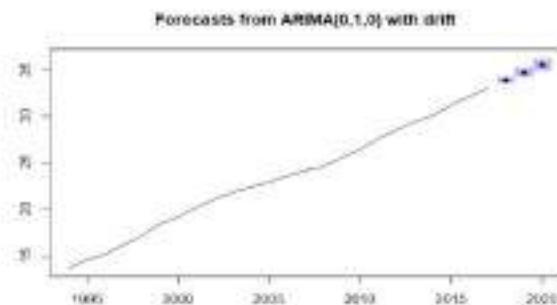
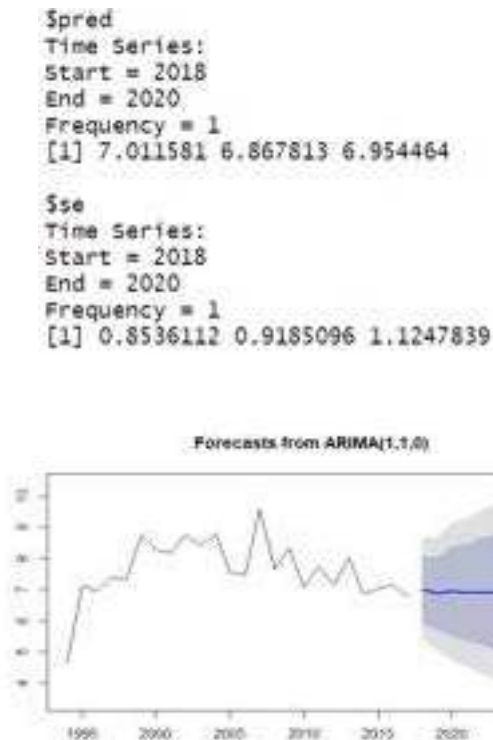


Figura 6. Valores pronosticados a tres años para la tasa de cobertura.



La predicción se realizó sobre la base de un modelo de la forma (1, 1, 0), y se espera que la cobertura crezca en un promedio de 0.8 % anual durante los siguientes tres años. Además, se observa en la Fig. 6 que el error esperado —señalado por los cuadros en color azul— es muy reducido respecto a los valores pronosticados.

#### Pronóstico: Tasa de abandono



**Figura 7.** Valores pronosticados a tres años para la tasa de abandono.

La predicción se realizó sobre la base de un modelo de la forma (1, 1, 0), y se esperan ascensos y descensos en el comportamiento de la serie para los 3 años pronosticados, ascendiendo de 6.77 (valor del periodo 2017-2018) a 7.01 (valor para 2018-2019), descendiendo de nuevo a 6.87 (valor para 2019-2020) y luego ascendiendo a 6.95 (valor para 2020-2021).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis de los datos históricos, las tasas de absorción y cobertura mostraron un comportamiento con tendencia pero sin elementos estacionales aparentes, mientras la tasa de abandono no reflejó tendencia ni estacionalidad, lo cual se comprobó a través del análisis gráfico de las funciones ACF y PACF. En el caso de la cobertura, su pronóstico es un reflejo de su comportamiento con tendencia creciente. Por otra parte, la absorción parece encontrarse en una etapa de estancamiento en la que su comportamiento es fluctuante, pero sin rebasar cierto nivel a pesar de tener una tendencia histórica decreciente en el pronóstico realizado. El abandono, de manera congruente con su comportamiento histórico, presenta un comportamiento fluctuante en el pronóstico. La ausencia de estacionalidad en las tres tasas indica que no existe un comportamiento cíclico.

Un primer paso para la determinación de los mejores modelos fue la eliminación de los elementos de tendencia y estacionalidad que pudieran contener las series, esto es, lograr obtener series estacionarias, lo que significa que las series deben tener una media y varianza constantes a través del tiempo. Esta eliminación es la llamada “fase de transformación” y, de manera usual, se realiza por medio de operaciones de diferenciación, donde se encuentran los logaritmos como una de las operaciones de diferenciación más comunes. La fase de transformación en este trabajo se realizó de manera automática utilizando la función *auto.arima*, en el *software* R. Esta función devuelve el mejor modelo ARIMA según los valores de calidad relativa del modelo (AIC, AICc, BIC) y del valor de máxima verosimilitud.

Los valores de calidad relativa de los modelos automáticos y de validación se muestran en la Tabla 1.

De acuerdo con los valores de calidad relativa observados en la Tabla 1, y considerando que se desea obtener los valores máximos de la log-verosimilitud y los valores más pequeños de AIC, los modelos resultantes de la función automática para las tasas de absorción y cobertura parecen ajustarse de manera adecuada a los datos de las series. Por su parte, para la función de abandono en la etapa de validación, los comparativos realizados demostraron que los modelos que contienen por lo menos un proceso  $p$ ,  $d$ ,  $q$  tienen mejores ajustes que el modelo automático; por ejemplo, el modelo de la forma (1, 1, 0). No debe olvidarse en este punto que una característica de los modelos ARIMA es que puede ajustar una gran

cantidad de modelos distintos a una misma serie de datos, por lo que es necesario que se tengan claros los criterios que se considerarán como óptimos para la aceptación e implementación de un modelo, ya que, aunque en ocasiones pueden tener valores de máxima verosimilitud y de calidad relativa similares, la configuración de cada modelo describe procesos con características distintas. Los pronósticos generados a partir de aquellos modelos ARIMA determinados con la función automática y en la etapa de validación siguen un comportamiento que parece ajustarse al comportamiento natural de las series.

En la Tabla 2 se muestra el comparativo del comportamiento general de los datos

**Tabla 1.** Valores de calidad relativa de los modelos.

	Log Verosimilitud	AIC
<b>Tasa de absorción</b>		
Modelo automático (1,1,0)	-65.18	134.35
Modelo de validación 1 (1,1,1)	-65.17	136.34
Modelo de validación 2 (0,1,1)	-65.62	135.25
<b>Tasa de cobertura</b>		
Modelo automático (0,1,0)	3.14	-2.28
Modelo de validación 1 (1,1,1)	0.41	5.17
Modelo de validación 2 (1,1,0)	-2.08	8.16
Modelo de validación 3 (0,1,1)	-20.7	45.4
<b>Tasa de abandono</b>		
Modelo automático (0,0,0)	-32.93	69.87
Modelo de validación 1 (1,0,0)	-31.76	69.53
Modelo de validación 2 (1,1,0)	-29.22	62.44
Modelo de validación 3 (1,1,1)	-29.13	64.27



históricos contra los datos pronosticados a partir de sus estadísticos básicos.

De la Tabla 2 puede observarse que los valores del error estándar promedio de los datos pronosticados son relativamente pequeños, lo que podría ser un indicio del adecuado ajuste de los datos a los modelos de pronóstico seleccionados. Por su parte, las medias y medianas tanto de los datos históricos como de los datos pronosticados son muy similares para cada una de las tasas, lo que parece indicar que las distribuciones de los datos son simétricas.

De las desviaciones estándar de los datos pronosticados, parece que los datos no se encuentran muy dispersos entre sí debido a sus valores pequeños, a diferencia de las desviaciones estándar de los datos históricos, que muestran dispersiones mayores en cada una de las tasas.

De lo obtenido en el desarrollo de modelos ARIMA y de lo observado en las Figs. 5-7 sobre el pronóstico del comportamiento de las tasas de absorción, cobertura y abandono en el nivel superior educativo mexicano, la evidencia sugiere que existirá una fluctuación en el comportamiento de las series en un pronóstico a tres años tanto para las tasas de absorción y abandono, mientras que se espera un crecimiento sostenido en el caso de la tasa de cobertura.

De manera general, el comportamiento de las tasas derivado del pronóstico realizado en este trabajo podría tener importantes implicaciones en el escenario educativo de acuerdo con lo siguiente:

1. Para la tasa de absorción: no existe evidencia de una tendencia de crecimiento dentro de los próximos 3 años, por lo que no se podría esperar que este indicador rebasara el 74% de absorción en educación superior de acuerdo con los datos pronosticados y esto representa una brecha importante con su nivel deseado del 100 %. De su comportamiento histórico (Fig. 1), la evidencia sugiere que incluso podría esperarse un decrecimiento en esta tasa que representaría un retroceso para alcanzar el nivel deseado.
2. Para la tasa de cobertura: la evidencia sugiere que esta tasa podría presentar un crecimiento sostenido dentro de los próximos 3 años, con un crecimiento anual promedio de 0.8 %, lo que parece indicar que esta tasa se encuentra evolucionando de manera positiva hacia su nivel ideal del 100 %.
3. Para la tasa de abandono: no existe evidencia de una tendencia de decrecimiento dentro de los próximos 3 años

**Tabla 2.** Comparativos de estadísticos básicos de datos históricos vs. datos pronosticados.

	Estadísticos descriptivos de los datos históricos (1994-2017)	Estadísticos descriptivos de los datos pronosticados (2018-2020)
Tasa de absorción	Media= 82.23 Error estándar promedio= 1.15 Desviación estándar= 5.66 Mediana= 82.76	Media= 73.59 Error estándar promedio=0.074 Desviación estándar= 0.129 Mediana= 73.59
Tasa de cobertura	Media= 23.32 Error estándar promedio= 1.17 Desviación estándar= 5.75 Mediana= 23.30	Media= 34.72 Error estándar promedio= 0.490 Desviación estándar= 0.849 Mediana= 34.65
Tasa de abandono	Media= 7.63 Error estándar promedio= 0.199 Desviación estándar= 0.975 Mediana= 7.53	Media= 6.94 Error estándar promedio= 0.042 Desviación estándar= 0.072 Mediana= 6.95

que indique que esta tasa tendrá un comportamiento que le permita alcanzar su nivel ideal de 0%. De los datos pronosticados se observa un comportamiento más bien errático, ya que crece y decrece sin una tendencia clara.

Finalmente, es importante señalar que una consideración sobre este análisis es la cantidad de datos que se tuvieron disponibles para la realización del pronóstico. Es sabido que, entre mayor cantidad de datos se tengan para realizar un pronóstico, este será más preciso, ya que con un amplio referente histórico se pueden visibilizar los patrones de comportamiento con mayor facilidad y, por ende, replicarlos en el pronóstico. También es importante mencionar que se realizó el pronóstico de una cantidad pequeña de años, debido a que entre mayor es la cantidad de periodos que se pretenden pronosticar, el nivel de error aumenta.

## CONCLUSIONES

Los modelos ARIMA se encuentran entre los modelos más versátiles para realizar pronósticos debido a que pueden ser empleados para estimar una amplia variedad de series de tiempo, tanto estacionales como no estacionales. A través de su proceso iterativo de cuatro etapas permiten identificar modelos tentativos, estimar parámetros, validar los modelos tentativos y, finalmente, calcular un pronóstico válido. Su utilización para estimar valores futuros en el campo de los indicadores educativos aporta herramientas de análisis cuantitativo que permiten tener un panorama general del comportamiento que tendrán ciertos fenómenos educativos en el corto y largo plazo. Si bien es importante resaltar que estos fenómenos se encuentran influenciados por una gran cantidad de variables cualitativas, el análisis numérico de su comportamiento histórico es apenas un acercamiento para entender su evolución, y comprender la mejor manera de orientar su

desarrollo en el sentido esperado.

El ejercicio desarrollado en este trabajo es una evidencia de que la aplicación de los modelos ARIMA para el pronóstico de datos del campo educativo es factible y puede ser accesible a personas de todos los campos del conocimiento.

De los resultados obtenidos en los pronósticos se observan algunos retos a enfrentar en el escenario educativo mexicano de nivel superior, ya que aunque la tasa de cobertura parece crecer hacia el nivel deseado, su crecimiento podría ser lento si se considera que en el nivel básico ya se ha alcanzado un nivel aproximado al 100 % desde hace algunos años. Por su parte, la tasa de abandono, aunque aparentemente oscila en un mismo nivel, no parece decrecer hacia su nivel esperado, lo que podría indicar que las acciones implementadas para atacar este indicador no van en el sentido correcto. Y en el caso de la tasa de absorción, aparentemente no ha dejado de decrecer a través de los años, lo que muestra que tiene un comportamiento totalmente opuesto al deseado y podría requerir algunas estrategias de intervención si lo que se desea es lograr que comience a crecer.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca para los estudios de posgrado.

## APÉNDICE

### Código R

```
#Librería para exportar documentos formato .xls y .xlsx
library(readxl)
#Librerías para pronósticos
library(xts)
library(astsa)
library(forecast)
#Exportar y visualizar datos de excel
data1<-read_excel("data1.xlsx")
View(data1)
#Estampa de tiempo
```



```
ab<-ts(data1$abs,start = 1994,end = 2017)
co<-ts(data1$cob,start = 1994,end = 2017)
aba<-ts(data1$abn,start = 1994,end = 2017)
#Funciones ACF y PACF
Acf(ab)
Pacf(ab)
Acf(co)
Pacf(co)
Acf(aba)
Pacf(aba)
#Modelos y pronóstico
fit1<-auto.arima(ab) #Encontrar modelo automático para absorción
summary(fit1)
plot(forecast(fit1,h=3))
fit2<-auto.arima(co) #Encontrar modelo automático para cobertura
summary(fit2)
plot(forecast(fit2,h=3))
fit3<-auto.arima(aba) #Encontrar modelo automático para abandono
summary(fit3)
plot(forecast(fit3,h=3))
plot(forecast(Arima(y=aba,order=c(1,1,0)),n.ahead=3))
co.m2<-arima(x=co, order=c(1,1,1)) #Evaluar modelo ARIMA (1,1,1) para co-
bertura
summary(co.m2)
co.m3<-arima(x=co,order = c(1,1,0)) #Evaluar modelo ARIMA (1,1,0) para
cobertura

summary(co.m3)
co.m4<-arima(x=co,order = c(0,1,1)) #Evaluar modelo ARIMA (0,1,1) para
cobertura
summary(co.m4)
ab.m2<-arima(x=ab, order = c(1,1,1)) #Evaluar modelo ARIMA (1,1,1) para
absorción
summary(ab.m2)
ab.m3<-arima(x=ab, order = c(0,1,1)) #Evaluar modelo ARIMA (0,1,1) para
absorción
summary(ab.m3)
aba.m2<-arima(x=aba, order = c(1,0,0)) #Evaluar modelo ARIMA (1,0,0) para
abandono
summary(aba.m2)
aba.m3<-arima(x=aba, order = c(1,1,0)) #Evaluar modelo ARIMA (1,1,0) para
abandono
summary(aba.m3)
aba.m4<-arima(x=aba, order= c(1,1,1)) #Evaluar modelo ARIMA (1,1,1) para
abandono
summary(aba.m4)
ab.pred<-predict(fit1,n.ahead = 3) #Predicción para absorción
ab.pred
co.pred<-predict(fit2,n.ahead = 3) #Predicción para cobertura
co.pred
aba.pred<-predict(aba.m3,n.ahead = 3) #Predicción para abandono
aba.pred
```

## REFERENCIAS

- [1] CEPAL, "Confiabilidad y utilidad para la evaluación de indicadores." Chile, 2018.
- [2] A. Márquez Jiménez, "Sistemas de indicadores educativos: su utilidad en el análisis de los problemas educativos," *Rev. Electrónica Sinéctica*, vol. 2006, no. 35, pp. 1–25, 2010.
- [3] O. Hernández *et al.*, "La educación superior en México: un estudio comparativo," *Cienc. Ergo Sum*, vol. 21, no. 3, pp. 181–192, 2014.
- [4] SEP, "Reporte de Indicadores Educativos," Mexico, 2018.
- [5] V. Medrano Camacho, R. R. Rojas Olmos, E. E. Valencia López, C. Mexicano

Melgar, E. G. Ángeles Méndez, and R. M. Bautista Espinosa, "Panorama educativo de México 2016. Indicadores del Sistema Educativo Nacional," pp. 34–35, 2017.

[6] C. E. Montenegro Marín, A. P. Gallego Torres, and P. Rocha Salamanca, "Evaluation model for stages of training in statistics in engineering," *Rev. Logos Cienc. Tecnol.*, vol. 8, no. 1, 2016.

[7] M. P. González Casimiro, *Análisis de series temporales económicas: modelos ARIMA*. 2017.

[8] J. Hernandez, *Modelación ARIMA*. 2014.

[9] D. A. López, N. Y. García, and J. F. Herrera, "Desarrollo de un modelo predictivo para la estimación del comportamiento de variables en una infraestructura de red," *Inf. Tecnol.*, vol. 26, no. 5, pp. 143–154, 2015.

[10] S. De la Fuente, *Series Temporales: Modelo Arima*. 2016.

[11] R. J. Hyndman and Y. Khandakar, "Automatic time series forecasting: The forecast package for R," *J. Stat. Softw.*, vol. 27(1), pp. 1–22, 2008.





# **DIAGNÓSTICO DE LA EROSIÓN DINÁMICA DE LA CUENCA DEL MEDIO BALSAS: PRESA HIDROELÉCTRICA EL CARACOL**

---

Diagnosis of Erosion Dynamics in the Balsas Basin: El Caracol  
Hydropower Dam

Olga Segura Jiménez<sup>1\*</sup>, Enrique González Sosa<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia

\*olgasegura92@gmail.com

\*egs@uaq.mx

## RESUMEN

La erosión del suelo se presenta de manera natural tanto en las cuencas como en los cauces de los ríos debido al impacto de las gotas de lluvia y el escurrimiento que ocurre posteriormente. Aunado a esto, la actividad humana ha acelerado los procesos erosivos al modificar la cobertura del suelo y al romper el equilibrio que hay entre erosión y sedimentación; por ejemplo, mediante la interrupción del paso de los ríos para la construcción de obras hidráulicas, como las presas hidroeléctricas. En el presente trabajo se hace un análisis con base en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) y los datos de estaciones hidrométricas dentro de la cuenca de estudio para el periodo 1984-2006. De esta manera se busca comprobar que el comportamiento de la erosión y escurrimiento se ve reflejado en las mediciones directas de sedimentos. De acuerdo con los resultados, se encontró que gran parte de la cuenca El Caracol se encuentra expuesta a una erosión severa. Por otro lado, con el análisis de la doble curva masa de cinco estaciones hidrométricas, se observa que desde el año 1992 el material de lavado en suspensión ha tendido a disminuir con el paso de los años.

**Palabras clave:** erosión, sedimentos, escurrimiento, cuenca, RUSLE

## ABSTRACT

Soil erosion occurs naturally in both river basins and riverbeds due to the impact of raindrops and the subsequent runoff. In addition, human activities have accelerated erosive processes by modifying the soil cover and breaking the balance between erosion and sedimentation through the interruption of river flows for the construction of hydraulic facilities such as hydroelectric dams. In the present work, an analysis is made based on the Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and on data from hydrometric stations within the

basin studied for the period 1984-2006. The intention is to verify that the behavior of erosion and runoff is reflected in the direct measurements of sediments. According to the results, it was found that a large part of the El Caracol Basin is exposed to severe erosion. On the other hand, with the analysis of the double mass curve of five hydrometric stations, it is observed that from 1992 the suspension washing material tends to decrease over the years.

**Keywords:** erosion, sediments, runoff, basin, RUSLE

## INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores problemas en los embalses es la reducción de su capacidad de almacenamiento debido a los sedimentos que se depositan en su interior. Esto sucede cuando la construcción de una presa rompe el equilibrio entre la erosión y la sedimentación con la interrupción del paso del río, lo que aumenta los niveles de agua y a menudo causa desbordamientos. Si la sedimentación es muy alta, existe la posibilidad de que se bloquee la tubería por donde se libera el agua, lo que reduce el tiempo de vida útil.

La erosión del suelo se da a través de un proceso de tres etapas: desprendimiento, transporte y deposición.

Comienza con el desprendimiento de las partículas del suelo causado por el impacto de las gotas de lluvia o el arrastre del agua. Estas partículas desprendidas son transportadas por el flujo de agua y se depositan cuando la velocidad del agua disminuye por el efecto de la pendiente, la cobertura del suelo o alguna obstrucción. El tamaño de las partículas transportadas es directamente proporcional a la velocidad del agua, mientras que la deposición está relacionada con la concentración y densidad del tamaño de los sedimentos. [1]

La intensidad de la lluvia y el volumen de escurrimiento son los principales determinantes de la erosión, sin embargo, la principal



causa de erosión en pendientes pronunciadas o en áreas con escasa cobertura vegetal es el flujo concentrado, cuya tasa se ve determinada por la capacidad de transporte. [2] Si se toman en cuenta las pendientes fuertes junto con precipitaciones torrenciales dentro de la cuenca, se generan grandes avenidas en tiempos muy cortos que, junto con la deforestación, provocan erosión y transporte de sedimentos considerables. Esta erosión trae consigo impactos ambientales, como la perturbación en la regulación del ciclo hidrológico, degradación de la cubierta vegetal, pérdida de biodiversidad, disminución de la vida útil de las obras hidráulicas, sedimentos en el lecho de los ríos y desestabilización de laderas, que ponen en riesgo a personas, viviendas e infraestructura. [3]

Muchos estudios han reportado que la precipitación, los cambios en la temperatura y las intervenciones humanas como medidas de conservación de suelos desempeñan un papel importante en las reducciones de escorrentía y la carga de sedimentos en los tramos medios del río [4]. Por otro lado, la deforestación, desertificación y urbanización provocan un aumento de las inundaciones, mayor ocurrencia de sequías y la degradación de suelo relacionada con la erosión hídrica. El aumento en la temperatura del aire provoca un aumento en el vapor de agua en la atmósfera, alterando la ocurrencia e intensidad de la precipitación, lo que influye en la erosión, debido a que ésta se da principalmente como resultado de eventos de precipitación extremos en un tiempo corto. Por tales motivos, es importante tomar en cuenta los impactos del clima y los cambios de uso de suelo en los procesos hidrológicos y el rendimiento de sedimento. [5]

En general, los modelos digitales de terreno interesan para conocer aspectos del relieve, tales como las elevaciones de cualquier punto, la pendiente, los desniveles y las áreas factibles de inundación, entre otros, por lo que son de gran utilidad en estudios del medio ambiente. En los últimos años los SIG han sido utilizados para desarrollar mo-

delos distribuidos espacialmente de los procesos hidrológicos de las cuencas a partir del modelo digital de elevaciones (MDE), mapas de vegetación y uso de suelos, entre otros. Estos modelos permiten la creación de escenarios que facilitan la toma de decisiones fundamentadas. [6] Debido al desarrollo a mediados del siglo XX en México, se propuso que el camino más viable para mejorar las condiciones de los espacios rurales era a través de la infraestructura hidroeléctrica para el aprovechamiento de las cuencas. El conjunto de estas presas para la generación de energía eléctrica construido sobre el río Balsas representa el segundo sistema hidroeléctrico más grande de México [7].

En México existe una enorme cantidad de ríos con dimensiones y características hidrológicas diferentes. Aunado a esto, las actividades humanas ha acelerado los procesos erosivos al modificar la cobertura del suelo; como consecuencia, en los cauces de los ríos se incrementa el transporte de sedimentos y, al aumentar la velocidad los escurrimientos o después de un evento fuerte de precipitación, la corriente los arrastra aguas abajo y deposita los materiales en lugares donde la misma corriente ya no puede transportarlos más. Este transporte de sedimentos muchas veces es la causa de desastres naturales [8].

En el presente trabajo se hace un análisis con base en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) y datos de estaciones hidrométricas dentro de la cuenca de estudio para comprobar que el comportamiento de la erosión y escurrimiento se ve reflejado en las mediciones directas de sedimentos.

## **METODOLOGÍA**

### **Descripción zona de estudio**

Dentro de la cuenca de estudio se encuentra la Presa Hidroeléctrica El Caracol, formalmente llamada Presa Ingeniero Carlos Ramírez Ulloa. Es una presa ubicada en el cauce

del río Balsas, en el municipio de Apaxtla, Guerrero. Fue construida aguas arriba de El Infiernillo, sobre la sierra de Teloloapan, cuenta con una capacidad de 1 860 millones de m<sup>3</sup> de agua, mide 50 km de largo y cuenta con una cortina de 126 m de elevación. Fue puesta en operación en 1986 y posee una central hidroeléctrica que tiene capacidad de generar 600 mega watts de energía eléctrica. La cuenca El Caracol se encuentra en ocho estados del país, su área se distribuye un 35.82 % por el estado de Puebla, 28.37 % por Guerrero, 15.36 % por Oaxaca, 8.66 % por Morelos, 5.29 % por Tlaxcala, 5.04 % por Toluca, 1.12 % por Veracruz y 0.33 % por la Ciudad de México (Fig. 1).

### Estudio de Erosión de la cuenca

Para la evaluación de los procesos de erosión hídrica, se requiere el empleo de varios tipos de datos: climáticos, hidrológicos, to-

pográficos y botánicos, así como de tipo de suelo y prácticas de conservación. Mediante el procesamiento de estos datos se obtienen los parámetros de la USLE y se calcula la pérdida anual de suelo producida por la erosión hídrica sin estimar el transporte de sedimentos en los cauces [9].

La ecuación que describe el proceso de erosión es:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

Donde A es el promedio anual de pérdida de suelos (t/ha.año), R es el factor de erosividad de la lluvia (MJ.mm/ha.h.año), K es el factor de erosionabilidad del suelo (t.ha.h/MJ.mm.ha), L es el factor de longitud de la pendiente (adimensional), S es el factor de grado de la pendiente (adimensional), C es el factor de manejo de cultivos (adimensional) y P es el factor de prácticas mecánicas de control de erosión (adimensional).

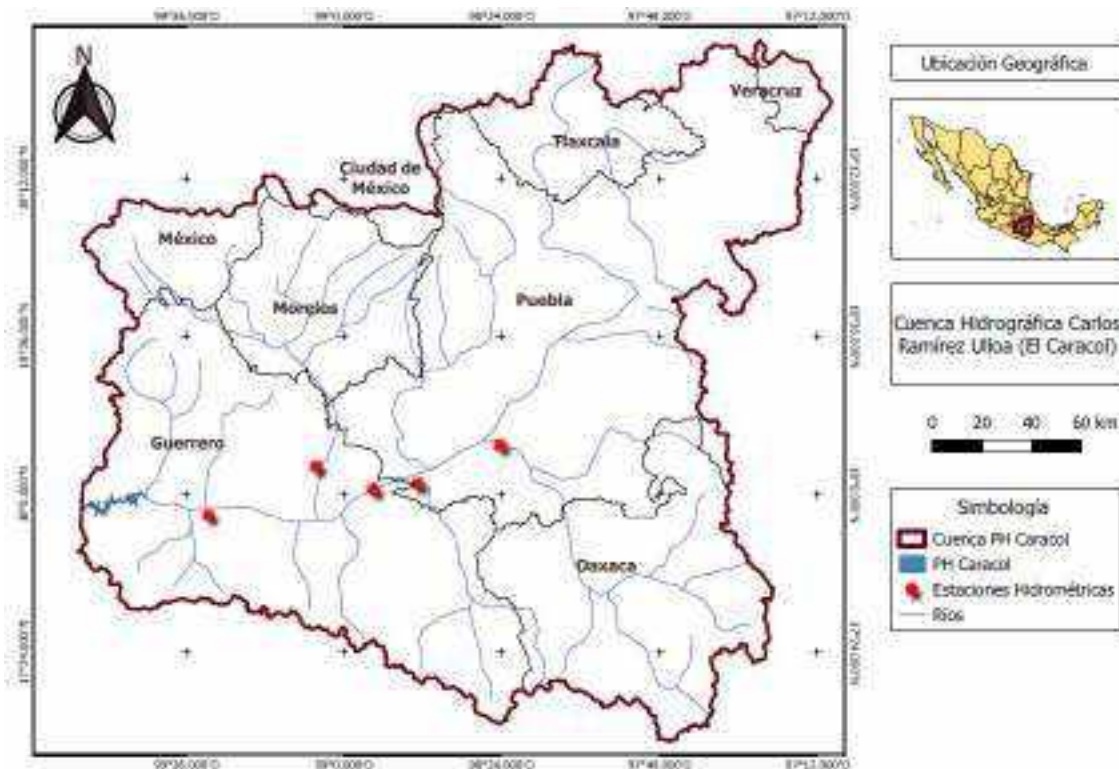


Figura 1. Ubicación Geográfica de la cuenca de estudio.

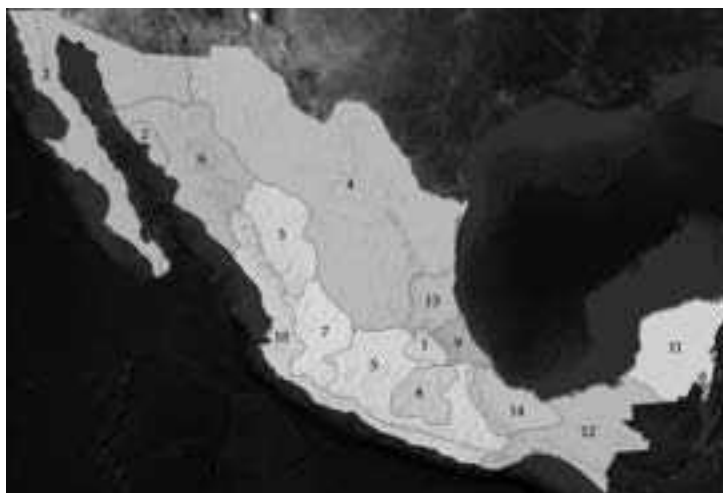


## Factor R

El factor R es de tipo climático e indica el potencial erosivo de las precipitaciones. Para obtener este factor, primero se bajaron los datos de las estaciones climatológicas de CONAGUA y CFE que se encuentran en la zona de estudio; posteriormente, se hizo una ponderación con polígonos de Thiessen para ver el efecto de cada estación y su zona de influencia dentro de la cuenca. A partir de los datos de Precipitación Media Anual

(PMA) de las estaciones climatológicas se aplicaron las ecuaciones de erosividad (Fig. 2 y Tabla 1) asociadas con las 14 diferentes regiones de la república mexicana determinadas por Cortés Becerra (1997).

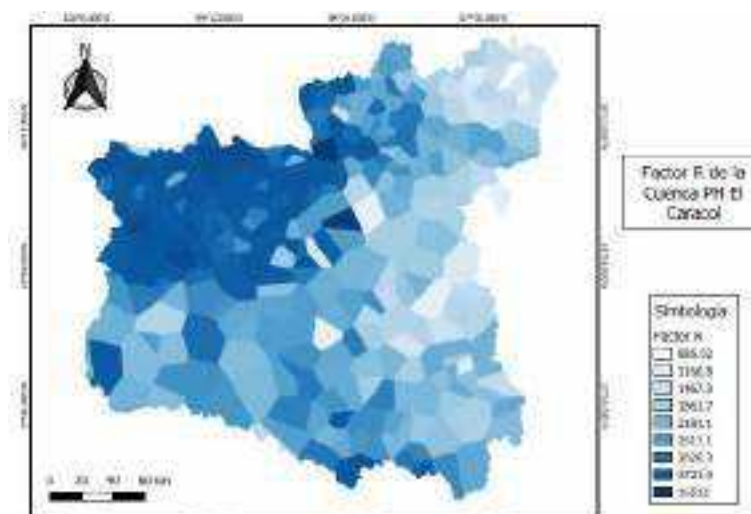
Según la regionalización nacional del Factor R, la cuenca cae dentro de dos regiones diferentes, por esta razón se utilizó la ecuación correspondiente a las zonas 5 y 8 de la tabla anterior para el cálculo del factor R.



**Figura 2.** Mapa de regionalización nacional de factor R (Becerra, 1997).

**Tabla 1.** Ecuaciones regionalizadas para la república (Becerra, 1997).

Región	Ecuación	R <sup>2</sup>
1	$1.2078 * P + 0.002276 * P^2$	0.92
2	$3.4555 * P + 0.006470 * P^2$	0.93
3	$3.6752 * P - 0.001720 * P^2$	0.94
4	$2.8959 * P + 0.002983 * P^2$	0.92
5	$3.4880 * P - 0.000188 * P^2$	0.94
6	$6.6847 * P + 0.001680 * P^2$	0.90
7	$-0.0334 * P + 0.0061 * P^2$	0.98
8	$1.9967 * P + 0.003270 * P^2$	0.98
9	$7.0458 * P - 0.002096 * P^2$	0.97
10	$6.8938 * P + 0.000442 * P^2$	0.95
11	$3.7745 * P + 0.004540 * P^2$	0.98
12	$2.4619 * P + 0.006067 * P^2$	0.96
13	$10.7427 * P - 0.001008 * P^2$	0.97
14	$1.5005 * P + 0.002640 * P^2$	0.95



**Figura 3.** Mapa espacial del factor R de erosividad de la lluvia en la cuenca.

### Factor K

La erosionabilidad del suelo es una compleja propiedad que se entiende como la facilidad con la cual el suelo se desprende por el salpicado, durante una lluvia o por flujo superficial.

Esta propiedad del suelo está relacionada al efecto integrado de la lluvia, el escurrimiento y la infiltración.

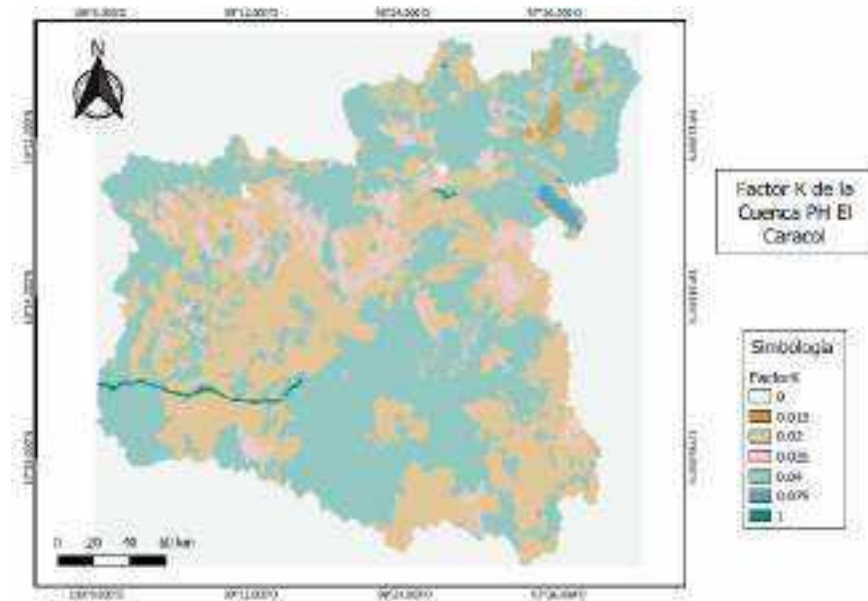
Para obtener este factor se utilizó la información edafológica más reciente del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI): Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250 000, Serie II (Continuo Nacional), Edición 2013.

De acuerdo con la clasificación de suelos del WRB (*World Reference Base for Soil Resources*) del tipo de suelo y de su textura (gruesa, media o fina), se asigna un factor K a cada tipo de suelo de la cuenca (Tabla 2).

**Tabla 2.** Factor K para los tipos de suelo dentro de la cuenca.

Suelo	Área (%)	Textura	Factor K
Acrisol	0.1	Media	0.04
Andosol	6.5	Media	0.04
Cambisol	7.7	Media	0.04
Castaozem	0.4	Media	0.04
Chernozem	0.1	Media	0.02
Feozem	6.0	Media	0.02
Fluvisol	1.0	Gruesa	0.026
Gleysol	0.0	Media	0.04
Litosol	18.8	Media	0.02
Luvisol	2.5	Media	0.04
Regosol	46.3	Media	0.04
Rendzina	5.2	Media	0.02
Solonchak	0.2	Fina	0.013
Vertisol	3.9	Fina	0.026
Xerosol	0.3	Media	0.079
Poblado	0.1	-	-
Cuerpo de agua	0.8	-	-

Cabe mencionar que en los cuerpos de agua se considera un valor igual a 1.0.



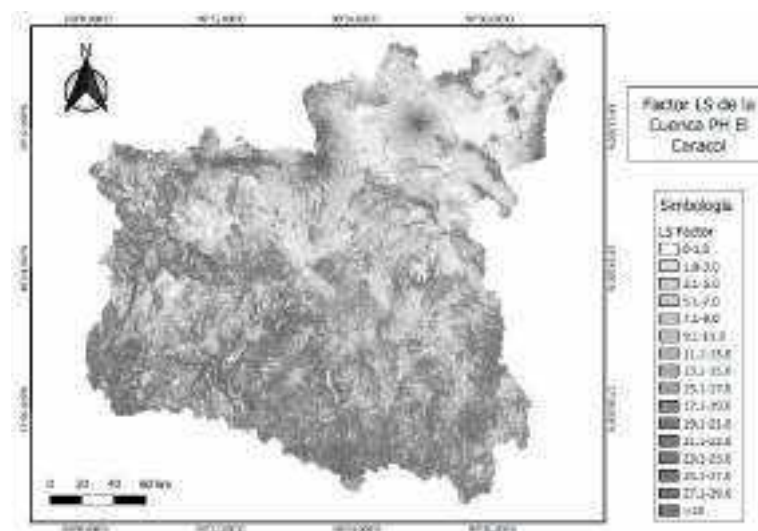
**Figura 4.** Mapa del factor K de susceptibilidad del suelo a la erosión en la cuenca.

### Factor LS

El efecto de la topografía sobre la erosión está representado por los factores longitud (L) y grado de pendiente (S). Para la determinación de este factor se utilizó el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) escala 1:50 000 en su versión más reciente, proporcionado por INEGI. Para el caso de la cuenca, el cál-

culo del factor LS se llevó a cabo a partir del MDE, y con ayuda de la herramienta SAGA → *Terrain Analysis-Hydrology* → LS factor.

Un LS alto está asociado con los niveles donde se presentan las pendientes más pronunciadas y un valor bajo en las zonas de planicie (Fig. 5).





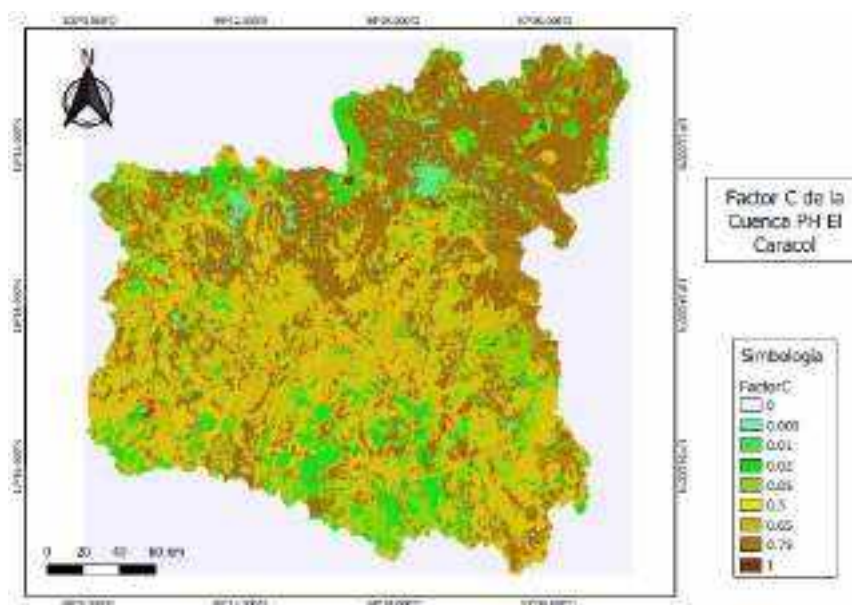
### Factor C

El valor de C es igual a 1 cuando el suelo se encuentra totalmente desprotegido y disminuirá a medida que haya una mejor cobertura vegetal sobre el terreno; para un suelo totalmente protegido se tendrá un valor muy cercano a cero. Para generar el mapa del fac-

tor C, se utilizaron los mapas de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI y se utilizó la tabla de factores para vegetación y/o uso de suelo de acuerdo con Montes-León *et al.* (2011), de Mapa Nacional de Erosión Potencial. En la Tabla 3 se presenta el valor C para cada tipo de vegetación y/o uso de suelo dentro de la cuenca.

**Tabla 3.** Valores de C según el Uso de Suelo y Vegetación para la cuenca.

Uso de Suelo y Vegetación	Área (%)	Factor C
Agricultura	39.2	0.75
Agua	0.2	1.00
Bosque	11.8	0.01
Chaparral	0.5	0.65
Matorral crasicaule	2.5	0.65
Palmar inducido	0.9	0.75
Pastizal cultivado	7.6	0.02
Pradera	0.2	0.05
Área sin vegetación	0.2	1.00
Selva baja caducifolia	2.3	0.50
Zona urbana	2.0	0.01
Vegetación secundaria	32.6	0.35



**Figura 6.** Mapa del factor C que involucra el tipo de cobertura en la cuenca.



## Factor P

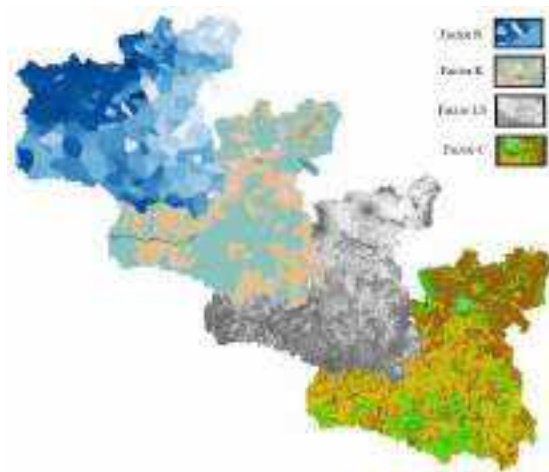
Este factor indica el efecto de las prácticas de conservación contra la erosión, como pueden ser las terrazas y el cultivo en contorno, entre otras. Los valores del factor P son adimensionales (0 - 1), donde un valor igual a la unidad implica que no se llevan a cabo prácticas de conservación [9].

## Erosión

Una vez que se obtuvieron cada uno de los factores que conforman la USLE, se realizó el producto para obtener la erosión hídrica. Para estimar la erosión se realizó la multiplicación de los mapas en QGIS de los factores R, K, LS y C (Fig. 7).

## Base de datos y análisis de los volúmenes de escurrimientos y sedimentos

Se recopiló información de cinco estaciones hidrométricas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), las cuales miden volúmenes de escurrimiento y de sedimentos para el periodo 1984-2006; la información de las estaciones hidrométricas de la CFE se pudo obtener a través de la colaboración y apoyo que brindó el personal técnico que labora en las Divisiones Hidrométricas con que cuenta el país. La ubicación de las estaciones hidrométricas que influyen en las subcuencas se muestra en la Fig. 8.



**Figura 7.** Multiplicación de los factores para el cálculo de la erosión.

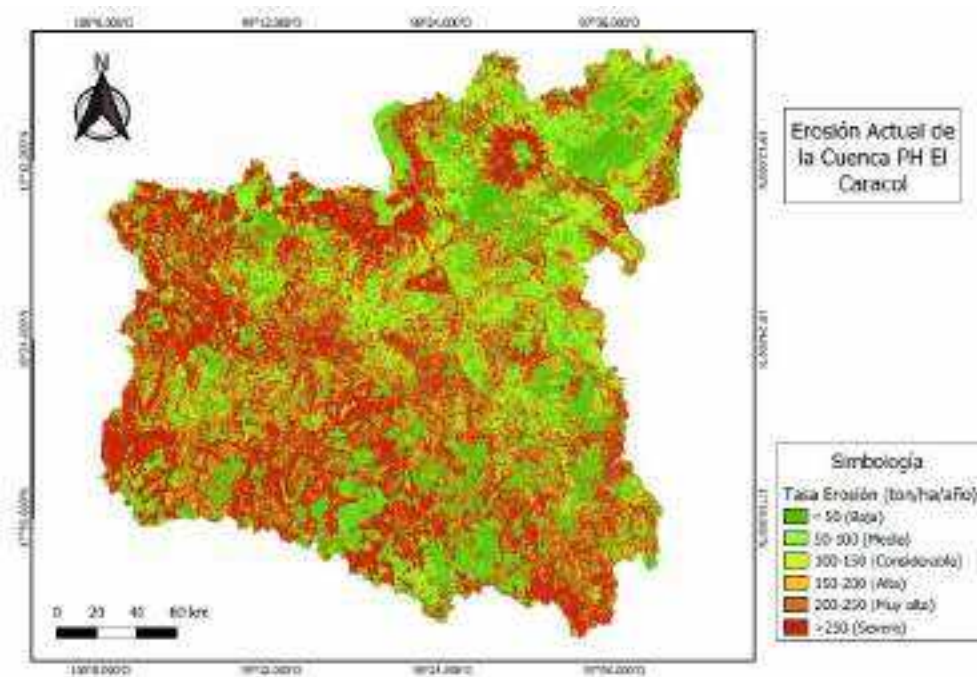


**Figura 8.** Ubicación de estaciones hidrométricas que se encuentran en las subcuencas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 9 se observa el Mapa de Erosión Hídrica, donde se encontró, de acuerdo con los resultados con la metodología descrita, que el 39.7 % del área de la cuenca El Caracol se encuentra expuesta a la ero-

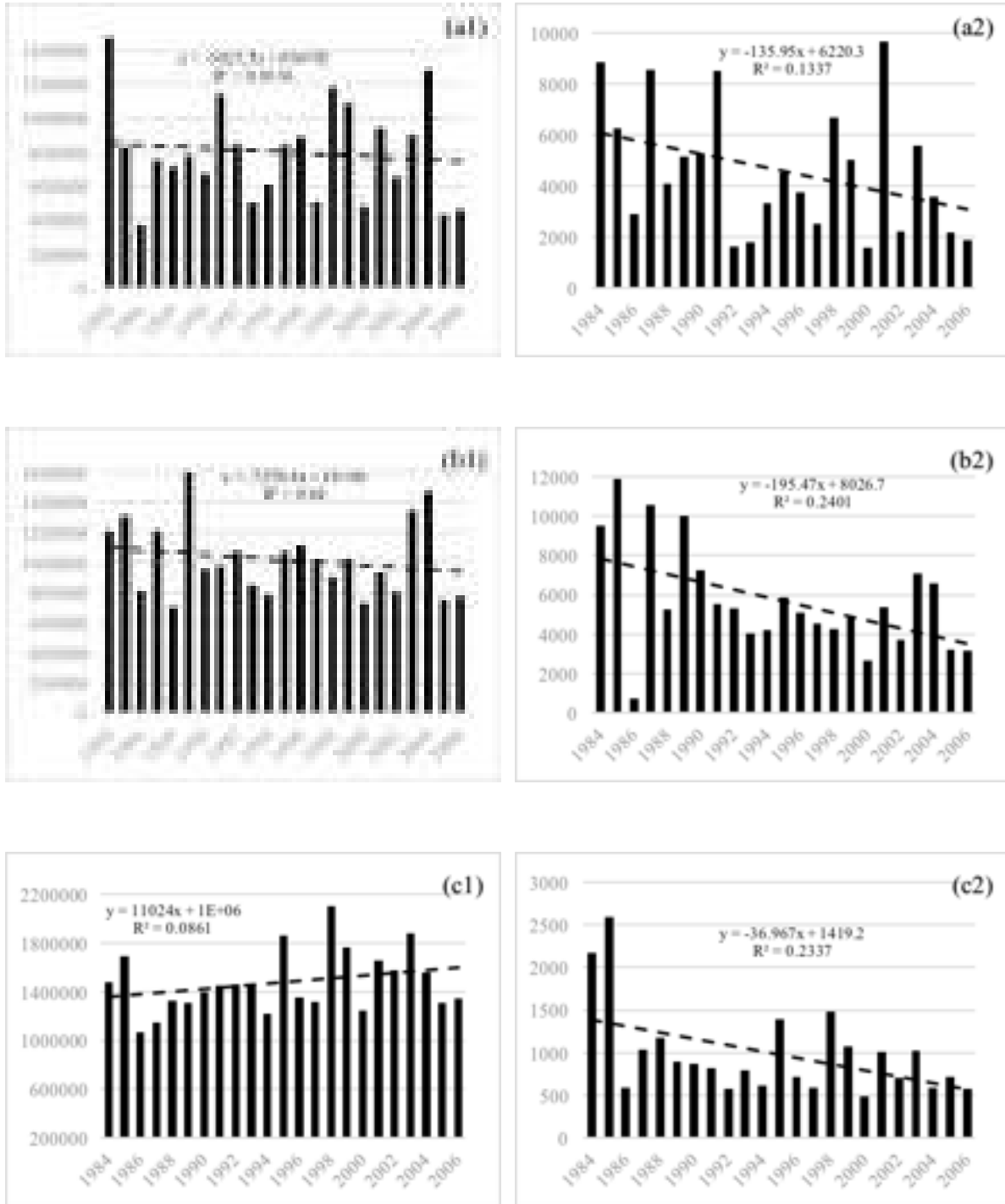
sión severa, en la Tabla 4 se observa el resto de la clasificación. Los valores de la erosión obtenidos se dividieron de acuerdo con los Rangos de clasificación de la Erosión Hídrica propuestos por Montes-León *et al.* (2011), de Mapa Nacional de Erosión Potencial.



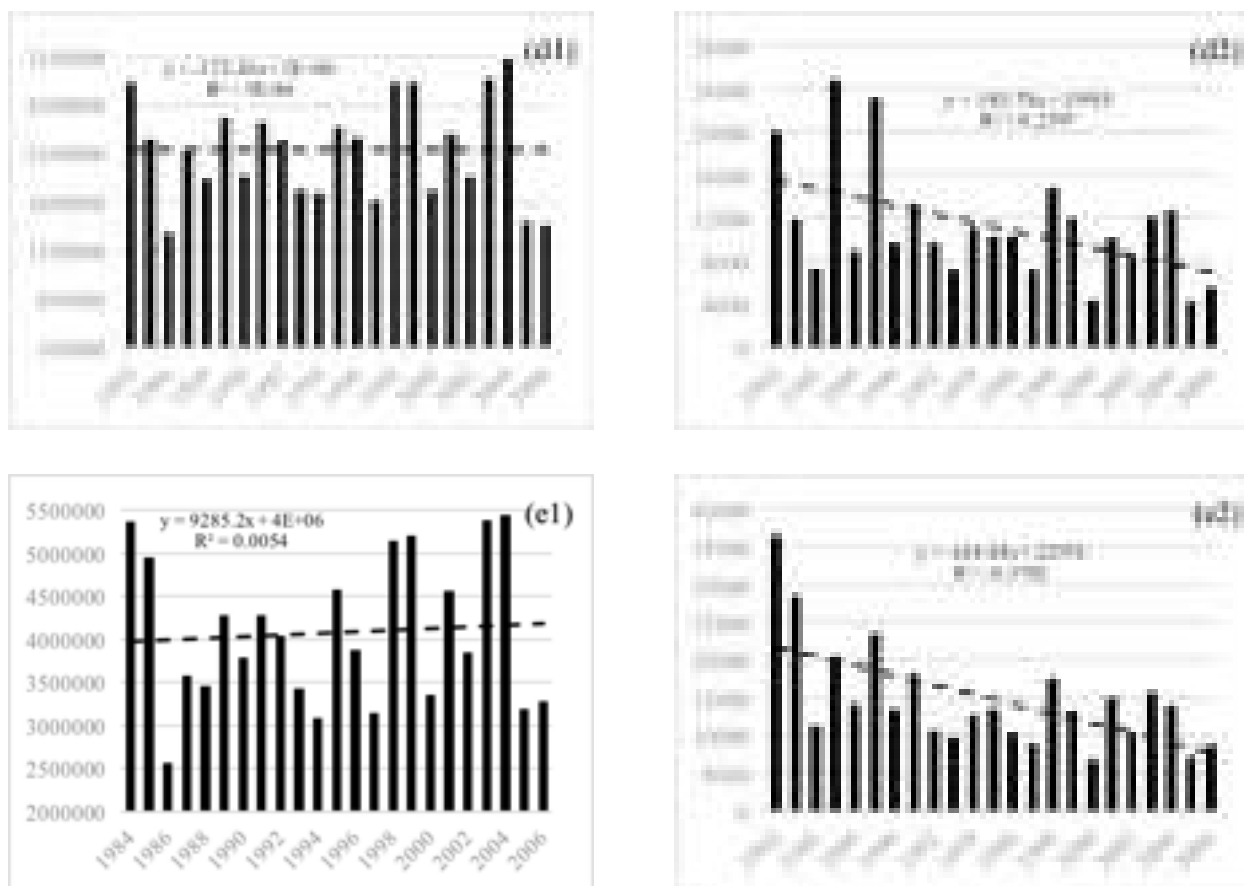
**Figura 9.** Mapa de erosión en la cuenca en condiciones actuales.

**Tabla 4.** Rangos de clasificación de la erosión hídrica.

Clasificación	Rango (ton/ha/año)	Área (%)
Baja	< 50	28.6
Media	50-100	11.4
Considerable	100-150	8.2
Alta	150-200	6.6
Muy Alta	200-250	5.5
Severa	> 250	39.7



**Figura 10.** Volúmenes en miles de m<sup>3</sup> de escurrimiento y sedimentos de Estación Hidrométrica, periodo 1984-2006: a1. Esgurrimiento El Frayle; a2. Sedimentos El Frayle; b1. Esgurrimiento Ixcamilpa; b2. Sedimentos Ixcamilpa; c1. Esgurrimiento Atenango del río; c2. Sedimentos Atenango del río.



**Figura 11.** Volúmenes en miles de m<sup>3</sup> de escurrimiento y sedimentos de Estación Hidrométrica, periodo 1984-2006: d1. Escurrimiento Papalutla; d2. Sedimentos Papalutla; e1. Escurrimiento San Juan Tetelcingo; e2. Sedimentos San Juan Tetelcingo.

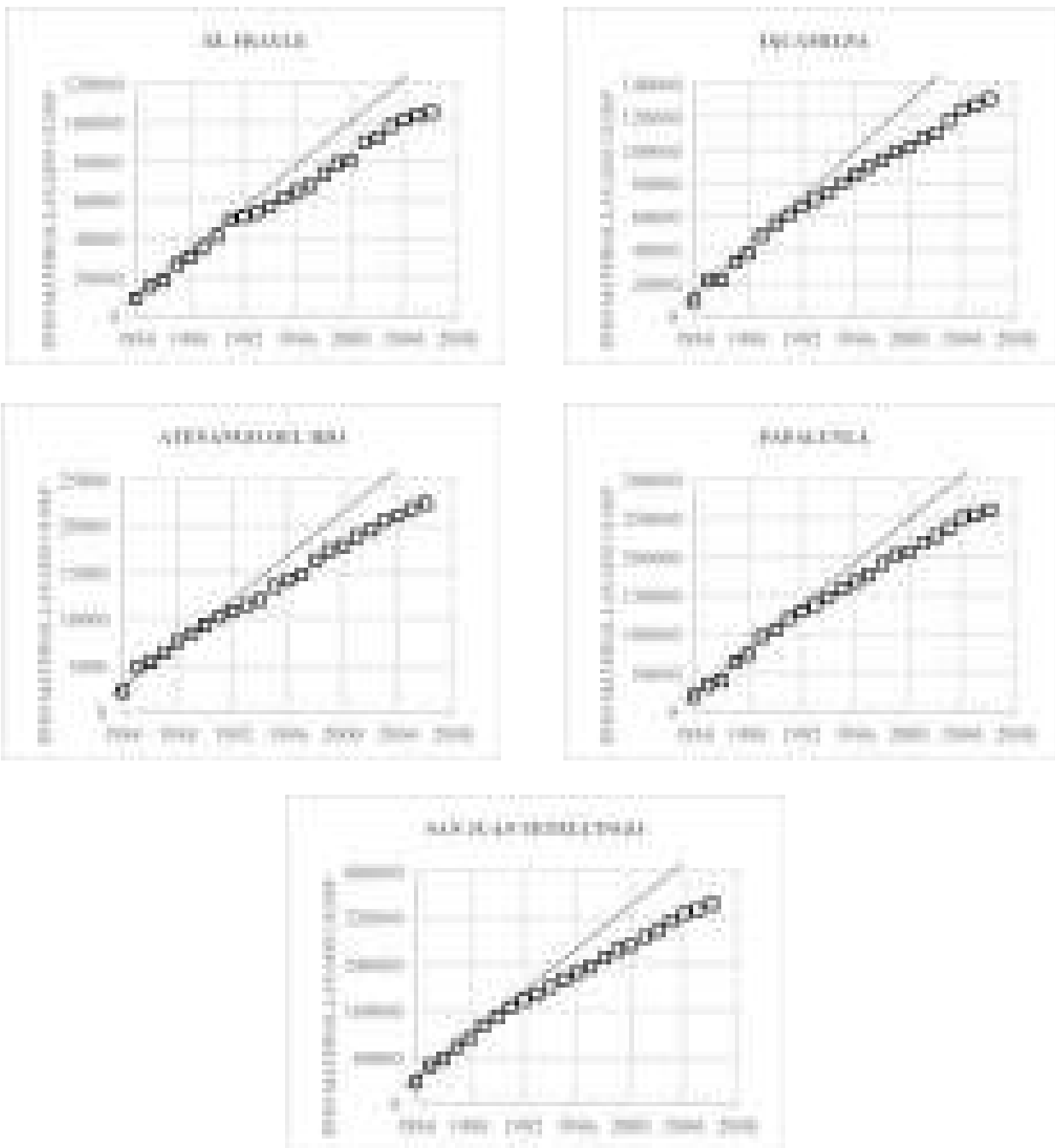
**Tabla 5.** Factor de correlación para volúmenes de escurrimiento y sedimentos de las estaciones hidrométricas, periodo 1984-2006.

Estación	R <sup>2</sup>	
	Escurrimiento	Sedimentos
El Frayle	0.0136	0.1337
Ixcamilpa	0.0400	0.2401
Atenango del río	0.0861	0.2337
Papalutla	5E-06	0.2397
San Juan Tetelcingo	0.0054	0.3782



De acuerdo con los datos de las estaciones hidrométricas, se observa que las pendientes de cambio son insignificantes en los escurrimientos, por tanto, puede considerarse que no hay cambios en los patrones de lluvia. Por el contrario, las pendientes de cambio de los volúmenes de sedimentos son decrecientes, indicador de que hay una disminución en la

tasa de erosión (Fig. 11 y Tabla 5). Otra forma de verificar la tendencia de la erosión a la disminución es de acuerdo con la doble curva masa de las cinco estaciones hidrométricas. Para todas las estaciones se observa que a partir del año 1992 el peso de material de lavado tiende a disminuir (Fig. 12).



**Figura 12.** Doble curva masa de las estaciones hidrométricas, periodo 1984-2006.

Por otra parte, hay fenómenos hidrometeorológicos particulares, como los huracanes, que producen lluvias de gran intensidad por arriba de los valores históricos asociados a la variabilidad climática anual y tienen un gran potencial erosivo. Una intensa precipitación después del año de 1992 pudo haber ocasionado abundantes escurrimientos que ocasionaron una erosión laminar y arrastre significativo de todo tipo de material del suelo (arcilla, arena, rocas).

De acuerdo con el sistema meteorológico nacional, la temporada de huracanes de 1992 ha sido considerada como la más hipereactiva en la historia del Pacífico. Las costas del pacífico mexicano se vieron afectadas por el huracán Virgil (1992) y el huracán Calvin (1993).

De acuerdo a Matías (1998), el huracán Paulina en octubre de 1997 tuvo una extensión de la zona nubosa con diámetro de 650 km de N-S, abarcando los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Morelos, Puebla, Tlaxcala y Veracruz. En consecuencia, es posible que el impacto de este huracán ocasionara una erosión laminar, material de lavado, que se refleja en los resultados de RUSLE y en el desarrollo de sedimentación en el embalse del Caracol.

## CONCLUSIONES

Para el periodo de estudio se observó una dicotomía de los escurrimientos; asimismo, se observó que los registros de material en las estaciones aguas arriba del embalse sufrieron una disminución significativa.

De la comparación con el mapa obtenido de erosión por RUSLE, podemos inferir que la mayoría de la cuenca presenta una erosión severa durante el transcurso de los años, razón por la cual el suelo disponible para ser erosionado se ha reducido, quizá en forma puntual por los impactos de los sucesos particulares generados por eventos hidrome-

teorológico particulares.

Los huracanes y ciclones son de los fenómenos naturales más destructivos, producen precipitaciones intensas que cuales arrastran y lavan todo tipo de material disponible; la cuenca ha sido impactada por numerosas tormentas y huracanes, siendo el huracán Paulina en 1997 el de mayor impacto por erosión hídrica, movimientos de masa y generación de sedimentos.

Otra clara evidencia de la disminución de la tasa de erosión en la cuenca es la alta deforestación y, posiblemente, zonas de contención de sedimentos aguas arriba.

Disponer del mapa de erosión hídrica para la cuenca ayuda a identificar las zonas donde es necesario implementar planes de manejo y conservación.

A su vez, es posible identificar las zonas más susceptibles de producir sedimentos que terminen en el fondo de los embalses, disminuyendo así su capacidad de almacenamiento.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación pudo llevarse a cabo gracias al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y la Dirección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Agradezco al M.I. Pascual Cristóbal Bernabé por el apoyo con la información de las estaciones hidrométricas.

Agradezco también al Geólogo Alexis Trasviña Carrillo por las asesorías brindadas para la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica.

## REFERENCIAS

- [1] R. Lal, "Soil Degradation By Erosion," *Land degradation & development*, pp. 519-539, 2001.



[2] M. Hajigholizadeh, A. M. Melesse and H. R. Fuentes, "Transport Modelling in Shallow Waters: A Review on Approaches, Models and Applications," *Environmental Research and Public Health*, vol. 15, p. 518, 14 03 2018.

[3] J. C. Valencia Vargas, "Desarrollo de la región hidrológica del Balsas," *Tecnología y Ciencias del Agua*, pp. 81-87, 2015.

[4] P. Gao, X.-M. Mu, F. Wang and R. Li, "Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, pp. 1-10, 2011.

[5] Z. Depeng, X. Zongxue, Y. Wenyi , J. Shuangyan, X. Peiqing and R. Dachuan , "Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China," *Science of The Total Environment*, vol. 544, pp. 238-250, 15 02 2016.

[6] D. González Correa, *Estudio y modelación de los escurrimientos generados por el cambio de uso de suelo en la zona metropolitana de Querétaro*, 2016.

[7] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, "<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/376/diagnostico.html>," 2007. [Online].

[8] J. A. Sánchez Jiménez, *Creación de una base de datos y medición de sedimentos en los ríos de México*, 2007.

[9] M. A. L. Montes-León, E. M. Uribe-Alcántara and E. García-Celis, "Mapa Nacional de Erosión Potencial," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. II, no. I, pp. 5-17, 2011.

[10] L. G. Matías Ramírez, "Algunos efectos de la precipitación del huracán Paulina en Acapulco, Guerrero," *Investigaciones Geográficas*, 1998.





# ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A COMPRESIÓN DE PANELES ESTRUCTURALES PREFABRICADOS DE FERROCEMENTO

---

Analysis of the Mechanical Compressive Behavior of Prefabricated  
Ferrocement Structural Panels

Emmanuel Valencia Jiménez <sup>1\*</sup>, Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández <sup>1</sup>  
Iván Fermín Arjona Catzim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia  
emmanuelvalenciaj@gmail.com\*

## RESUMEN

El ferrocemento es una forma de concreto armado que utiliza capas múltiples de mallas formadas por varillas de pequeño diámetro completamente infiltradas con mortero, encapsuladas en mortero, o ambas. Las aplicaciones del ferrocemento son numerosas, especialmente en estructuras o componentes estructurales donde se requiere autoayuda o bajo nivel de habilidades [1]. Este trabajo presenta los resultados de una investigación orientada a estudiar el comportamiento mecánico de paneles estructurales prefabricados de ferrocemento. Se elaboraron y ensayaron paneles cuadrados de ferrocemento de 60 centímetros de lado y 80 milímetros de espesor, con malla electrosoldada y mortero estructural, para proporcionar una solución a la problemática de vivienda que tiene el país. Las probetas fallaron a compresión uniaxial bajo carga uniforme aplicada a través de una máquina universal. En resumen, los paneles presentan una resistencia a compresión del orden de  $55 \text{ kg/cm}^2$ , tienen una buena resistencia al agrietamiento, y representan una opción constructiva económica y estructuralmente viable.

**Palabras clave:** panel estructural, ferrocemento, muro, vivienda, compresión

## ABSTRACT

Ferrocement is a form of reinforced concrete that uses multiple layers of meshes made out of small diameter rods completely infiltrated with mortar, encapsulated in mortar, or both. Applications for ferrocement are numerous, especially in structures or structural components where self-help or low skill level is required [1]. This work presents the results of a research oriented to study the mechanical behavior of prefabricated structural ferrocement panels. Square ferrocement panels of 60 centimeters side and 80 millimeters thick, with electrowelded mesh and structural mortar were elaborated and tested to

provide a solution to the housing problems of the country. The specimens failed under uniaxial compression of uniform load applied through a universal machine. In summary, the panels present a resistance to compression in the order of  $55 \text{ kg/cm}^2$ , have a good resistance to cracking, and represent an economic and structurally viable constructive option.

**Keywords:** structural panel, ferrocement, walls, housing, compression

## INTRODUCCIÓN

En la construcción con elementos prefabricados, los miembros estructurales son elaborados fácilmente, transportados a la estructura en sitio y se colocan de manera rápida. El ferrocemento es una forma de concreto armado que difiere del concreto pretensado convencional principalmente por la forma en que se dispersan y disponen los elementos de refuerzo [2]: el ferrocemento tiene propiedades ortotrópicas homogéneas en dos direcciones y presenta una alta resistencia a la tracción, un alto módulo de ruptura y un rendimiento de agrietamiento superior. Además, debido a las altas superficies específicas de las mallas de ferrocemento, se desarrollan mayores fuerzas de unión con la matriz, lo que resulta en un menor espaciamiento y anchura de las grietas [3].

Como un compuesto laminado, el ferrocemento sufre a menudo de desprendimiento severo de la cubierta de la matriz y de delaminación de la capa de tensión extrema en el alto cociente del refuerzo, lo que tiene por resultado la falla prematura. Por lo tanto, el diseño del compuesto estaría controlado por su utilidad y no por su resistencia [4].

En países del tercer mundo donde la demanda de vivienda de bajo costo es muy alta, el ferrocemento se ha utilizado como una alternativa eficaz que, por una parte, ofrece viviendas durables y de buena calidad y, por otro lado, ofrece un sistema constructivo con base en mano de obra intensiva no calificada.



Esta combinación hace del ferrocemento una solución apropiada para sociedades en vías de desarrollo que requieren de soluciones de generación de empleo y vivienda de bajo costo [5].

Por otro lado, existe una demanda significativa de materiales de construcción, como el cemento, acero, tabiques y agua, para satisfacer la demanda de vivienda e infraestructura.

La escasez y aumento de los costos de estos materiales llaman a buscar alternativas asequibles para cumplir con la demanda de vivienda, particularmente para el sector económico más débil [6].

De las investigaciones a nivel mundial, destaca la de Cherian *et al.* [6], donde se presentan los resultados de un experimento con paneles prefabricados de yeso reforzado con fibra de vidrio, parte de los resultados consistió en la obtención de un código de diseño estructural aprobado por la oficina de normas de la India.

A nivel nacional, las viviendas particulares con paredes en condiciones precarias van del 2.78 al 6.8 % en estados con alta marginación social (Fig. 1), lo que significa que sus habitantes viven en circunstancias inseguras.



**Figura 1.** Porcentaje de viviendas particulares con paredes precarias [7].

Gran parte de las investigaciones sobre paneles estructurales desarrolladas en México han tenido resultados positivos, sobre todo en lo que respecta a resistencia de cargas axiales y cargas laterales; por ejemplo, los sistemas mencionados en [8] y [9], implementados en modelos a escala real, manifiestan un comportamiento estructural óptimo para su aplicación en la construcción de viviendas; sin embargo, estos materiales prefabricados carecen de la aprobación de toda norma vigente en México para su producción con su función estructural.

Las tesis [10], [11] y [12] de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro demuestran que paneles elaborados con ferrocemento celular ecológico pueden soportar cargas a compresión del orden de 70 kg/cm<sup>2</sup>, y además poseen propiedades acústicas y térmicas adecuadas.

Existen nuevos sistemas constructivos industrializados a base de paneles formados por láminas con alma de poliuretano, panel W, tablarroca, etc., que son normalmente explotados por las empresas constructoras para la producción masiva de viviendas.

Esto genera una incógnita debido a que el uso de estos materiales puede o no ser viable, por lo que es necesario desarrollar nuevos productos que cumplan con lo establecido en las normativas y manuales de construcción vigentes y, además, sean capaces de competir con los materiales de construcción tradicionales.

El estudio que se expone en el presente trabajo de investigación comprende el comportamiento mecánico debido a una carga uniformemente distribuida en paneles de ferrocemento para su posible aplicación como muros estructurales.

Se espera que los resultados obtenidos sirvan como una herramienta base para el futuro desarrollo de estudios realizados de paneles estructurales de ferrocemento con el fin de demostrar una de las propiedades de este material.

## MATERIALES

El programa de investigación fue diseñado para estudiar la respuesta a compresión de paneles prefabricados de ferrocemento a través del uso de un mortero dosificado con una relación de agua – cemento de 0.425 y un peso volumétrico de 1985.95 kg/m<sup>3</sup>, reforzado con una malla cuadrada electrosoldada galvanizada de 50 × 50 mm con un límite elástico (fy) de 4 550.00 kg/cm<sup>2</sup>.

Un total de 5 paneles de ferrocemento con dimensiones de 600 × 600 × 80 mm fueron sometidos a pruebas de compresión.

La variable experimental es el tipo de mezcla para la elaboración de los especímenes.

El comportamiento estructural observado a lo largo de la investigación fue la respuesta de cada uno de los paneles ante la aplicación de una carga uniformemente distribuida, su deformación correspondiente, la aparición de la primera grieta y las fisuras totales en cada uno de los especímenes.

### Agregado fino

El agregado fino usado en la matriz de mortero tuvo las siguientes características:

- El agregado fino cumple con la restricción de tener menos del 5 % de agregado grueso [13].
- El peso relativo específico es de 2.0919.
- Módulo de finura de 2.62 y cumple con la normativa de acuerdo con [13].
- Porcentaje de absorción de 10.7 %.
- La humedad inicial de la arena fue de 5.41 %.

La granulometría del agregado fino se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Granulometría de agregado fino.

Número de malla	Retenidos (g)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% Pasa
4	0	0	0	100
16	167.60	38.41	38.41	61.58
30	32.40	7.42	45.83	54.15
50	165.50	37.93	83.76	16.22
100	47.50	10.88	94.64	5.34
200	23.30	5.34	99.98	0
<b>Suma</b>	436.30			
<b>Charola</b>	17			
<b>Suma</b>	453.30			

El tamaño de agregado cumple, además, con los rangos límites deseables estipulados en [14].

### Cemento

Se utilizó cemento Portland CPC 30R RS de la marca Cruz Azul, el cual cumple con las especificaciones de la norma mexicana NMX-X-414 ONNCCE y la norma norteamericana ASTM C-595.

### Agua

El agua es el componente que se utiliza para generar las reacciones químicas en los cementantes del mortero de cemento Portland. Para la elaboración de la matriz del mortero se utilizó agua potable, es decir, sus características químicas y físicas la hacen útil para consumo humano [13].

### Acero de refuerzo

Se colocó una capa de malla cuadrada (500 x 500 mm) electrosoldada galvanizada con un diámetro de alambre de 2 mm y con 50 mm de espaciamiento entre cada fibra como refuerzo interno para cada uno de los paneles de ferrocemento.



La malla se colocó en un marco fabricado con un segmento de varilla de 3/8", con un  $f_y$  de 4 200.00 kg/cm<sup>2</sup>.

La fracción de volumen de refuerzo de la malla se obtuvo con la Ec. (1).

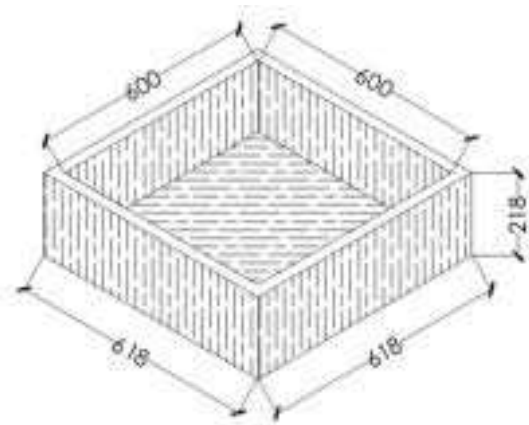
$$Vr = \frac{N \pi d_w^2}{2 h D_L} \quad (1)$$

Donde N es el número de capas de malla,  $d_w$  es el diámetro del alambre de la malla de refuerzo (mm), h es el espesor del elemento de ferrocemento (mm), y  $D_L$  es el espaciamiento entre los alambres de la malla (mm).

$$Vr = \frac{1 \times \pi \times 2^2}{2 \times 80 \times 50} = 0.00157 \text{ o } 0.15\%$$

### Cimbra

La cimbra consistió en un molde cuadrado (Fig. 2) fabricado con triplay BC elaborado de chapas de madera de pino radiata, colocadas en forma perpendicular en el sentido de las fibras para obtener un tablero de alta resistencia.



**Figura 2.** Dimensiones internas y externas del molde de triplay usado como cimbra.

### Mezcla de mortero

Se diseñó un mortero de resistencias objetivo de 45 kg/cm<sup>2</sup> y 50 kg/cm<sup>2</sup>. Las proporciones de cada uno de los materiales se resumen en la Tabla 2 según las siguientes relaciones:

- Relación en peso de agregado/cemento de 2.4
- Relación en peso de agua/cemento de 0.42 y 0.49

### Dosificación de materiales

**Tabla 2.** Materiales para elaboración de morteros.

Proporción de materiales para mortero			
Mezcla	Arena (kg)	Cemento (kg)	Agua (l)
Mortero 1	35.62	14.40	6.12
Mortero 2	35.62	14.40	7.12

Para obtener las propiedades mecánicas a compresión de los paneles, los ensayos fueron realizados con base en la norma mexicana [15].

### Máquina de ensayo

Las pruebas a compresión se realizaron en una máquina Forney Testing Machines, modelo LT-1150, con capacidad de 150 toneladas, ubicada en el laboratorio de Geotecnia, Materiales y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (Fig. 3).



**Figura 3.** Máquina universal utilizada para realizar las pruebas de compresión en paneles.

## MÉTODOS

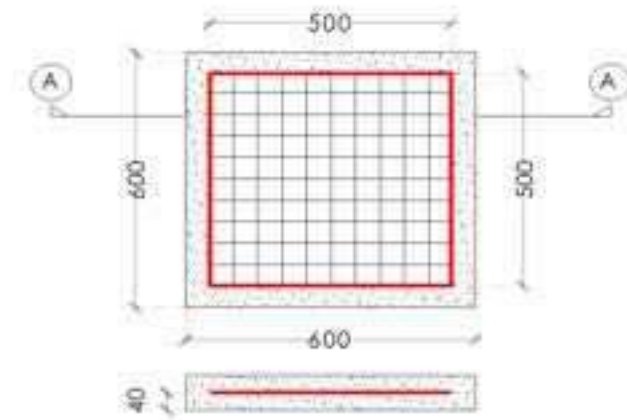
La metodología con la que se llevó a cabo la investigación fue de tipo cuantitativa y con un diseño experimental, dentro de la línea de investigación enfocada a la modelación analítica y experimental de sistemas físicos. Para la elaboración del ferrocemento se utilizó [3] como referencia, de acuerdo con lo establecido en el apartado de la guía práctica de diseño.

### Mezcla de mortero

Cada lote de mortero fue elaborado usando una revolvedora Pretul RECE-160P de cemento de uso ligero a gasolina. Se colocó inicialmente el cemento Portland y la arena a una velocidad baja por un lapso de tiempo de tres minutos y posteriormente se añadió el agua. Los periodos de mezclado se llevaron a cabo de acuerdo a los estándares prescritos en [16].

### Elaboración de los especímenes de prueba

La malla se colocó con ayuda de silletas de plástico a una distancia de 40 mm del paño inferior (Fig. 4), de tal manera que se posicionó a la mitad del espesor del panel de ferrocemento; además, el recubrimiento para el acero de refuerzo fue de 50 mm. Una cantidad de mortero fresco se vació en el molde en dos capas hasta cubrir el espesor deseado, cada capa de mortero se vibró con una varilla punta de bala para reducir la cantidad de aire dentro del panel. Del mortero uno se obtuvieron tres paneles, y del mortero dos únicamente un par de especímenes. Los paneles elaborados (Fig. 5) fueron descimbrados y curados después de 24 horas en un cuarto con humedad constante por 28 días para evitar en lo posible la pérdida de agua.



**Figura 4.** Detalles del acero de refuerzo usado, vista en planta y sección A-A.



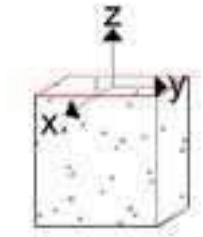
**Figura 5.** Proceso de elaboración de paneles.



## Ensaye

### Estado de esfuerzos

Para las componentes usadas en la prueba, el estado de carga aplicado fue de tipo uniaxial a compresión. Se aplicó una carga de manera distribuida en las probetas transmitida en la dirección del eje z (Fig. 6).



**Figura 6.** Dirección y área de aplicación de fuerza en componentes.

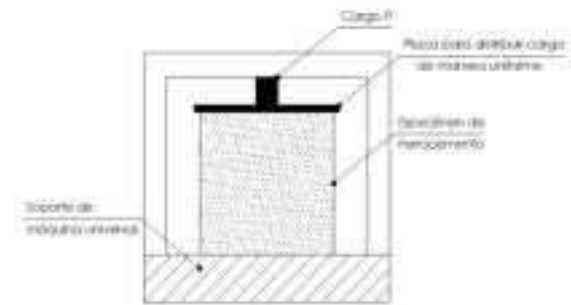
La configuración e instrumentación de la prueba de compresión de los paneles conforme a [15] se muestra en la Fig. 7 y el esquema de la aplicación y distribución de carga se presenta en la Fig. 8. Se aplicó una carga de compresión a las probetas mediante la máquina universal automatizada, la carga fue monitoreada por un laboratorista del área. La carga uniforme  $P$  (kN) fue aplicada de manera constante y reportada en intervalos de cinco kN. Mientras tanto, el monitoreo de la deformación de cada panel se realizó desde la parte superior de la máquina universal con un micrómetro electrónico desde el inicio de la carga de compresión. Para cada incremento de carga  $P$ , se registró el valor que arroja el micrómetro. Por medio de la Ec. (2) se calculó el esfuerzo en los paneles de ferrocemento, los datos fueron procesados en una hoja de cálculo.

$$\sigma = \frac{P \cdot 100}{A} \quad (2)$$

Dónde  $P$  es la carga en kN y  $A$  es el área en  $\text{cm}^2$ .



**Figura 7.** Configuración de la prueba de compresión en la máquina universal.



**Figura 8.** Diagrama esquemático de aplicación de carga y soporte en el panel de ferrocemento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Compresión

Los resultados del ensayo a compresión se discuten con referencia a la Fig. 11, donde se graficó el esfuerzo y la deformación de los paneles de ferrocemento; además, se discute la aparición de grietas en los paneles y el tipo de falla.

Es muy poco probable que los elementos de concreto armado se encuentren sujetos a cargas puras de compresión; debido a que las estructuras son continuas, la carga axial actúa simultáneamente con momento flexionante.

En el caso de los paneles, las cargas de compresión se distribuyeron en el área transversal de la sección; de acuerdo con el patrón de agrietamiento, la falla de los espe-



címenes fue por compresión en el lado más esforzado. Cuando se aplica una carga axial, la deformación unitaria a compresión es igual sobre toda la sección transversal y es la misma en los materiales que conforman los especímenes.

De las dos mezclas elaboradas podemos observar que la resistencia a compresión es de un orden similar ( $55 \text{ kg/cm}^2$ ), con la diferencia de que los especímenes de prueba FP-2, FP-3 y FP-4 (mortero 1) alcanzaron una deformación unitaria menor ( $0.0025$ ) que los especímenes FP-1 y FP-5 (mortero 2). [15] establece que los paneles estructurales para uso en muros deben ser capaces de resistir un esfuerzo mínimo axial a la compresión de  $0.49 \text{ MPa}$  ( $5 \text{ kg/cm}^2$ ): los paneles sobrepasan este valor considerablemente.

Las curvas representativas de esfuerzo-deformación unitaria muestran que los dos tipos de mezcla tienen un comportamiento

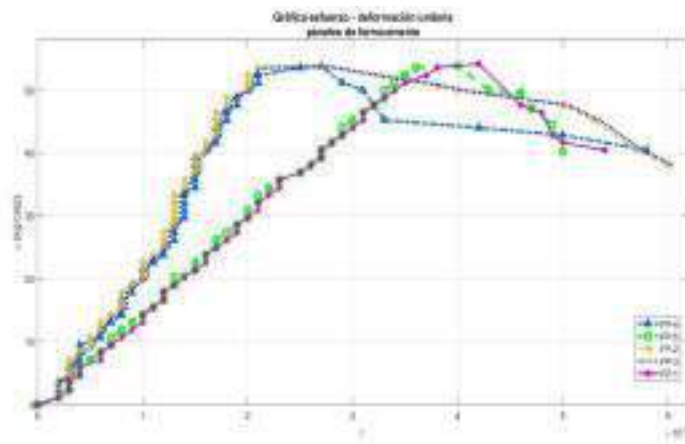
similar en los paneles probados debido a su homogeneidad. El modo de falla de los paneles de ferrocemento (Fig. 9) es similar en todos los casos: se presentó una grieta longitudinal de aproximadamente  $1.5 \text{ mm}$  de espesor (típico de una falla a compresión) desde la parte superior del panel hasta la parte inferior; al mismo tiempo, se pudo observar agrietamiento en la línea donde se colocó el acero de refuerzo, la cual pudo ser ocasionada por la falta de adherencia entre el refuerzo y el mortero.

De los dos lotes de morteros podemos observar el comportamiento respecto a la deformación. En la Fig. 11 se aprecia que el lote de mortero dos tuvo una deformación mayor que los paneles elaborados con el mortero uno.

Al final de cada ensayo se examinaron y marcaron las grietas que aparecieron en cada una de las probetas.



**Figura 9.** Grietas y modos de falla presentados en paneles de ferrocemento.



**Figura 10.** Gráfica de esfuerzo – deformación de los paneles estructurales.



## CONCLUSIONES

Del análisis del comportamiento mecánico a compresión de los paneles de ferrocemento y los resultados obtenidos en la presente investigación, se derivan las siguientes recomendaciones y conclusiones.

1. De acuerdo con [15], los paneles probados en la presente investigación cumplen con la restricción de soportar la carga mínima a compresión de dicha norma.
2. Todos los paneles de ferrocemento fallaron por compresión según los modos de falla observados en las probetas.
3. La resistencia a la compresión y la capacidad de deformación de una matriz de mortero de alta resistencia no se utilizó completamente para el panel de ferrocemento debido a que la normativa vigente no demanda un valor elevado para este tipo de elementos estructurales.
4. Se deben realizar pruebas de impacto y de resistencia al fuego en los paneles de ferrocemento para determinar con mayor certeza que pueden ser usados como elementos de carga en muros de vivienda.
5. La recomendación de usar ferrocemento en viviendas de escasos recursos puede ser adecuada si se realiza un estudio económico detallado.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece fundamentalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haber provisto los fondos necesarios para desarrollar esta investigación. Los autores agradecen al grupo de trabajo

de la Maestría en Ciencias línea terminal en Estructuras perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por haber hecho posible la realización de este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] A. C. I. Committee 549, "549.1R-18: Design Guide for Ferrocement," Farmington Hills, Michigan, 2018.
- [2] A. C. I. Committee 549, "549R-18: Report on Ferrocement," Farmington Hills, Michigan, 2018.
- [3] A. Naaman, *Ferrocement & laminated cementitious composites*, 1st ed. Ann Arbor, Michigan: Techno Press 3000, 2000.
- [4] M. Jamal Shannag and T. Bin Ziyad, "Flexural response of ferrocement with fibrous cementitious matrices," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 6, pp. 1198–1205, 2007.
- [5] D. Bedoya Ruiz and D. Á. Betancur, "Comportamiento de viviendas de ferrocemento bajo cargas cíclicas.," *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 8, no. 15, pp. 37–46, 2009.
- [6] P. Cherian, S. Paul, S. R. G. Krishna, D. Menon, and A. Meher Prasad, "Mass Housing Using GFRG Panels: A Sustainable, Rapid and Affordable Solution," *J. Inst. Eng. Ser. A*, vol. 98, no. 1–2, pp. 95–100, 2017.
- [7] INEGI, "Banco de indicadores," 2015. [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?ind=6207019038#div-FV62070190386207019038%23D6207019038>. [Accessed: 09-Sep-2019].
- [8] D. V. Almada, F. Yeomans, C. Nungaray, and A. Elizondo, "Caracterización de concreto celular a base de espuma preformada," *Soc. Mex. Ing. Estructural*, no. 81, p. 13, 2006.
- [9] F. S. Yeomans, R. Reynoso, and J. J. Marín, "Sistemas de vivienda de rápida construcción," México, 2000.
- [10] F. Escamilla, "Análisis del comportamiento térmico estructural de paneles prefabricados de ferrocemento huecos para muros de casa habitación," Universidad Autónoma de Querétaro, 2016.

[11] C. Cobreros Rodríguez, "Paneles prefabricados termo-acústicos para vivienda industrializada a partir de paja de cereal y tierra estabilizada," Universidad Autónoma de Querétaro, 2015.

[12] Á. R. Ramírez Ortega, "Caracterización, desarrollo y aplicaciones de un ferrocemento celular ecológico," Universidad Autónoma de Querétaro, 2014.

[13] Instituto Mexicano del Transporte, CMT. Características de los materiales, no. 02. 2019.

[14] Unidad de apoyo técnico para el saneamiento básico del área rural, "Guía de construcción para estructuras de ferrocemento," Lima, 2003.

[15] Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, Norma mexicana NMX-C-405-ONNCCE-2014. México, 2014, pp. 1–18.

[16] ASTM, "ASTM C305. Practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency," in *Annual Book of ASTM Standards*, West Conshohocken, PA, USA: American Society of Testing Materials, 1994.

# REDISTRIBUCIÓN DE LA INFILTRACIÓN DEBIDO A LA VEGETACIÓN NATIVA EN ZONAS SEMIÁRIDAS

---

Redistribution of Infiltration Due to Native Vegetation in Semi-arid Areas

Ana Berenice García Pérez<sup>1\*</sup>, Enrique González Sosa<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia  
\*agarcia279@alumnos.uaq.mx  
\*egs@uaq.mx

## RESUMEN

El Estado de Querétaro, localizado en México, presenta un clima árido y semiárido, poca vegetación y ha sufrido cambios importantes de uso de suelos en los últimos años, los cuales provocan una redistribución de la infiltración. Debido a que en las zonas áridas y semiáridas la cobertura vegetal es menor que en otros climas, en el presente estudio se analiza la importancia del huizache (*Acacia farnesiana*) en la redistribución de la infiltración, pues esta especie constituye gran parte de la vegetación local. En la investigación, fueron determinadas las características del suelo y se realizaron pruebas de infiltración (anillo simple) a distintas distancias y direcciones del tronco de un individuo de huizache. Se obtuvieron 2 tipos de suelos: franco y franco arcilloso. Asimismo, se encontró que los huizaches tienen influencia en los volúmenes y tasas de infiltración en el suelo, que son más lentas conforme se aleja del tronco de éste; aunado a esto, generan un área de influencia fuera de su zona radial, donde la infiltración es más acelerada que en cualquier otro punto del área bajo su copa, lo que se atribuye inicialmente al efecto de la sombra presente en la vegetación. El presente estudio muestra la estrecha relación entre la vegetación nativa de una zona árida y los volúmenes de infiltración presentes en los suelos.

**Palabras clave:** redistribución, infiltración, anillo simple, huizache, efecto sombra

## ABSTRACT

The State of Queretaro, in Mexico, presents an arid and semi-arid climate, little vegetation and has experienced important changes in recent years in land uses, which cause a redistribution of infiltration. Since the vegetation cover is lower in the arid and semi-arid areas than in other climates, the importance of huizache (*Acacia farnesiana*)—the main species in the location—in the redistribution

of infiltration is analyzed in this study. The characteristics of the soil were determined and single ring infiltration tests were carried out at different distances and directions from the trunk of a huizache individual. Two different types of soil were obtained: loam and clay loam. In addition, it was found that the huizaches have an influence on the volumes and rates of infiltration in the soil, which decreases more slowly the further away from the trunk. In addition to this, they generate an area of influence outside their radial zone in which the infiltration is more accelerated than at any other point in the area under their crown, a phenomenon that is initially attributed to the shadow effect present in the vegetation. The present study shows the close relationship between the native vegetation of an arid zone and the infiltration volumes present in the soils.

**Keywords:** redistribution, infiltration, single ring, huizache, shadow effect

## INTRODUCCIÓN

En México, más del 50 % del territorio nacional se encuentra clasificado como zona árida o semiárida. La vegetación nativa de la región central semiárida de México, específicamente en el estado de Querétaro, está constituida de matorral xerófilo, representada en buena medida por pastos y una distribución dispersa de mezquite (*Prosopis laevigata*) y huizache (*Acacia farnesiana*). La fisionomía y composición en áreas con vegetación tiene una influencia fundamental sobre el comportamiento hidrológico de los ecosistemas, la principal razón de esto es que los árboles establecen una eficiente conexión entre el suelo y la atmósfera [1]. Los huizaches, en su forma arbórea, pueden tener de 3 a 10 m de altura, con una copa redondeada, troncos cortos y delgados [2]. Los cambios de uso de suelo en el Estado de Querétaro se han presentado con mayor medida en los últimos años debido al crecimiento de la zona urbana. Las alteraciones



causadas por los cambios de uso/cobertura de suelos tienen mayores implicaciones en el desarrollo sustentable y contribuyen a procesos como el efecto invernadero, pérdida de la biodiversidad y cambios negativos en los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos de la zona [3]. Los árboles modifican el microclima y los procesos que afectan el balance de agua a nivel local, como interceptación, transpiración, infiltración, escurrimiento y evaporación.

Dependiendo de las circunstancias, estos efectos pueden ser beneficiosos para la recarga de agua subterránea en épocas de sequía [4]. Ya que la vegetación es un factor de impacto en el proceso de infiltración de agua en los suelos, se han realizado diversos estudios en diferentes tipos de climas para observar el comportamiento de la vegetación en las propiedades hidráulicas de los suelos [5], [6], [7], [8].

La vegetación modifica la infiltración de varias maneras: puede interceptar parcialmente el agua de lluvia y, junto con el posterior escurrimiento desde el dosel vegetal, modificar la intensidad y el diámetro de las gotas de agua que caen al suelo. En este proceso se reduce la intensidad de la lluvia y aumenta el diámetro de las gotas, lo que permite una mayor proporción de infiltración sobre el agua caída. A pesar de esto, las gotas tienen una menor cantidad de energía cinética al impactar desde menor altura [9] y producen una menor alteración en la capa superficial del suelo, manteniendo un alto valor de la permeabilidad, que no se mantendría si el suelo recibiese el impacto de las gotas sin interferencias [10].

Estos procesos son de especial importancia en las zonas áridas y semiáridas, pues los volúmenes de agua son escasos; sin embargo, contrario a lo que se podría pensar, una cobertura media de la vegetación puede contribuir a recargar los niveles de aguas subterráneas en zonas seca.

Físicamente, un árbol representa una barrera para aminorar el escurrimiento del lado de sotavento. Empero, la inclinación y di-

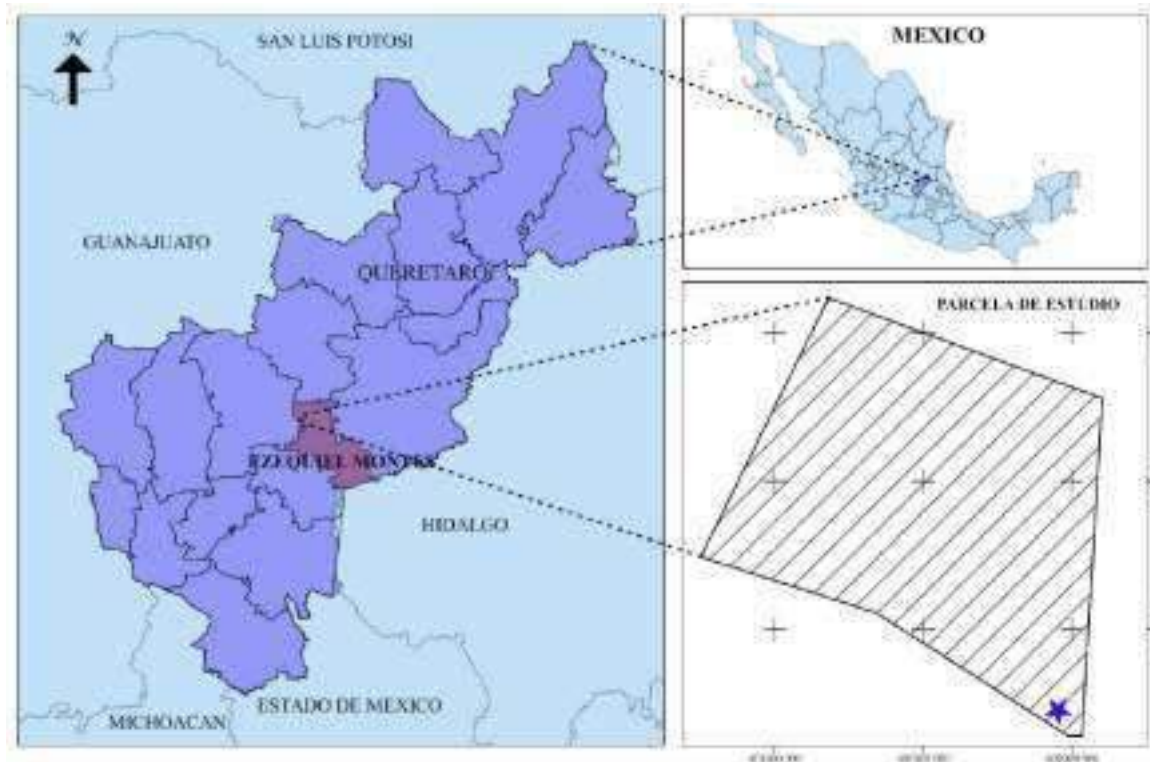
rección de la lluvia determinan el nivel de funcionamiento del árbol como estructura de obstrucción, ya que delimitan la dirección en la cual influye el árbol; a este efecto, [11] lo denominaron "efecto pantalla". En cuanto al funcionamiento como estructura de control, el dosel de los árboles tiene la capacidad de interceptar el agua de lluvia para retornarla a la atmósfera en forma de vapor, por lo que una fracción de la precipitación nunca llegará a la superficie del suelo [12]. La infiltración del agua en los suelos es un proceso clave en el ciclo hidrológico, ya que controla la relación del agua superficial y el agua subterránea. El contenido de agua en los suelos en las zonas alrededor de las raíces está condicionado por la lluvia y se divide entre el volumen de agua que escurre y el volumen de agua que se infiltra a través de este perfil [13].

El objetivo del presente estudio es conocer la redistribución de la infiltración que causa el huizache (*Acacia farnesiana*) como vegetación nativa dentro de una zona semiárida en una parcela natural en el municipio de Ezequiel Montes, en el Estado de Querétaro, México.

## **METODOLOGÍA / MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Localización**

Ezequiel Montes es un municipio localizado en la zona central del estado de Querétaro, México. El lugar posee un clima semiárido con una temperatura media anual de 17 °C, —raramente se presentan temperaturas más altas de 32.5 °C y menores de -2 °C—. La elevación media del municipio es de 1968 msnm y los volúmenes de precipitación son escasos, con una media anual de 287 mm entre los meses de mayo y octubre. La parcela de estudio (Fig. 1) está localizada al oeste del municipio de Ezequiel Montes y está calculada en un área aproximada de 0.19 km<sup>2</sup>.



**Figura 1.** Mapa de localización del individuo de huizache en estudio.

### Descripción del individuo en estudio

La especie *Acacia farnesiana*, mejor conocida como huizache, se presenta en las zonas áridas y semiáridas del país. Existe en dos formas: arbusto espinoso y árbol redondeado. En su forma de árbol, generalmente se encuentra con una copa redondeada, hojas plumosas y alternas.

Su tronco suele ser corto, delgado, bastante definido y con un ramificado ascendente, aunque algunas veces en sentido horizontal. Su corteza suele tener entre 5 - 6 mm de grosor y es de carácter fibroso.

Su follaje es perennifolio, aunque su mayor época de florecimiento se da en los meses de lluvia.

El individuo en estudio se presenta en forma de árbol, cuenta con una altura aproximada de 3.40 metros, su dosel llega alcanzar hasta 8.50 metros de diámetro en sus zonas

más alargadas, y tiene un diámetro de tronco a la altura de pecho de 48 cm, aproximadamente.

### Localización de los puntos de muestreo

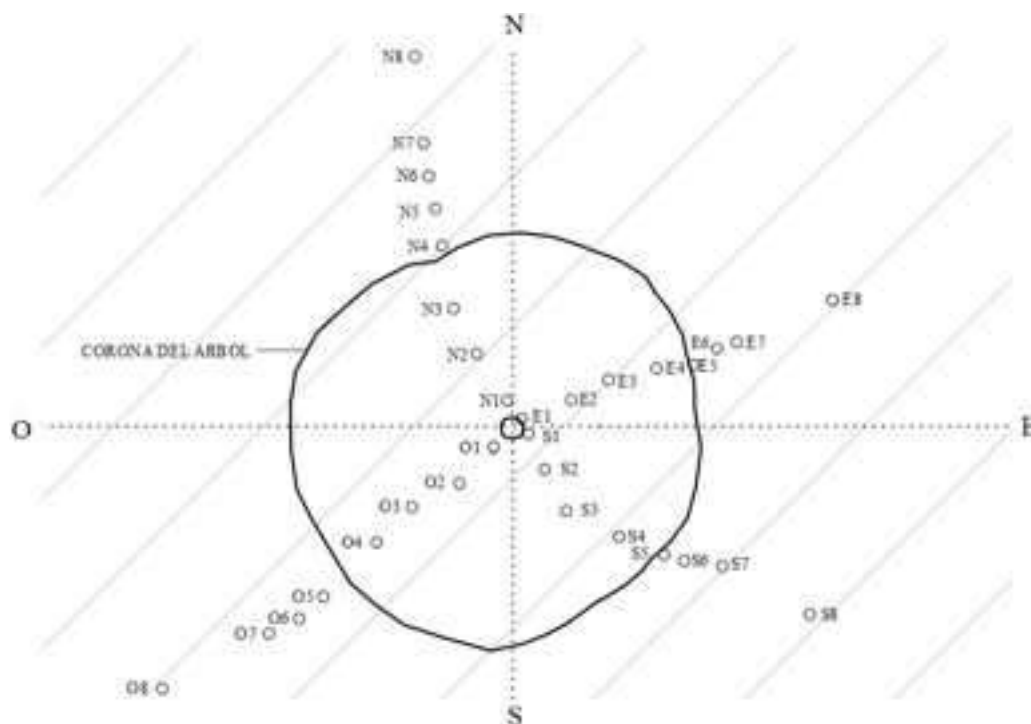
Las pruebas de infiltración y caracterización de suelos se llevaron a cabo en 32 puntos localizados en la zona radial del árbol (Tabla 1), se seleccionaron 8 puntos a distintas distancias desde el tronco del árbol en los 4 ejes del mismo.

Los puntos se trataron de localizar a distancias similares en los 4 ejes (Fig. 1), pero esto no fue posible con exactitud debido a la imposibilidad de emplazar el anillo en algunos puntos por la presencia de rocas.



**Tabla 1.** Localización de puntos de muestro en individuo de estudio.

Dirección	Punto	Coordenadas		Distancia al tronco (m)	Dirección	Punto	Coordenadas		Distancia al tronco (m)
		X	Y				X	Y	
Norte	N1	2291090.833	401981.444	0.52	Sur	N1	2291090.173	401981.864	0.34
	N2	2291091.756	401980.845	1.60		N2	2291089.498	401982.185	1.04
	N3	2291092.649	401980.385	2.61		N3	2291088.675	401982.609	1.95
	N4	2291093.886	401980.160	3.83		N4	2291088.165	401983.629	2.99
	N5	2291094.618	401980.024	4.56		N5	2291087.814	401984.520	3.88
	N6	2291095.262	401979.898	5.21		N6	2291087.693	401984.920	4.27
	N7	2291095.915	401979.790	5.87		N7	2291087.589	401985.673	4.94
	N8	2291097.617	401979.623	7.55		N8	2291086.63	401987.407	6.92
Oeste	O1	2291089.92	401981.174	0.56	Este	O1	2291090.47	401981.735	0.23
	O2	2291089.221	401980.500	1.53		O2	2291090.84	401982.714	1.27
	O3	2291088.752	401979.567	2.54		O3	2291091.242	401983.424	2.08
	O4	2291088.054	401978.865	3.52		O4	2291091.463	401984.374	3.04
	O5	2291086.982	401977.817	4.97		O5	2291091.538	401985.100	3.74
	O6	2291086.55	401977.330	5.67		O6	2291091.852	401985.567	4.29
	O7	2291086.257	401976.733	6.31		O7	2291091.988	401985.959	4.70
	O8	2291085.162	401974.634	8.64		O8	2291092.818	401987.852	6.77

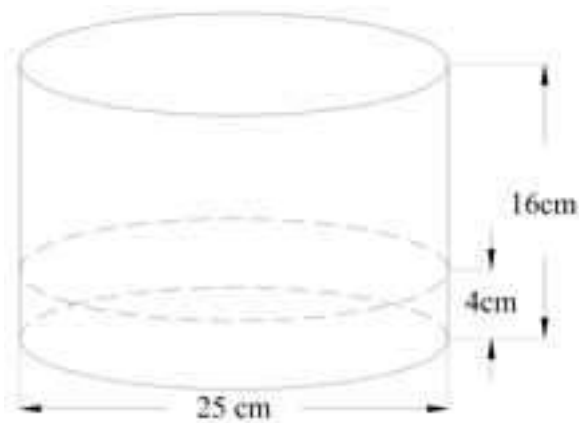


**Figura 2.** Ubicación de puntos de pruebas de infiltración en la zona radial del árbol.



## Pruebas de infiltración

Se realizaron pruebas de infiltración en cada uno de los 32 puntos seleccionados con un anillo simple (Fig. 3) de acero de 25 cm de diámetro interno y una profundidad de 16 cm. El instrumento tiene una graduación en milímetros y centímetros en la pared interna. Para la colocación del anillo en el punto de muestreo es necesario limpiar el área de emplazamiento, retirar la materia orgánica que se encuentre superficialmente y procurar tener una superficie pareja que siga la pendiente natural del terreno. El anillo debe ser insertado en el suelo a través del bisel que tiene en la parte inferior, después se debe colocar un polín de madera sobre éste para golpearlo con un mazo de manera uniforme con el propósito de que entre en el suelo de forma gradual; dependiendo del suelo, se puede enterrar entre 3 y 5 cm. Más tarde, se coloca en un plástico en la cara superior del anillo para colocar un volumen de agua conocido, que en este caso fue de 4.91 litros. Las lecturas se deben iniciar inmediatamente para no perder valores, ya que el volumen que infiltra en los primeros segundos es un indicativo importante del comportamiento del suelo. Las lecturas se llevaron a cabo a distintos intervalos según la rapidez de la prueba; en la mayoría de ellas, se realizó lectura a cada minuto hasta que se infiltró completamente el volumen de agua inicial.



**Figura 3.** Dibujo esquemático del anillo simple.

## Análisis granulométrico y de textura

Se obtuvieron 4 muestras de suelo de aproximadamente 4 kilogramos en cada zona de estudio del árbol, con el fin de conocer su distribución granulométrica y ubicarla dentro del triángulo de texturas del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés). Las muestras fueron colocadas en bandejas de acero y secadas en el horno al menos durante 48 horas, después se cribó a través de los tamices número 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 y 200. Se tomaron 50 g del material que paso la malla 200 y esta porción se utilizó para hacer el análisis de los suelos finos a través del método del hidrómetro de Bouyoucos [Fig. 4].

a)



b)



c)



**Figura 4.** a) Cribado del material seco a través de los tamices; b) Preparación del material defloculante para el análisis hidrométrico; c) Probetas analizadas a través del método del hidrómetro de Bouyoucos.



dentro de un jardín donde se sitúa una estación hidrometeorológica, y al cual se accede regularmente, por lo que el suelo podría estar más compactado por el peso al que se ve sometido constantemente. Existen puntos donde la infiltración se ve acelerada en gran medida; por ejemplo, O4 (Fig. 7), E4, E5 (Fig. 8) y S4 (Fig. 9) presentaron tiempos de infiltración de 0.17, 0.26, 0.27 y 0.17 horas respectivamente.

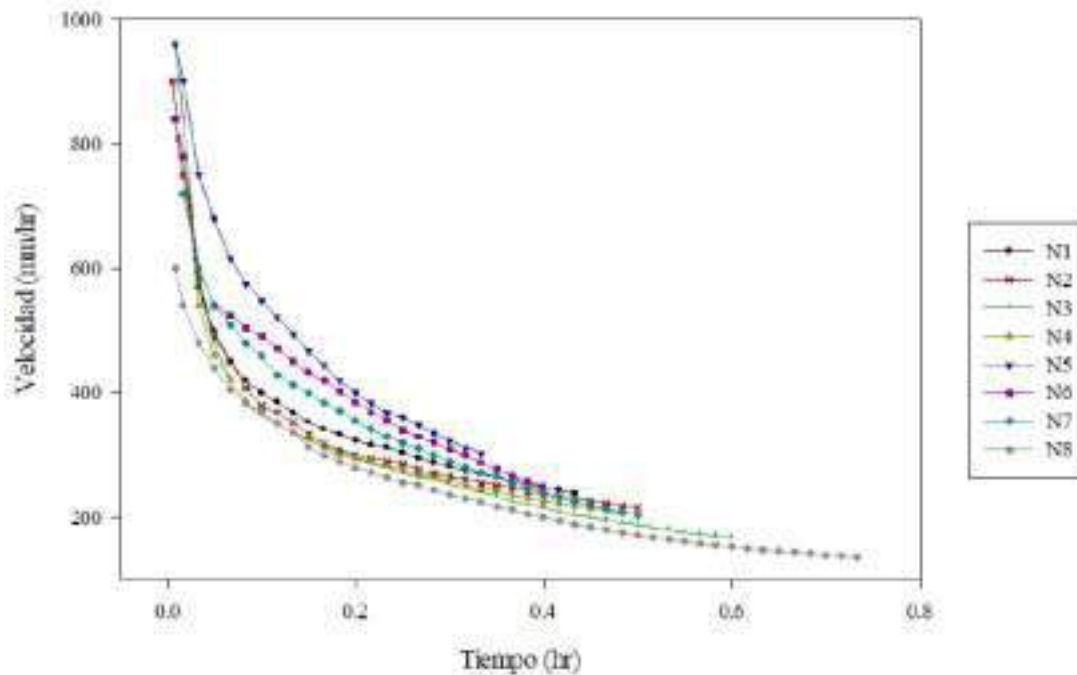
Se puede notar que las zonas Este y Oeste son las que presentaron tiempos de infiltración más cortos a comparación de las zonas Norte y Sur (Tabla 2), tal caso es consecuencia, en gran parte, de que las últimas dos poseen mayor proporción de arcillas.

En la mayoría de las pruebas se encontró una infiltración más acelerada en los primeros minutos de iniciada la prueba, seguida por un lapso en el cual el agua empezó a infiltrar con una tasa más estable hasta que se infiltró el volumen total del anillo.

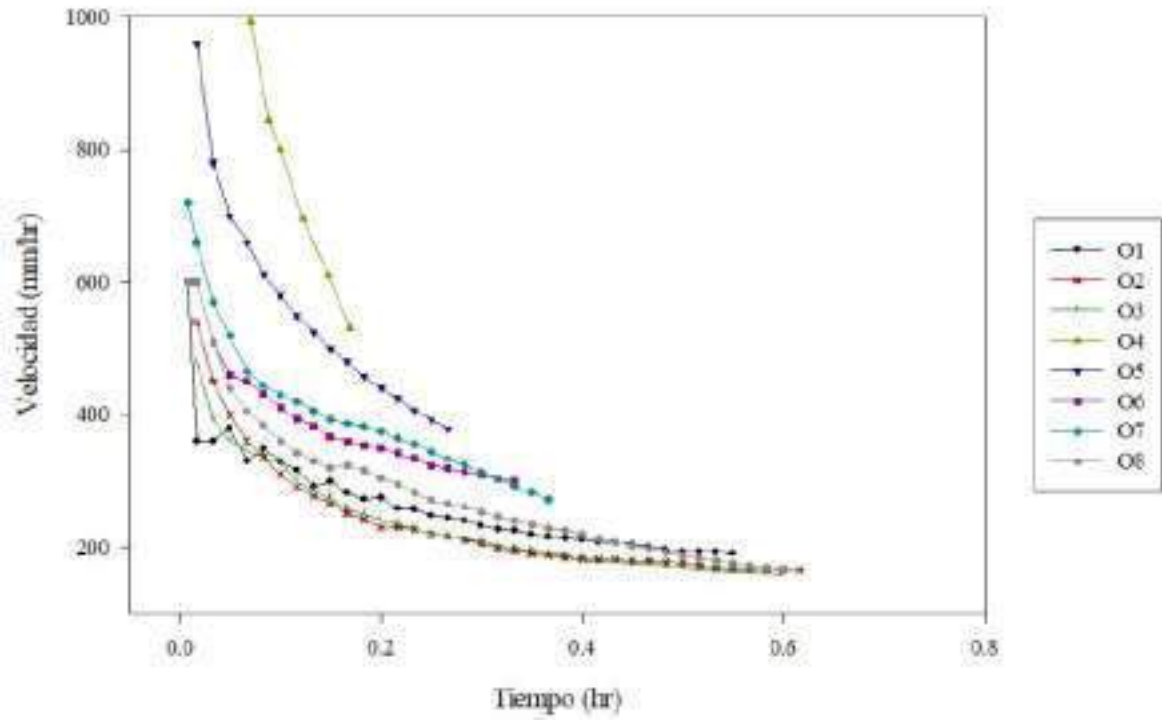
La humedad inicial del suelo suele ser determinante para los procesos de infiltración en los puntos de estudio. Pero en este caso

se halló que la infiltración inicial fue disminuyendo conforme aumentaba la distancia al tronco del árbol, y no representó mayor influencia en la velocidad de infiltración.

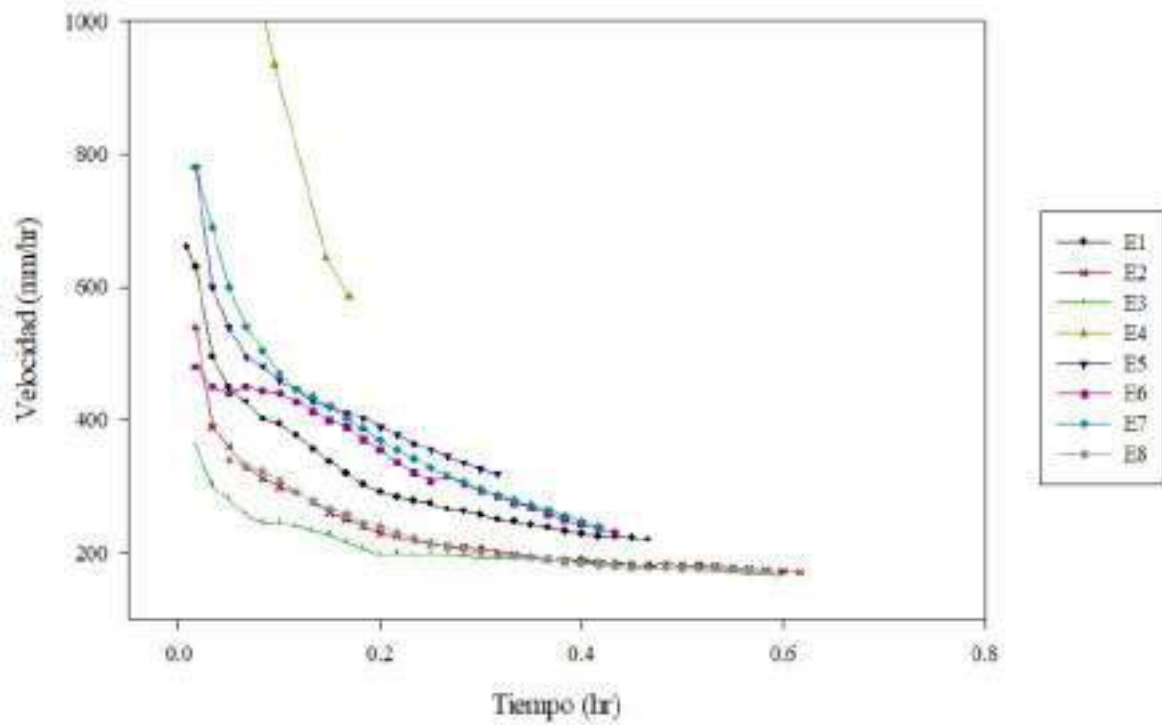
Diversos autores han hecho referencia al comportamiento de la infiltración en la zona cercana a un árbol, y han señalado que la tasa de infiltración se ve disminuida conforme se aleja del tronco del árbol. Sin embargo, en las primeras pruebas realizadas, se encontró que este comportamiento se cumple hasta cierto punto (entre los 3 y 5 metros desde el tronco del árbol), ya que la infiltración en el anillo que se forma alrededor del árbol se ve aumentada en gran medida (Fig. 10). La velocidad de infiltración en las zonas Norte, Oeste, Sur y Este aumentó hasta 1:0.77, 1:0.34, 1:0.78 y 1:0.38, respectivamente, en proporción con la prueba de infiltración más cercana al tronco del árbol en cada zona. Después de esta zona de influencia, la infiltración continúa con la tendencia a la baja, disminuyendo hasta la zona fuera del dosel, en la cual la tasa de infiltración se presenta con mucho menor velocidad (Fig. 11).



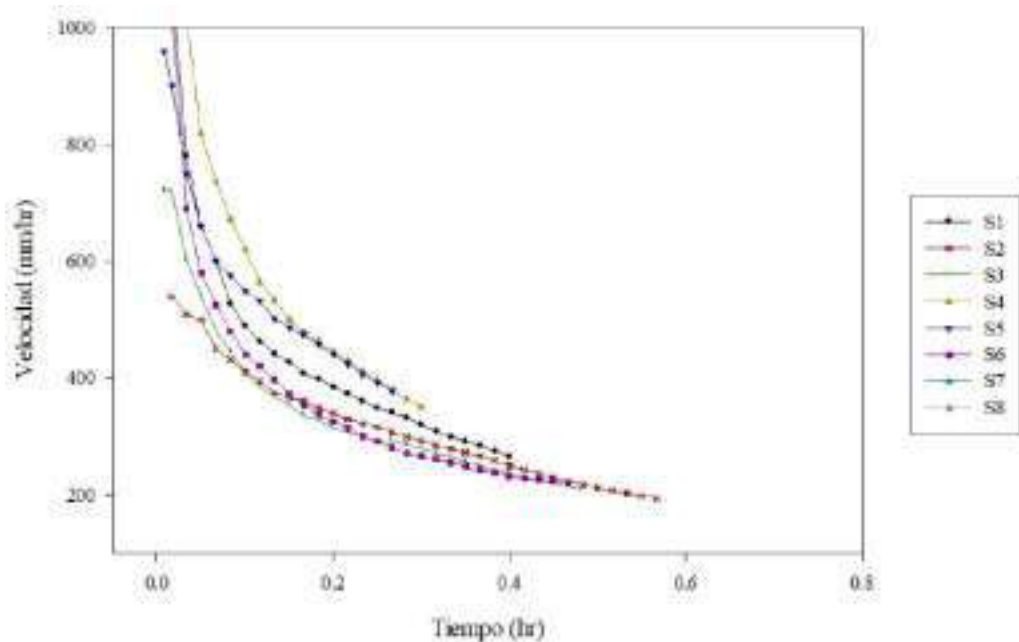
**Figura 6.** Curvas de infiltración en 8 puntos en la dirección Norte.



**Figura 7.** Curvas de infiltración en 8 puntos en la dirección Oeste.



**Figura 8.** Curvas de infiltración en 8 puntos en la dirección Este.



**Figura 9.** Curvas de infiltración en 8 puntos en la dirección Sur.

**Tabla 2.** Resumen de los valores de tasa de infiltración para los 32 puntos.

Punto	Clase Textural	Tiempo Infiltración (h)	Tasa de infiltración (mm * h <sup>-1</sup> )	% Humedad Inicial	Densidad aparente (mg * m <sup>-3</sup> )	% Humedad Volumétrica
N1	Franco-Arcilloso	0.43	230.77	9.81	1.33	13.05
N2	Franco-Arcilloso	0.50	200.00	8.74	1.34	11.71
N3	Franco-Arcilloso	0.60	166.67	9.01	1.38	12.43
N4	Franco-Arcilloso	0.48	206.90	7.48	1.42	10.62
N5	Franco-Arcilloso	0.33	300.00	6.37	1.43	9.11
N6	Franco-Arcilloso	0.40	250.00	7.12	1.34	9.54
N7	Franco-Arcilloso	0.47	214.29	6.09	1.19	7.25
N8	Franco-Arcilloso	0.73	136.36	4.48	1.21	5.42



O1	Franco	0.48	206.90	12.14	1.46	17.72
O2	Franco	0.60	166.67	13.42	1.42	19.06
O3	Franco	0.65	153.85	10.07	1.44	14.50
O4	Franco	0.17	600.00	9.95	1.29	12.84
O5	Franco	0.27	375.00	7.88	1.37	10.80
O6	Franco	0.33	300.00	8.03	1.41	11.32
O7	Franco	0.37	272.73	6.07	1.39	8.44
O8	Franco	0.60	166.67	6.18	1.45	8.96
E1	Franco	0.33	300.00	14.18	1.45	20.56
E2	Franco	0.40	250.00	10.17	1.48	15.05
E3	Franco	0.47	214.29	10.91	1.36	14.84
E4	Franco	0.26	387.10	8.73	1.47	12.83
E5	Franco	0.27	375.00	6.14	1.32	8.10
E6	Franco	0.45	222.22	6.58	1.38	9.08
E7	Franco	0.40	250.00	8.47	1.41	11.94
E8	Franco	0.52	193.55	7.05	1.4	9.87
S1	Franco-Arcilloso	0.45	222.22	13.48	1.39	18.74
S2	Franco-Arcilloso	0.57	176.47	14.47	1.37	19.82
S3	Franco-Arcilloso	0.60	166.67	11.39	1.32	15.03
S4	Franco-Arcilloso	0.17	592.30	10.14	1.18	11.97
S5	Franco-Arcilloso	0.32	315.79	8.07	1.23	9.93
S6	Franco-Arcilloso	0.43	230.77	6.04	1.25	7.55
S7	Franco-Arcilloso	0.42	240.00	5.58	1.3	7.25
S8	Franco-Arcilloso	0.58	171.43	5.03	1.19	5.99

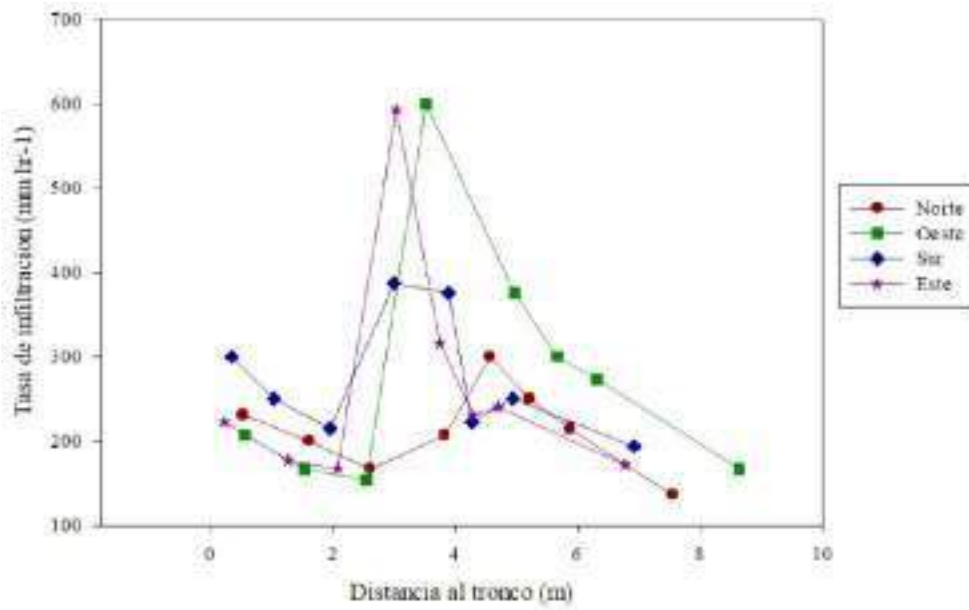


Figura 10. Resumen de tasas de infiltración en las 4 zonas.

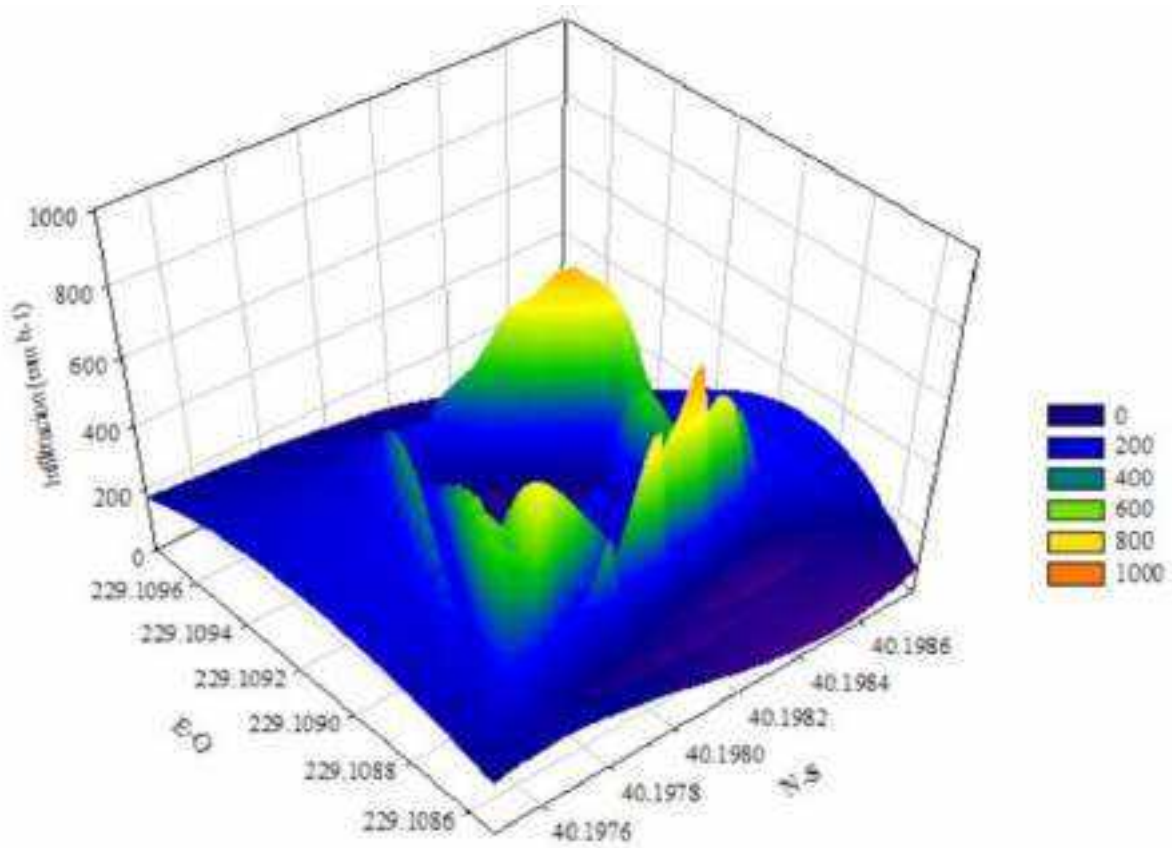


Figura 11. Imagen en 3D del comportamiento de la infiltración en la zona radial del árbol.



## CONCLUSIONES

Partiendo de la teoría de que la infiltración se ve disminuida en el área radial conforme nos alejamos del tronco del árbol [14], se halló que este proceso se cumple hasta llegar a la zona del anillo (2 a 5 metros), donde se presenta una infiltración mucho más rápida.

Una vez fuera de esta zona, la infiltración decrece nuevamente. Una de las razones de este comportamiento podría ser la presencia de raíces que se extendieron en sentido horizontal debido a la ausencia de agua en las capas más profundas del suelo, las cuales generan esta zona de influencia por los macroporos originados por las mismas raíces, ya que actúan como conductos por los que el agua circula con mayor facilidad.

Otra razón que podría explicar dicho comportamiento sería que el efecto pantalla ejerce un papel determinante en la velocidad de infiltración del agua en el suelo, dado que genera un área donde las gotas de lluvia no impactan directamente el suelo. Es necesario continuar con estudios en otros individuos de huizache que puedan confirmar la hipótesis de la zona de influencia en la que la infiltración se vea aumentada.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la oportunidad de realizar la presente investigación, y a los compañeros y profesores del laboratorio de geotecnia ambiental por las facilidades para realizar las pruebas necesarias; a la señora Leticia Vega por el espacio en la parcela para realizar las pruebas de infiltración; a la Universidad Autónoma de Querétaro y a la coordinación del 13vo Coloquio de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, por darnos el espacio para presentar esta investigación.

## REFERENCIAS

- [1] C. A. Mastachi-Loza, E. González-Sosa, R. Becerril-Piña, and I. Braud, "Pérdidas por intercepción en mezquite (*Prosopis Laevigata*) y huizache (*Acacia farnesiana*) de la región semiárida del centro de México," *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 1, pp. 103-120, 2010.
- [2] (2009) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad website. [Online]. Available: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/mimosaceae/acacia-farnesiana/fichas/ficha.htm>
- [3] J. F. Mas, A. Díaz-Gallegos, J. R. Mayorga-Saucedo, R. Alcántara, C. Bocco, and A. Pérez-Vega, "Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 5, pp. 249-261, oct. 2004.
- [4] M. Kazemi-Zadeh, and A. R. Sepaskhah, "Effect of tree roots on water infiltration rate into the soil," *Iran Agricultural Research*, vol. 35, pp. 13-20, 2016.
- [5] D. J. Eldridge, and D. Freudenberger, "Ecosystem wicks: woodland trees enhance water infiltration in a fragmented agricultural landscape in eastern Australia," *Austral Ecology*, vol. 30, pp. 336-347, 2005.
- [6] F. M. Ata, E. T. Mohd, and K. Mohd, "Impact of interception on infiltration and soil moisture in dipterocarp forest and oil palm plantations in Tasik Chini, Pahang," *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, vol. 19, pp. 1084-1092, 2015.
- [7] L. Benegas, U. Ilstedt, O. Roupsard, J. Jones, and A. Malmer, "Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America," *Agriculture, ecosystems & environment*, vol. 183, pp. 185-196, Enero 2014.
- [8] U. Ilstedt, A. B. Tobella, H. R. Bazié, J. Bayala, E. Verbeeten, G. Nyberg, and D. Sheil, "Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics," *Nature: Scientific reports*, vol. 6, p. 21930, feb. 2016.



[9] J. Wainwright, A. J. Parsons, and A. D. Abrahams, "Rainfall energy under creosotebush," *Journal of Arid Environments*, vol. 43, pp. 111-120, oct. 1999.

[10] P. C. Véliz-Chavez, E. González-Sosa, S. D. R. Barajas-Ortiz, and N. M. Ramos-Salinas, "El efecto pantalla o sombra de los árboles en la formación de los escurrimientos urbanos," *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 3, pp. 73-87, Oct. 2012.

[11] H. H. Savenije, "The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary," *Hydrological Processes*, vol. 18, pp. 1507-1511, mayo 2004.

[12] Y. Huang, X. Yu, E. Li, H. Chen, L. Li, X. Wu, and X. Li, "A process-based water balance model for semi-arid ecosystems: A case study of psammophytic ecosystems in Mu Us Sandland, Inner Mongolia, China," *Ecological Modelling*, vol. 353, pp. 77-85, junio 2017.

[13] F. P. Lyford, and H. K. Qashu, "Infiltration rates as affected by desert vegetation," *Water Resources Research*, vol. 5, pp. 1373-1376, dic. 1969.

[14] Zapata-Sierra, and F. Manzano-Agugliaro, "Influencia de seis especies arbóreas en la infiltración de agua en el suelo," *Agrociencia*, vol. 42, pp. 835-845, oct. 2008.



La presente edición del sexto número de *Perspectivas de la Ciencia y de la Ingeniería* fue maquetada en Diseño Editorial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro por Diana Guadalupe Pacheco Ángeles. El cuidado de la edición estuvo a cargo de Soid Lazlo Ruiz.

Se publicó en Diciembre de 2020  
en Santiago de Querétaro, Qro., México.

