

# INGENIARE

Año 16 • No. 29 • Diciembre 2020 • Barranquilla - Colombia • ISSN 1909-2458



**UNIVERSIDAD LIBRE**  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
Seccional Barranquilla





## DIRECTIVAS

Presidente Nacional:	<i>JORGE ALARCÓN NIÑO</i>
Rector Nacional:	<i>FERNANDO DEJANÓN RODRÍGUEZ</i>
Censor Nacional:	<i>RICARDO ZOPÓ MÉNDEZ</i>
Director Nacional de Investigaciones:	<i>ELIZABETH VILLARREAL CORRECHA</i>
Presidente Delegado:	<i>BEATRIZ TOVAR CARRASQUILLA</i>
Rector Seccional:	<i>SALVADOR RADA JIMÉNEZ</i>
Director Seccional de Investigaciones:	<i>WENDY ROSALES RADA</i>
Decano Facultad de Ingeniería:	<i>DIEGO SUERO PEREZ</i>

# INGENIARE

**EDITOR:** M.Sc. Ricardo De La Hoz Lara

**ASISTENTE EDITORIAL:** Ing. Juan Carlos Miranda Passo

## COMITÉ EDITORIAL

Ph.D. REYNALDO VELÁZQUEZ ZALDÍVAR  
Universidad Óscar Lucero Moya - Holguín, Cuba

Ph.D. LILIA MENDOZA VEGA  
Universidad Libre - Seccional Barranquilla

M.Sc. LUIS ORTIZ OSPINO  
Universidad Simón Bolívar

M.Sc. GLORIA NARANJO AFRICANO  
Universidad del Atlántico

## COMITÉ CIENTÍFICO

Ph.D. ARISTIDES BARAYA  
Southeastern Louisiana University, USA.

Ph.D. JAIDER VEGA JURADO  
Universidad del Norte, Colombia

Ph.D. RICARDO SILVEIRA MARTINS  
Universidade Federal de Mina Gerais, Brasil

Ph.D. RODOLFO GARCIA FLORES  
Commonwealth Scientific and Industrial  
Research Organisation – CSIRO, Australia

PhD. CECILIA MONTT VEAS  
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso,  
Chile

Revista

# INGENIARE

Año 16 No. 29 Diciembre 2020

Ediciones

Universidad Libre Seccional Barranquilla

Apartado Aéreo 1752 Sede Principal de Barranquilla

Km. 7 antigua carretera a Puerto Colombia

Comunica a todas las dependencias PBX: 3673800

revistaingeniare@unilibrebaq.edu.co

www.unilibrebaq.edu.co



La revista *Ingeniare* es editada bajo una licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. Se autoriza la citación, uso y reproducción parcial o total de los contenidos, para lo cual se deberá citar la fuente.



Imagen de portada:

"Freepik"

Diagramación e impresión

Xpress Estudio Gráfico y Digital - Xpress kimpres

PBX: 602 0808

Bogotá, D.C.

## Contenido

### Content

<b>Editorial</b> .....	<b>7</b>
<i>Ricardo De la Hoz L.</i> <i>Editor</i>	
<b>Extensión de la arquitectura Docker para el despliegue automático de contenedores</b> .....	<b>11</b>
<i>Extension of the Docker architecture for automatic container deployment</i> <i>Luz Elena Gutiérrez López</i> <i>Carlos Andrés Guerrero Alarcón</i>	
<b>Eficiencia académica estudiantil: un enfoque de análisis de componentes principales y análisis envolvente de datos</b> .....	<b>27</b>
<i>Student academic efficiency: a principal component analysis and data envelopment analysis approach</i> <i>Rohemi Zuluaga</i> <i>Enrique J. Delahoz-Domínguez</i> <i>Hoolyana Ojeda</i>	
<b>Análisis de curvas de Covid-19 en Colombia utilizando ajuste por mínimos cuadrados...</b>	<b>41</b>
<i>Analysis of Covid-19 curves in Colombia using least squares adjustment</i> <i>Luis Eduardo Ramírez Carvajal</i> <i>Karla Cecilia Puerto López</i> <i>Germán Luciano López Barrera</i>	
<b>Desarrollo de una prensa para ensayos de tensión en polímeros</b> .....	<b>57</b>
<i>Development of a polymer tensile testing machine</i> <i>Stephan Obando</i> <i>Cristian Sepúlveda</i> <i>Tito Piambac</i> <i>Richard Moran</i>	

<b>Impacto de las obras de plantas de tratamiento de aguas residuales sobre el río Bogotá con la metodología de la huella hídrica .....</b>	<b>73</b>
<i>Impact of sewage treatment plant works on the Bogota River using the water footprint methodology</i>	
<i>Yulia Ivanova</i>	
<i>Sharith Yessenia Parra Cendales</i>	
<i>Julián David Sánchez Quijano</i>	
<i>Alejandro Tolosa Robayo</i>	
<i>Ivonne Angélica Castiblanco Jiménez</i>	

## EDITORIAL

La revista *Ingeniare* publica artículos derivados de la investigación científica en las distintas áreas de ingeniería y otras ciencias afines, con el fin de convertirse en un instrumento para la difusión de la investigación, el desarrollo tecnológico y los resultados de investigación en la comunidad científica y académica. Cada día la revista hace un esfuerzo por mejorar su calidad y compromiso ético, apegándose a los estándares de buenas prácticas editoriales y buscando aumentar su visibilidad en bases de datos y servicios de indexación reconocidos.

Para esta edición, las técnicas de optimización también ocupan un lugar destacado: El análisis envolvente de datos se aplica en el análisis de la eficiencia estudiantil; así mismo, los inventarios son analizados por medio de modelos de máximos y mínimos en otro artículo. De otra parte, contamos con artículos de ciencia de computación relacionados con las redes SDN, la arquitectura Docker y el diseño de chatbots para uso empresarial. La aplicación de técnicas de impacto ambiental en un río y el desarrollo tecnológico en máquinas de ensayo también son otros de los artículos en esta edición.

Seguimos invitando a la comunidad científica y académica a publicar sus trabajos con la Revista *Ingeniare*, con presencia en servicios de indexación y resumen como DOAJ, Periódica, Dialnet, REDIB y BASE.

**Ricardo De la Hoz L.**  
**Editor**





# **ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**

---



# Extensión de la arquitectura Docker para el despliegue automático de contenedores

## Extension of the Docker architecture for automatic container deployment

Luz Elena Gutiérrez López<sup>1</sup>

Carlos Andrés Guerrero Alarcón<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.29.7432>

### RESUMEN

Los contenedores se han convertido en una estrategia ideal para acelerar el proceso de desarrollo de plataformas. Su importancia radica en la capacidad que tienen de separar una aplicación e interactuar con sus partes sin que la totalidad de la aplicación tenga que ser afectada. Los contenedores pueden compartir procesos entre varias aplicaciones, de manera muy similar al esquema propuesto por la arquitectura orientada a servicios. El objetivo de esta investigación fue definir una arquitectura para el despliegue automático de contenedores en contextos académicos; la verificación y validación de la arquitectura se realizó mediante la construcción de una plataforma que adapta los conceptos de la arquitectura y permite visualizar nivel a nivel cada uno de sus componentes. Se realizó un análisis bibliográfico sobre las arquitecturas propuestas para la gestión de contenedores, con lo cual se evidenciaron fortalezas y debilidades. El resultado directo de esta investigación fue la propuesta arquitectónica para el despliegue de contenedores como una extensión de Docker. El resultado indirecto fue la plataforma web con miras a la verificación y la validación de la arquitectura.

**Palabras clave:** Administración web; Contenedor; Desarrollo de software; Docker.

### ABSTRACT

Containers have become an ideal strategy to speed up the platform development process. The importance of containers is the ability they must separate an application and interact with its parts, without the entire application having to be affected. Containers can share processes between multiple applications, using the same strategy used by service-oriented architecture. The aim this paper is to present a novel architecture for the automatic deployment of containers in academic contexts. The verification and validation of the architecture was carried out through the construction of a platform that adapts the concepts of the architecture and allows to visualize each of its components level by level. In this study, a bibliographic analysis was carried out on the architectures that manage containers, showing strengths and weaknesses. The principal result of this research was the proposal of novel architecture for the deployment of containers as extension of Docker. The secondary result was the development of a web platform, this platform allows to present all characteristics of the novel approach. It was used for the verification and validation of the architecture.

**Keywords:** Web management; Container; Software development; Docker.



**Como citar este artículo:** G. L. Luz Elena y G. A. Carlos Andrés, Extensión de la arquitectura Docker para el despliegue automático de contenedores, *ingeniare*, vol. 2, n.º 29, dic. 2020.

1. *Magíster en Ingeniería Área Informática y Ciencias de la Computación, Ingeniera de Sistemas. Universidad del Norte, Colombia, Correo: egluz@uninorte.edu.co*

2. *Ph. D. en Ingeniería, Magíster en Informática, Ingeniero de Sistemas. Universidad Santo Tomás, Colombia, Correo: carlos.guerrero@usantoto.edu.co*

## 1. INTRODUCCIÓN

El diseño y la programación de algoritmos definen las bases y las competencias que debe adquirir un ingeniero de desarrollo, por tanto, los cursos de programación son de vital importancia en el proceso de formación [1]. Las habilidades en programación que un estudiante adquiere en su proceso de formación están calificadas como las competencias requeridas en el siglo XXI [2], lo que realza la importancia de aplicar un proceso de enseñanza aprendizaje que asegure la adquisición de competencias en el área de programación.

Facilitar la enseñanza de la programación es una actividad que no solo requiere conocimiento técnico por parte del docente, sino habilidades para motivar a los estudiantes a superar los obstáculos que se presenten en su formación [3]. Un estudiante frustrado, probablemente, incrementará las estadísticas de deserción [1].

El proceso de formación de un desarrollador de *software* requiere de tiempo y dedicación, y existen múltiples problemáticas que inciden en el éxito o el fracaso [4]. Entre estas problemáticas se encuentran la formación y la experticia del docente, los conocimientos previos que debe tener el estudiante, así como los recursos tecnológicos a los que tiene acceso el desarrollador, entre otros [5].

En [6]critical thinking and collaboration or recognized as Higher Order Thinking Skills (HOTS se plantea que los procesos actuales de enseñanza son ineficientes, lo cual crea en el estudiante una resistencia que, eventualmente, se transformará en miedo a la programación [7], [8]. Existe evidencia de trabajos —como, por ejemplo, [9]— en los que utilizan otras estrategias para enseñar programación (p. ej., el caso de los videojuegos).

Este documento presenta una arquitectura soportada en Docker [10] [11] para el despliegue automático de contenedores en procesos de desarrollo *software* orientados a la web. El enfoque de este proyecto busca proporcionar herramientas que permitan emplear estrategias diferentes dirigidas a que el estudiante en formación del área de sistemas esté en capacidad de construir aplicaciones.

El artículo está organizado de la siguiente forma: inicia con una revisión de literatura acerca de arquitecturas para el despliegue de contenedores, posteriormente, presenta la arquitectura utilizada como línea de base en la presente investigación. Continúa con la descripción de la arquitectura propuesta para el despliegue automático de contenedores en contextos académicos. Finaliza con el planteamiento de las limitaciones de la presente investigación y las conclusiones del estudio.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

La Tabla 1 presenta una descripción de arquitecturas para la gestión de contenedores y su comparación con la propuesta de arquitectura de este artículo.

**Tabla 1. Comparación de estudios**

Investigación	Descripción	Comparativo
"Automatic programming assignment checker" [5]	Este trabajo utiliza la arquitectura de Docker con el fin de encapsular el proceso de verificación de código en asignaturas, en el cual el estudiante debe entregar fuentes para verificación de calidad. Los contenedores propuestos son estáticos y utilizan un componente que se encarga de la lógica del negocio en el proceso de validación y compilación de código.	Tanto el trabajo de [5] lecturers should be exempted from routine tasks like source code compilation, testing and grading. Current computers are equipped with enough computational power to automate these routine tasks. This paper discusses the analysis and realization of such a system for user submitted automatic source code evaluation. The main system requirement was the safe runtime environment (sandbox como la presente investigación toman como referencia la arquitectura de Docker. No obstante, la solución propuesta en este artículo permite la instalación de múltiples contenedores en tiempo de ejecución. Además, no requiere conceptos técnicos para el usuario final. Incluso el componente de verificación de código propuesto en [5] podría ser utilizado en la presente investigación, de manera que se evita el montaje de todo el host de Docker.
"Docker cluster management for the cloud" [12]	Esta investigación utiliza un caso de estudio con la finalidad de presentar las ventajas de Docker en un ambiente de desarrollo. El valor agregado radica en el uso de BPEL (business process execution language) para la orquestación de todos los contenedores.	El trabajo en [12] y el propuesto en este artículo plantean el uso de Docker como una herramienta dirigida a facilitar y orquestar contenedores. La diferencia con la presente propuesta es el enfoque de la solución propuesta, puesto que buscan medir y analizar el impacto de la dockerización en la nube. Los autores indican la necesidad que tiene Docker de seguir en constante evolución, y plantean la importancia de realizar trabajos que permitan automatizar el uso de contenedores.
Self-hosted Kubernetes [13]	Los autores expresan la importancia de utilizar Docker para gestionar contenedores. Adicionalmente, plantean el dilema entre realizar múltiples virtualizaciones en una máquina o crear contenedores con acceso entre ellos. Con respecto a la gestión de contenedores proponen el uso de Kubernetes, sin embargo, hacen énfasis en el nivel de conocimiento que debe tener el usuario para determinar las configuraciones precisas a la hora de establecer un ambiente de pruebas o de producción.	El aporte de nuestra investigación está enfocado en el no uso de Kubernetes para gestionar contenedores; por el contrario, se propone una arquitectura con el fin de administrar contenedores sin necesidad que el usuario final tenga conocimientos técnicos.

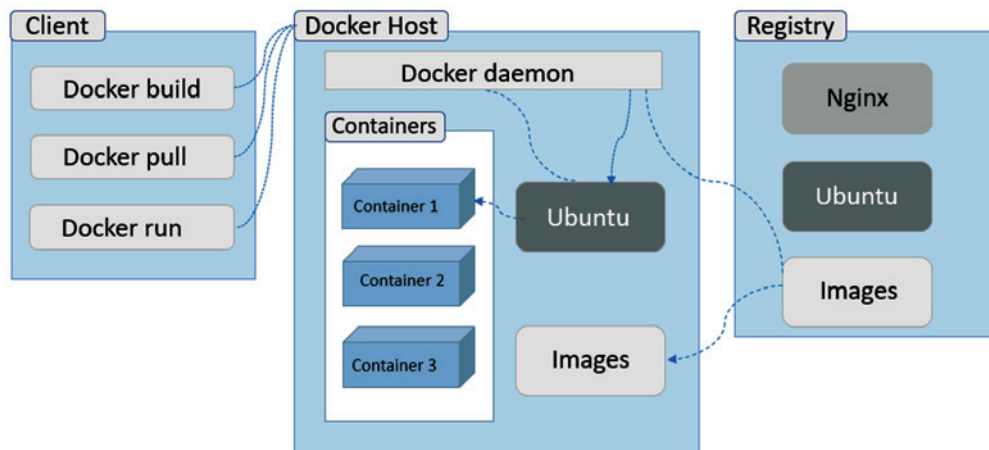
Fuente: elaboración propia.

### 3. ARQUITECTURA DE REFERENCIA

El desarrollo de aplicaciones robustas es un requerimiento fundamental en la industria del *software* [14] geographically distributed development teams, new business models and diverse cultural interactions steer these tools. Software development supported by web-based services, built on top of Web 2.0 technologies, is emerging as a new paradigm for distributed software development. New generation software forges (web-based development environments. Una buena práctica para el desarrollo de *software* es planear y realizar seguimiento a cada fase del ciclo de vida del aplicativo. Por tal motivo, es importante el uso de herramientas que apoyen la producción y la puesta en marcha del *software*. La arquitectura de referencia utilizada en esta investigación fue Docker [10] Docker agiliza la configuración de los equi-

pos de desarrollo, de modo que permite la virtualización de un servidor en muchos espacios aislados de trabajo y compartir recursos en una máquina anfitriona. Adicionalmente, Docker permite encapsular entornos y aplicaciones que, posteriormente, pueden ser utilizadas en otros espacios de trabajo, lo que facilita el uso y la configuración de las herramientas.

La arquitectura cliente servidor de Docker se presenta en la Figura 1. La capa cliente puede ejecutar instrucciones directamente sobre el anfitrión de Docker para descargar y desplegar imágenes y contenedores. En el Docker Host existe un Docker Daemon; este se encarga de controlar las imágenes y los contenedores que un cliente puede generar [15]. Toda la comunicación entre cliente y servidor se realiza a través de *sockets* utilizando un API de tipo Restfull [11].



**Figura 1. Arquitectura Docker**

Fuente: Adaptada de [16]

El Docker Daemon controla las imágenes a través del Docker registry, el cual es el encargado de organizar y publicar las imágenes que un usuario puede llegar a utilizar. Cada contenedor se crea a partir de una imagen y es un entorno aislado y seguro en el que se ejecuta la aplicación [17].

Docker administra espacios de nombres, dispositivos de red, cortafuegos y, en general, los recursos del sistema operativo a través de *libcontainer*. La administración de los contenedores se realiza al dar cumplimiento al estándar Open Container Initiative-OCI [18], [19].

El despliegue de la arquitectura de Docker se puede realizar sobre un servidor Linux o sobre hipervisores tipo I y II. Los hipervisores tipo I son aquellos que se utilizan a través de *hardware*, y se caracterizan por ser rápidos y costosos. Los hipervisores tipo II no son tan rápidos como los hipervisores tipo I, sin embargo, son económicos e, incluso, algunos se pueden utilizar de forma gratuita [20].

## 4. ARQUITECTURA PROPUESTA

Utilizar Docker para construir una nueva arquitectura requiere tres aspectos fundamentales: 1) la definición de los elementos diferenciadores de las dos arquitecturas; 2) la construcción de los componentes que permiten que la arquitectura se despliegue en un entorno de desarrollo; y 3) la ejecución de pruebas con el fin de validar la implementación de la nueva arquitectura.

### 4.1 Diseño de la arquitectura

La solución tecnológica propuesta en esta investigación se compone de una arquitectura base y una plataforma para la gestión automática de imágenes y contenedores. La arquitectura base reutiliza la totalidad de la arquitectura Docker y añade dos artefactos que permiten la automatización en contextos académicos. La Figura 2 describe la arquitectura base propuesta; en color verde se presentan los elementos diferenciadores con relación a la arquitectura Docker: *middleware* y *primary storage of containers*.

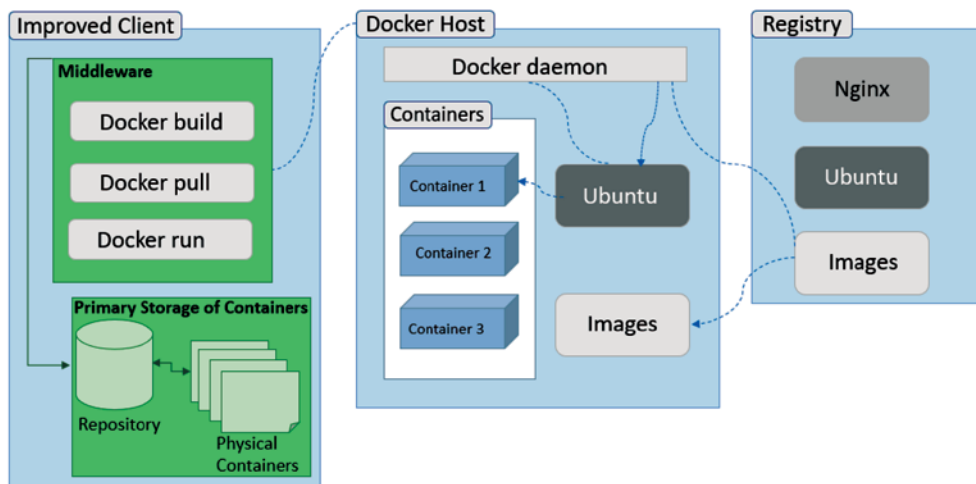


Figura 2. Arquitectura propuesta

Fuente: elaboración propia.

El cliente Docker permite la ejecución de tres instrucciones que se encargan de realizar la descarga de las imágenes. En la arquitectura base propuesta es posible apreciar una capa que cubre al cliente, la cual automatiza este proceso. Esta capa es un *middleware* [21] que gestiona una plataforma Web, la cual permite el uso y la administración de contenedores a usuarios que están en proceso de aprendizaje en contextos de desarrollo académico.

La siguiente capa de la arquitectura está ubicada en el cliente y se denomina “almacenamiento primario de contenedores”. La arquitectura define este almacenamiento como un espacio de nombres y un conjunto de repositorios que permiten la identificación, selección y búsqueda de los contenedores que

puedan ser definidos por los usuarios. La implementación de la arquitectura en la plataforma utiliza el concepto de identificadores únicos para el almacenamiento primario, con lo cual un usuario puede llegar a crear muchos contenedores con el mismo nombre.

La arquitectura propuesta encapsula los conceptos de Docker, de modo que se logra una abstracción total para el usuario. Como resultado de esta abstracción un usuario no necesita tener conocimientos técnicos sobre Docker para implementar la arquitectura desarrollada. A continuación, se presentan los artefactos que hacen parte de la arquitectura y de la plataforma desarrollada utilizada para su verificación y validación.

#### **4.1.1 Artefactos de la solución**

- *Primer artefacto.* Servidor Linux con distribución Ubuntu en su versión 19.04 [22]. El *hardware* para la implementación estaba soportado con un procesador Intel(R) Core (TM) i5-8250U, con 8 gigas de RAM y conexiones ethernet.
- *Segundo artefacto: Docker Community Edition CE.* Lo utilizan desarrolladores nuevos en el uso de la tecnología o grupos pequeños de desarrollo. El canal de actualización para la descarga fue “Stable”, ideal para para personas que necesitan trabajar con contenedores sin errores [16].
- *Tercer artefacto.* La plataforma web desarrollada con base en los lineamientos definidos en la arquitectura propuesta. La implementación se realizó con base en patrones arquitectónicos y de diseño, buscando simplificar la funcionalidad, mantenibilidad y escalabilidad del sistema [23]. En el desarrollo de la aplicación web se utilizaron los patrones creacionales: Factory Method, Prototype y Singleton. Los patrones estructurales: Decorator y Facade, y los patrones de comportamiento Iterator y Template [24].
- *Cuarto artefacto: Docker registry.* Fue utilizado con el fin de acceder a los índices de las imágenes y presentar a los usuarios un listado de componentes reutilizables susceptibles de ser seleccionados sin conocimientos técnicos. La arquitectura puede implementar cualquier tipo de contenedor almacenado en Docker, sin embargo, en la plataforma se personalizaron dos contenedores para facilitar la comprensión de la arquitectura: 1) contenedores para bases de datos MySql [25] y 2) contenedor para servidores Web apache.

## **4.2 Implementación de la arquitectura**

La arquitectura requiere de una plataforma web para su despliegue y validación. A continuación, se presenta la configuración base requerida por la plataforma, la descarga de imágenes de prueba, la inclusión de las imágenes en el repositorio de la arquitectura y el ejemplo de funcionamiento de la plataforma Web.



#### 4.2.1 Instalación y configuración de componentes básicos

1. Instalación de la máquina virtual Oracle VM Virtual Box.
2. Definir distribución de Linux. Es importante definir qué distribución de Linux utilizar. Según [26], las versiones más estables de Linux son: Redhat, Debian, Ubuntu, Linux Mint, Fedora y MX Linux. La versión que se utilizó para este caso de estudio fue Ubuntu (Server 19.04 Disco Dingo), por las siguientes razones:
  - Distribución sencilla y con un repositorio de paquetes amplio.
  - Docker tiene paquetes preconfigurados para Ubuntu.
  - Sistema operativo actualizado cada dos meses y con una frecuencia de soporte a largo plazo (dos años).
  - Es una distribución utilizada en contextos académicos.
3. Instalación de Docker.
4. Descarga y sincronización del repositorio base de la arquitectura. En este punto se realizó la descarga de imágenes de prueba tales como: MySQL, PHP, Java y Python, entre otras.
5. Creación del contenedor MySQL a partir de la imagen almacenada en el repositorio de la arquitectura. Este contenedor es el que permite el almacenamiento de usuarios desde la plataforma que gestiona la arquitectura. La plataforma provee una interfaz de usuario final.
6. Configuración del archivo Dockerfile para el contenedor que almacena los usuarios de la plataforma, tal como se presenta en la Figura 3. Los Dockerfile son útiles para usuarios que no tienen conocimiento en la configuración de archivos de Docker [27].

```
1 FROM mysql:latest
2 ENV MYSQL_ROOT_PASSWORD clavemysql
3 ENV MYSQL_USER usuariophp
4 ENV MYSQL_PASSWORD clavel23
5 EXPOSE 3306
```

**Figura 3. Contenido Dockerfile mysql**

Fuente: elaboración propia.

La instrucción “FROM” especifica la imagen que se desea descargar, en este caso se solicita la última versión de MySQL. La instrucción “ENV” permite inicializar una variable que puede estar definida dentro de la imagen, en este caso se inicializó la variable “MYSQL\_ROOT\_PASSWORD” con una contraseña de ejemplo. La instrucción “EXPOSE” permite definir el puerto sobre el cual los contenedores de esta imagen prestarán sus servicios.

7. Creación del contenedor Apache-PHP a partir de la imagen almacenada en el repositorio de la arquitectura. La plataforma desarrollada que soporta la arquitectura fue construida en el lenguaje de programación PHP.
8. En la Figura 4 se presenta la configuración del Dockerfile para el contenedor Apache-PHP.

```

1 FROM php:7.2-apache
2
3 RUN apt-get update && apt-get install -y wget zip unzip
4     libfreetype6-dev libzip-dev
5 RUN apt-get update && apt-get install -y zlib1g-dev
6 RUN apt-get install && docker-php-ext-configure zip
7     --with-libzip && docker-php-ext-install zip
8 RUN apt-get update && docker-php-ext-install pdo_mysql
9 ENV APACHE_RUN_USER www-data
10 ENV APACHE_RUN_GROUP www-data
11 ENV APACHE_LOG_DIR /var/log/apache2
12 ENV APACHE_PID_FILE /var/run/apache2/apache2.pid
13 ENV APACHE_RUN_DIR /var/run/apache2
14 ENV APACHE_LOCK_DIR /var/lock/apache2
15 EXPOSE 8086:80
16 CMD ["apache2-foreground"]

```

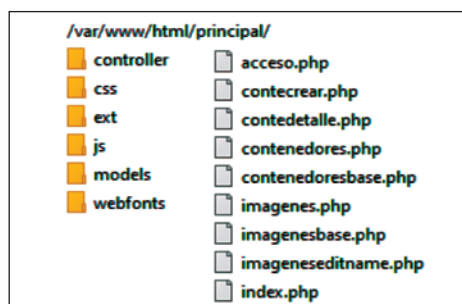
**Figura 4. Contenido Dockerfile PHP**

Fuente: elaboración propia.

La instrucción “FROM” especifica la imagen que se desea descargar, en este caso se solicita la versión 7.2 de PHP con Apache. Adicionalmente, se incluyen las instrucciones de descargar las librerías necesarias para descomprimir [28]. Posteriormente, se definen las variables básicas para la instalación del apache y se presenta el puerto que será expuesto a fin de consumir los servicios del contenedor.

### 4.3 Modelo vista controlador de la plataforma

La Figura 5 presenta la estructura de ficheros utilizada en el componente de administración de contenedores de la plataforma desarrollada.



**Figura 5. Modelo vista controlador del componente administrador**

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se describen tres ficheros de código que hacen parte de la plataforma desarrollada. La Figura 6 presenta el sistema de conexión de la base de datos a través de PDO [29].

```
<?php
ini_set('display_errors', 1);
ini_set('display_startup_errors', 1);
error_reporting(E_ALL);
$direccionIP = "192.168.43.204";

try {
    $usuario = "user_php";
    $clave = "clavel23";
    $conn = new PDO('mysql:host=localhost;dbname=bd_principal', $usuario,
        $clave);
} catch (PDOException $e) {
    print "<strong>Error:</strong><br />" . $e->getMessage();
    exit();
}
?>
```

**Figura 6. Contenido conexion.php**

Fuente: elaboración propia.

Como se describió, la arquitectura permite el uso de cualquier contenedor. En la plataforma desarrollada este proceso se automatiza mediante la ejecución de instrucciones parametrizadas que aíslan al usuario final de la problemática de instalación y configuración. La Figura 7 presenta las instrucciones que hacen parte de uno de los controladores para la creación de contenedores.

```
$comando = "docker run -d -p {$extra}:80 -v /home/osboxes/proyecto/sitioweb/"
. "{$carpeta}/:/var/www/html --name {$nombreContenedor} "
. "{$nombreImagen}:{$versionImagen}";
$ejecutar = shell_exec($comando);

$contenedores = shell_exec('docker ps -a --format "table{{.ID}}@{{.Names}}@
. '{{.Image}}@{{.RunningFor}}@{{.Status}}@{{.Ports}}"');
$arrContenedores = explode("\n", $contenedores);
$limite = count($arrContenedores) - 1;
```

**Figura 7. Contenido contecreacontroller.php**

Fuente: elaboración propia.

A fin de visualizar los contenedores se sigue el mismo principio: aislar la complejidad al usuario final y ejecutar instrucciones para presentar los resultados finales. La Figura 8 presenta las instrucciones utilizadas en el propósito de visualizar los contenedores en las vistas de usuario final.

```

<?php
$control = 0;
$arrIdImagen = [];
$contenedores = shell_exec('docker images --format "table{.ID}"
    . '@{.Repository})@{.Tag})@{.Digest})@{.CreatedSince})'
    . '@{.CreatedAt})');
$arrContenedores = explode("\n", $contenedores);
foreach ($arrContenedores as $indice => $fila) {
    $temporal = explode("@", $fila);
    $arrIdImagen[$control]["ID"] = $temporal[0];
    if (isset($temporal[4])){
        $arrIdImagen[$control]["CREADO"] = $temporal[4];
    }else{
        $arrIdImagen[$control]["CREADO"] = "";
    }
    $control++;
}

```

Figura 8. Contenido imágenes base.php

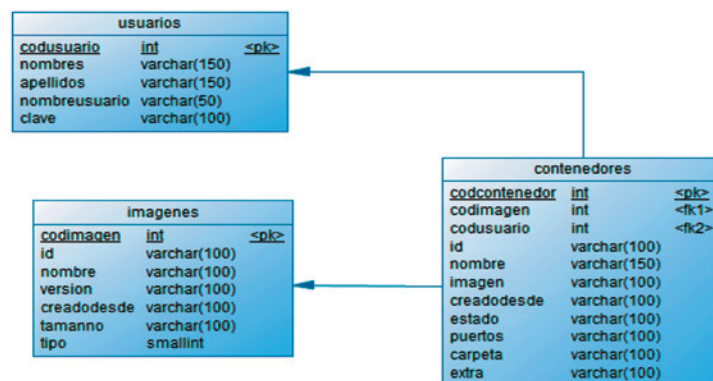
Fuente: elaboración propia.

La arquitectura propuesta fue verificada y validada por la plataforma desarrollada. A continuación, se presentan las funcionalidades de la plataforma, las cuales brindan una comprensión mayor de la arquitectura.

#### 4.2.2 Funcionalidades plataforma

La plataforma desarrollada para la gestión de los contenedores cuenta con un sistema de autenticación y autorización [30]. Por defecto, un usuario requiere un navegador para hacer uso de la plataforma, un usuario y una contraseña que le permiten acceder al componente que administra y gestiona los contenedores. Si el usuario desea crear un contenedor nuevo lo puede realizar a partir de una imagen descargada o, en su defecto, tener acceso a la lista de imágenes que le permitirán acceder a más contenedores sin tener conocimiento técnico de Docker.

La Figura 9 presenta el modelo de clases implementado en la autenticación, autorización, gestión de contenedores y descarga de imágenes.



### 9. Modelo de clases plataforma

Fuente: elaboración propia.

La clase usuarios representa los posibles desarrolladores que tendrán permisos para gestionar imágenes y contenedores en la plataforma desarrollada. La clase imágenes representa las imágenes almacenadas en la plataforma Docker, las cuales han sido descargadas con anterioridad del sitio oficial. La clase contenedores es una abstracción de los posibles contenedores que puede llegar a crear un usuario a través de la plataforma.

La plataforma desarrollada cuenta con las funcionalidades descritas en la Tabla 2.

**Tabla 2. Descripción de funcionalidades**

Código	Funcionalidad	Descripción
f01	Manejo de usuarios	Sistema dirigido a administrar la autorización y autenticación de usuarios. Utiliza funciones de tipo Hash para la seguridad de la información.
f02	Lista de imágenes	Permite el despliegue de las imágenes que la nueva plataforma puede llegar a gestionar.
f03	Edición/eliminación de imágenes	Este componente permite eliminar o agregar imágenes a la biblioteca base de la arquitectura propuesta.
f04	Creación de contenedores	Permite instanciar las imágenes que existen en la biblioteca, así como manejar instancias con el mismo nombre, dado que el componente de autorización permite el aislamiento de la data a cada uno de los perfiles de usuario.
f05	Listado de contenedores	Permite visualizar los contenedores desde dos vistas: modo administrador y modo cliente. Asimismo, la información de cada usuario en su espacio de trabajo.
f06	Iniciar/detener contenedor	Este disparador permite visualizar, iniciar o detener un contenedor que ha sido instanciado.
f07	Eliminar contenedor	Permite eliminar un contenedor de un usuario particular o, en su defecto, eliminar los contenedores de múltiples usuarios en modo administrador.
f08	Crear base de datos	Con el contenedor instanciado de una de las imágenes del repositorio el usuario puede crear bases de datos en cada uno de los contenedores que utilice.
f09	Interprete de código DDL	Este interprete se encarga de verificar la estructura de las sentencias de creación de tablas en un motor específico. El usuario puede crear tablas en una base de datos Postgres, MySQL o la que seleccione, sin necesidad de interactuar con el motor directamente.
f10	Ver tablas base de datos	Permite obtener un listado de las tablas de cualquier base de datos existente en cada uno de los contenedores.
f11	Subir sitio web	Permite integrar al contenedor web seleccionado, un sitio web externo, ya sea estático o dinámico. En el caso de los sitios web dinámicos permite la interconexión con otros contenedores que gestionen bases de datos.
f12	Desplegar sitio web	El despliegue del sitio se da por un puerto preconfigurado, sin embargo, esta configuración se puede cambiar por medio de un asistente.
f13	Interfaz web para la gestión de contenedores	Permite la administración de contenedores a través de un navegador web mediante el protocolo http.

Fuente: elaboración propia.

A fin de acceder a la plataforma un usuario debe tener credenciales de acceso (f01). La plataforma verifica las credenciales de un usuario, posteriormente, le permite visualizar las imágenes que tiene disponible para su uso, tal como se presenta en la Figura 10 (f02, f03, f05, f06, f07). En cada imagen brinda opciones para crear contenedores (f04) y ver detalles de las imágenes de acuerdo con la información suministrada por el Docker registry. Dependiendo de la imagen a utilizar, se presentan interfaces personalizadas, lo que permite la creación de contenedores con información mínima y sin conocimientos sobre los aspectos técnicos de la filosofía de contenedores.

The screenshot shows the UniNorte web interface. At the top, there is a navigation bar with 'Inicio', 'Imágenes', 'Contenedores', and 'Demos'. The user's name 'Laura Sofia Calle Perez' is visible in the top right. Below the navigation bar, the breadcrumb 'Imágenes / Listado' is shown. The main content area is titled 'Imágenes disponibles' and contains a table of available images:

Nombre imagen	Versión	Contenedores	Identificador	Creado hace	Tamaño	
php	7.2M	1	10059dda6b01	3 days ago	419MB	Q +
mysql	8.0	1	1e76b6617c57	3 days ago	443MB	Q +
hello-world	latest	0	fce289e99eb9	4 months ago	1.84kB	Q +

Below the table, the 'Imágen php:7.2M' is selected, and a form is shown for creating a container. The form has three input fields: 'Nombre contenedor:', 'Puerto del servicio:', and 'Carpeta html:'. Below the form are two buttons: 'Crear Registro' and 'Cancelar'. An arrow points to the 'Nombre contenedor:' field.

Below the form, the 'Contenedores de php:7.2M' section is shown, containing a table of created containers:

Nombre	Identificador	Puertos	Creado desde	Estado	
ContDaenerys	aa377b60ff2c	0.0.0.0:8089->80/tcp	41 hours ago	Up About a minute	↓ Q 🗑️

An arrow points to the 'ContDaenerys' container in the table.

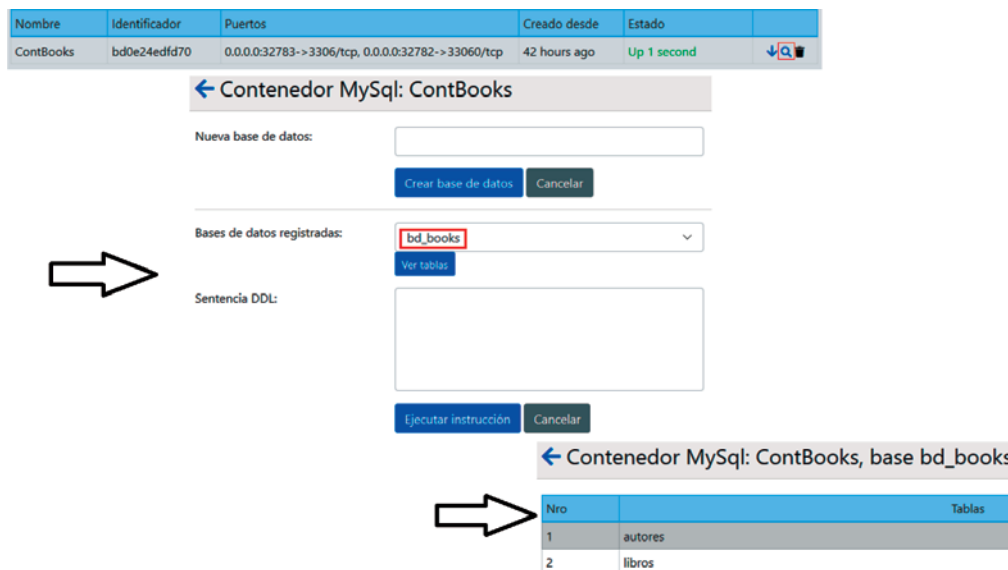
**Figura 10. Creación contenedores**

Fuente: elaboración propia.

La creación de un contenedor a través de la plataforma solicita tres valores: nombre del contenedor, puerto sobre el cual desea exponer los servicios y, por último, el nombre del espacio de nombres que el usuario desea manejar para el almacenamiento de sus archivos. Los contenedores creados son de propiedad del usuario en sesión, es decir, que al ingresar con otro usuario no aparecerán esos contenedores.

Como se describió, los contenedores tienen propietarios y estos usuarios pueden realizar múltiples funciones con sus contenedores. La plataforma provee opciones para iniciar o detener los servicios de los contenedores (f06).

La Figura 11 presenta la interfaz que permite manipular un contenedor de mysql. En cada contenedor se pueden crear bases de datos (f08). Para cada base de datos existe un intérprete (f09) que permite utilizar el lenguaje de definición de datos DDL.

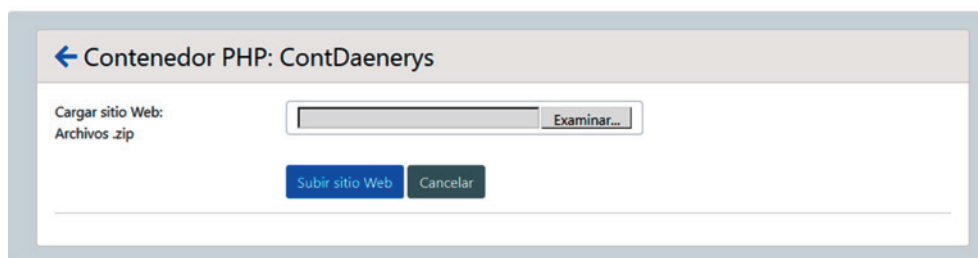


**Figura 11. Administración contenedor mysql**

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 11 se presenta la forma como se pueden visualizar las tablas de cada base de datos (f10).

La Figura 12 describe la interfaz para subir sitios web a un contenedor (f11, f12). Los archivos deben estar en formato zip.



**Figura 12. Formulario subir sitio**

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con [12], la plataforma web desarrollada (f13) cumple con el 65 % de los requerimientos funcionales que debería tener un sistema de administración de contenedores. El 35 % de los requerimientos no desarrollados están orientados hacia el balanceo de carga y la transferencia de contenedores entre diferentes *hosts*, sin embargo, ese 35 % no hace parte del alcance de la presente investigación.

## 5. LIMITACIONES

- La plataforma desarrollada requiere la implementación de funcionalidades adicionales, como, por ejemplo, la personalización de otros tipos de contenedores.
- Está orientado solo a contextos académicos en los que las personas están en proceso de aprendizaje para entornos web.
- La degradación de un contenedor afecta los demás contenedores, por tanto, se debe utilizar un sistema de balanceo a fin de que la plataforma detecte la falla y la corrija de manera automática, tal como lo realiza Kubernetes.
- La cantidad de contenedores y procesos que puede llegar a crear un usuario son ilimitados, por tanto, se debe gestionar una cuota para cada sesión de usuario.

## 6. CONCLUSIONES

- Docker no es una herramienta dirigida a orquestar contenedores, se utiliza para gestionarlos en un entorno particular. Es importante contar con una suite de administración de contenedores. Existen herramientas como Kubernetes, un orquestador de contenedores construido por Google que tiene por objeto crear aplicaciones distribuidas soportadas en contenedores. El uso y la administración de Kubernetes requiere de conocimiento técnico o personal con capacitación en el tema.
- Docker Swarm es otra herramienta para organizar clústeres de contenedores. La diferencia con Kubernetes radica en su enfoque: Swarm busca extender el uso de la API de Docker a fin de que todos los contenedores se vean como una sola unidad. Existen otras herramientas con fines similares, sin embargo, ninguna de ellas está enfocada en procesos de formación de profesionales.
- Docker permite extender su arquitectura mediante la adición de componentes, los cuales componentes pueden estar encapsulados en un *middleware*. A través del *middleware* se puede realizar la ejecución de código desde una interfaz web hasta el sistema operativo base que contiene el *host* Docker.
- El proceso de verificación y validación de la arquitectura se llevó a cabo con la implementación de la plataforma, teniendo un marco controlado de usuarios que permita garantizar la aplicación de todos los conceptos de la arquitectura.
- La arquitectura propuesta puede utilizarse en entornos de capacitación para formación de desarrolladores junior, puesto que permite encapsular la complejidad de Docker y, al mismo tiempo, utilizar la potencia de Docker.



**REFERENCIAS**

- [1] V. F. Martins, I. de Almeida Souza Concilio, y M. de Paiva Guimarães, “Problem based learning associated to the development of games for programming teaching”, *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 26, n.º 5, pp. 1577-1589, sep. 2018.
- [2] S. Popat and L. Starkey, “Learning to code or coding to learn? A systematic review”, *Comput. Educ.*, vol. 128, pp. 365-376, en. 2019.
- [3] S. Azmi, N. A. Iahad y N. Ahmad, “Attracting students’ engagement in programming courses with gamification”, in *2016 IEEE Conference on e-Learning, e-Management and e-Services (IC3e)*, 2016, pp. 112-115.
- [4] I. Hadar, “When intuition and logic clash: the case of the object-oriented paradigm”, *Sci. Comput. Program.*, vol. 78, n.º 9, pp. 1407-1426, sep. 2013.
- [5] F. Špaček, R. Sohlich y T. Dulík, “Docker as platform for assignments evaluation,” *Procedia Eng.*, vol. 100, pp. 1665–1671, en. 2015.
- [6] M. E. Ismail, N. Sa’adan, M. A. Samsudin, N. Hamzah, N. Razali y I. I. Mahazir, “Implementation of the gamification concept using Kahoot! among TVET students: an observation”, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1140, n.º 1, p. 012013, dic. 2018.
- [7] A. Draz, S. Abdennadher y Y. Abdelrahman, “Kodr: a customizable learning platform for computer science education,” En *DM Review*, vol. 2, pp. 579-582, sep. 201.
- [8] S. P. Sarkar, B. Sarker y S. K. A. Hossain, “Cross platform interactive programming learning environment for kids with edutainment and gamification”, En *2016 19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, 2016, pp. 218-222.
- [9] C. A. Guerrero Alarcon, L. E. Gutiérrez López y K. D. Cuervo Cely, “Los videojuegos como estrategia para incrementar la motivación y alcance de logros en procesos de aprendizaje,” En *Memorias la formación de ingenieros: un compromiso para el desarrollo y la sostenibilidad*, 2020.
- [10] H. Zhu y I. Bayley, “If Docker is the answer, what is the question?,” En *2018 IEEE Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE)*, 2018, pp. 152-163.
- [11] J. Cito, G. Schermann, J. E. Wittern, P. Leitner, S. Zumberi y H. C. Gall, “An empirical analysis of the Docker container ecosystem on gitHub,” in *2017 IEEE/ACM 14th International Conference on Mining Software Repositories (MSR)*, 2017, pp. 323-333.
- [12] R. Peinl, F. Holzschuher y F. Pfitzer, “Docker cluster management for the cloud-survey results and own solution”, *J. Grid Comput.*, vol. 14, n.º 2, pp. 265-282, jun. 2016.
- [13] R. Muddinagiri, S. Ambavane y S. Bayas, “Self-hosted Kubernetes: deploying Docker containers locally with Minikube,” En *2019 International Conference on Innovative Trends and Advances in Engineering and Technology (ICITAET)*, 2019, pp. 239-243.
- [14] R. Fernández, J. Soriano, X. Larrucea, A. L. Martínez y J. M. González-Barahona, “Towards the improvement of the software quality: an Enterprise 2.0 architecture for distributed software developments,” En *2008 First International Conference on Distributed Framework and Applications*, 2008, pp. 52-59.

- [15] Preeth E N, F. J. P. Mulerickal, B. Paul y Y. Sastri, "Evaluation of Docker containers based on hardware utilization," En *2015 International Conference on Control Communication & Computing India (ICCC)*, nov. 2015, pp. 697-700.
- [16] I. Docker, "Overview of Docker editions," 2019. [En línea]. Disponible en: <https://docs.docker.com/engine/docker-overview/>.
- [17] B. Kavitha y P. Varalakshmi, "Performance analysis of virtual machines and Docker containers," En *Communications in Computer and Information Science*, vol. 804, 2018, pp. 99-113.
- [18] S. Fu, J. Liu, X. Chu y Y. Hu, "Toward a Standard interface for cloud providers: the container as the narrow waist," *IEEE Internet Comput.*, vol. 20, n.º 2, pp. 66-71, mar. 2016.
- [19] T. L. F. Projects, "Open container initiative," 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.opencontainers.org/>.
- [20] R. Morabito, J. Kjallman y M. Komu, "Hypervisors vs. Lightweight virtualization: a performance comparison," En *2015 IEEE International Conference on Cloud Engineering*, 2015, pp. 386-393.
- [21] U. Batra y S. Mukharjee, "Enterprise application integration (middleware): Integrating stovepipe applications of varied enterprises in distributed middleware with service oriented architecture," En *2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, 2011, vol. 5, pp. 226-230.
- [22] Osboxes, "Ubuntu server," 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.osboxes.org/ubuntu-server/>
- [23] A. Singh, P. Chawla, K. Singh y A. K. Singh, "Formulating an MVC framework for web development in JAVA," En *2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 2018, Icoei, pp. 926-929.
- [24] C. A. Guerrero Alarcón, J. M. Suárez Pedrazay L. E. Gutiérrez López, "Patrones de diseño GOF (The Gang of Four) en el contexto de procesos de desarrollo de aplicaciones orientadas a la web", *Inf. tecnológica*, vol. 24, n.º 3, pp. 103-114, 2013.
- [25] R. Senington, B. Pataki y X. V. Wang, "Using docker for factory system software management: Experience report", *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 659-664, 2018.
- [26] Masgnulinux, "Distribuciones más estables: 5 versiones de GNU/Linux que recomendamos", 2018. [En línea]. Disponible en: <https://masgnulinux.es/distribuciones-mas-estables-5-versiones-de-gnu-linux-que-recomendamos/>.
- [27] J. Cito y H. C. Gall, "Using docker containers to improve reproducibility in software engineering research", En *Proceedings of the 38th International Conference on Software Engineering Companion-ICSE '16*, 2016, pp. 906-907.
- [28] R. Avellaneda, S. Cabrera, P. A. Martínez, y C. G. Donoso Albarracín, "Apoyo tecnológico para la fidelización y captación de nuevos clientes por medio de una aplicación móvil", *Inv. Inn. Ing.*, vol. 5, n.º 1, pp. 92-101, jul. 2017.
- [29] T. P. Group, "PHP.NET," 2019. [En línea]. Disponible en: <https://php.net/manual/es/intro.pdo.php>.
- [30] J. M. Suárez Pedraza y L. E. Gutiérrez López, "Tipificación de dominios de requerimientos para la aplicación de patrones arquitectónicos," *Inf. Tec.*, vol. 27, n.º 4, pp. 193-202, 2016.

# Eficiencia académica estudiantil: un enfoque de análisis de componentes principales y análisis envolvente de datos

## Student academic efficiency: a principal component analysis and data envelopment analysis approach

Rohemi Zuluaga<sup>1</sup>  
Enrique J. Delahoz-Domínguez<sup>2</sup>  
Hoolyana Ojeda<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.29.7433>

### RESUMEN

En el siguiente artículo se propone el uso de las herramientas de análisis de componentes principales (PCA) y análisis envolvente de datos (DEA) como una metodología para el análisis, la medición y la clasificación de la eficiencia académica de los estudiantes con los resultados de las pruebas Saber PRO en Colombia. La base de datos utilizada pertenece a los resultados de las pruebas Saber PRO del 2018, provenientes del Instituto Colombiano para la Evaluación de la Educación (Icfes). En los resultados se presenta que solo 16,67 % del grupo de estudio es eficiente; con estas unidades se forman quince grupos de referencia. Por otro lado, las unidades no eficientes deben reforzar las competencias de comunicación escrita (CE) y pensamiento científico, matemático y estadístico (PCME).

**Palabras clave:** Educación; Eficiencia; DEA; PCA.

### ABSTRACT

The following paper proposes the use of the Principal Component Analysis (PCA) and Data Envelopment Analysis (DEA) tools as a methodology for the analysis, measurement and classification of students' academic efficiency with the results of the Saber Pro test in Colombia. The database used belongs to the results of the Saber PRO test results of the year 2018 from the Colombian Institute for the Evaluation of Education (ICFES). The results show that only 16.67% of the study group are efficient. Within this group 15 units of reference were formed. On the other hand, the non-efficient units in the other group must reinforce the competences of Written Communication (EC) and Scientific, Mathematical and Statistical Thought (PCME).

**Keywords:** Education; Efficiency; DEA; PCA.



**Como citar este artículo:** A. Delgado Tobón y E. Rodríguez Carmona, Valoración de acetinas como reemplazo parcial de aceite nafténico en compuestos de caucho SBR15021, *ingeniare*, vol. 2, n.º 29, dic. 2020.

1. *Universidad Tecnológica de Bolívar, Facultad de Ingenierías, programa Ingeniería Industrial, Campus de Ternera, Cartagena, Colombia. Correo: rzuluaga@utb.edu.co*

2. *Universidad Tecnológica de Bolívar, Facultad de Ingenierías, programa Ingeniería Industrial, Campus de Ternera, Cartagena, Colombia. Correo: edelahoz@utb.edu.co*

3. *Punto Estratégico, Grupo de investigación Ingenio, Barranquilla, Colombia. Correo: hoolyana0623@gmail.com*

## 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia la educación se define como “un proceso permanente y continuo del ser humano, fundamentado en la concepción integral de la persona, su dignidad, sus derechos y deberes” [1].

La Constitución Política colombiana establece que la educación, primero, debe ser ofertada, garantizada y de calidad. Segundo, es un derecho de todo individuo y es un servicio público, por tanto, debe ser regulado y cumplir una función. Tercero, debe promover el desarrollo integral de cada uno de los individuos que la recibe. Finalmente, genera desarrollo económico, social y el capital humano del país.

El sistema educativo colombiano es conformado por la educación inicial, la educación preescolar, la educación básica, la educación media y la educación superior [1].

Se define la educación superior como el conjunto de procesos de aprendizaje que buscan la generación y el desarrollo de habilidades y conocimientos de los educandos de una manera integral [2]. La educación superior se recibe cuando se ha finalizado el ciclo de la educación media.

Globalmente, el reto de los gobiernos para el beneficio de los ciudadanos es lograr la calidad y la cobertura de la educación. No obstante, no solo es un tema que desea el Gobierno, sino que es un objetivo que exige la sociedad. En Colombia, por ejemplo, se presentaron en el 2011 al Ministerio de Educación Nacional (Mineducación) dos propuestas para cambiar el rumbo de la educación: la primera, llamada “Acuerdo por lo Superior 2034: propuesta de política pública para la excelencia de la educación superior en Colombia”, presentada por el Consejo Nacional de Educación Superior. La segunda, la propuesta denominada “Gran Acuerdo Nacional Por la Educación”, presentada por el movimiento Todos por la Educación [3].

La exigencia de la sociedad por la calidad y la cobertura de la educación apunta a una razón, y es que la educación —no solo en el caso de Colombia sino de cualquier país— es una inversión para nuestras sociedades.

Es correcto pensar que la inversión sugiere un contenido económico, pero en este caso queremos señalar el contenido social que representa realizar la inversión en la educación. Esto significa concebir la institución de educación superior (IES) como generadora y desarrolladora de la potencialidad humana necesaria para transformar y desarrollar la sociedad [4].

De acuerdo con todo lo mencionado, la medición de la eficiencia en instituciones de educación superior es esencial para la formulación de planes que busquen optimizar la utilización de recursos. Esto puede lograr el objetivo que tanto persigue la sociedad: la calidad y la cobertura de la educación. La educación se puede observar como cualquier otro sistema productivo al implementar sistemas de medición y control

(por ejemplo, indicadores cuantitativos) sobre los procesos que se realizan a diario en las IES, esto se convierte en una herramienta que permite generar oportunidades de mejora y la toma de decisiones [3].

Es por todo lo anterior que en este artículo se hace uso de las herramientas análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) y análisis envolvente de datos (DEA, por sus siglas en inglés) con el objetivo de proponer una metodología para el análisis, la medición y la clasificación de la eficiencia académica de los estudiantes. En este propósito se utilizan los resultados de las pruebas Saber PRO. Para que los resultados sean certeros se debe realizar una adecuada identificación de las unidades del modelo (entradas y salidas), con lo cual es posible asegurar una buena clasificación entre unidades eficientes e ineficientes, además de realizar buenas inferencias.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

Para aplicar correctamente la herramienta DEA, primero, se realiza un análisis exploratorio de datos utilizando el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés).

El PCA es un método que propone Harold Hotelling a principios del siglo XX, basado en los trabajos de Karl Pearson y las investigaciones sobre ajustes ortogonales por mínimos cuadrados [5] desde hace mucho tiempo se han desarrollado las técnicas multivariadas, pero sólo con la evolución de los computadores y diversos paquetes de software que procesan amplios conjuntos de datos ha llegado a ser notoria la potencia de la estadística multivariada. Se ha tomado como pretexto el problema del desplazamiento de personas del campo a la ciudad para consolidar el concepto y la aplicación de la técnica de componentes principales (ACP. Teniendo en cuenta las diversas definiciones que son utilizadas en la literatura, el PCA se puede definir como una técnica de análisis exploratorio de datos que, mediante el uso del análisis multivariado, el álgebra y la estadística, busca, a partir de una matriz de datos inicial, generar una nueva matriz de datos final con información resumida y estructurada [6]. El método consiste en seleccionar la información contenida en un conjunto de  $n$  variables de interés en  $m$  nuevas variables independientes; mediante la combinación lineal de las variables originales se otorga la posibilidad de resumir la información, es decir, absorber la mayor variabilidad de la información (variables) en componentes principales (combinación lineal de variables) que reducen la dimensión de la matriz. Sin embargo, a fin de que el método se aplique correctamente las variables introducidas no deben tener correlación entre ellas (escalar variables) y deben tener su variabilidad inicial completa (no tener modificaciones adicionales diferentes al primer inciso) [7].

Por otra parte, una duda de muchos investigadores es la selección de los componentes principales, para lo cual existen dos criterios de selección [8] from the analysis of meteorological fields to the evaluation of air quality monitoring networks (AQMN). El primer criterio, llamado "Kaiser", considera conservar los componentes principales con autovalores mayores a uno, aunque muchas veces este criterio puede ser muy restrictivo [9]. El segundo criterio se denomina "porcentaje de varianza acumulada (PVA)" y

busca retener las componentes principales cuyos porcentajes de varianza acumulada superen un valor determinado. En este último criterio el porcentaje dependerá del tipo de problema y el conocimiento que tenga el investigador sobre el tema. También algunos autores recomiendan establecer un valor de varianza acumulada en 90 % [10].

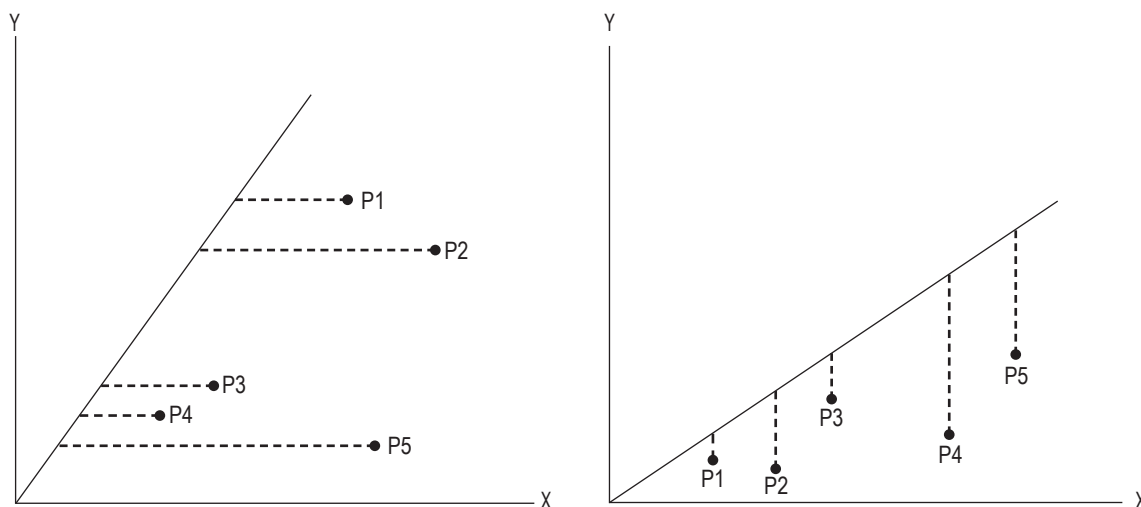
La segunda herramienta usada en este artículo es el análisis envolvente de datos (DEA). La herramienta DEA es una metodología no paramétrica basada en modelos de programación lineal propuesta en 1978 por Charnes, Cooper y Rhodes con el fin de estudiar la eficiencia relativa de una serie de unidades de decisión en la que existen múltiples entradas y salidas [11].

El problema que seleccionó Rhodes para usar DEA fue titulado como “Data envelopment analysis and approaches for measuring the efficiency of decision-education” [12]. Rhodes, con este problema, buscaba determinar la eficiencia relativa de varias instituciones de educación mediante el uso de diversas variables de entrada y salida. Esta primera respuesta se presenta como la primera formulación matemática de DEA, en su variante CCR [13].

DEA surge como una técnica para evaluar la eficiencia de un conjunto observado, denominado como unidades de toma de decisión (DMU corresponde a *decision making unit*). El modelo DEA relaciona, para cada DMU, una serie de entradas y salidas [14]. La premisa principal en la que se desarrolla DEA es que la eficiencia de una DMU se define como la habilidad en que esta DMU, a partir de una serie de entradas, puede transformarlas en salidas deseadas. Cabe resaltar que todas las entradas y salidas del modelo deben estar en una escala y unidad comparables [15] en este trabajo pretendemos dotar a los directivos de una herramienta que les permita establecer cuándo el tamaño de los equipos no es el adecuado, en qué casos no utilizan los recursos de una forma eficiente y cuáles son las recomendaciones sobre utilización de los recursos para mejorar la eficiencia de la organización. Los análisis se realizan utilizando dos modelos. En el primer modelo se analiza la eficiencia del conjunto de los equipos, mientras que en el segundo se separan los equipos rurales de los urbanos para que las organizaciones comparadas sean lo más homogéneas posibles y la información sea de más utilidad. Data Envelopment Analysis (DEA).

A fin de establecer el modelo usado en la metodología DEA se debe seguir los siguientes pasos [12]: 1) se debe estudiar nuestro problema y conocer su naturaleza; 2) identificar correctamente las entradas y salidas del modelo; 3) seleccionar el tipo de modelo DEA a implementar (CCR que alude a la eficiencia técnica o BCC que mide a la eficiencia global), el retorno de escala (CRS-Constante o VRS-Variable) y la orientación del modelo (entrada o salida). Este último paso depende del tipo de modelo seleccionado.

Una vez establecido el modelo se procede a resolver el modelo como un problema de programación lineal, en el cual la función objetivo debe maximizar el cociente de las salidas entre sus entradas. Además, como restricciones se tiene que la eficiencia no debe ser mayor a uno [16]. De acuerdo con lo anterior y con el fin de ilustrar los modelos CCR y BCC, se presentan la Figura 1 correspondiente.



**Figura 1. Comparación de los modelos CCR y BCC**

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 1 se muestra la comparación entre los modelos CCR y BCC. En este ejemplo la solución que ofrecen los dos modelos es la misma debido a que coinciden en la zona de frontera. La principal diferencia es que el modelo CCR busca calcular la eficiencia global, mientras el modelo BCC hace uso de la eficiencia técnica.

### 3. METODOLOGÍA

El conjunto de datos usado en este artículo pertenece a los resultados de las pruebas saber PRO del 2018. Estos datos los comparte al público investigador el Gobierno de Colombia en la página del Instituto Colombiano para la Evaluación de la Educación (Icfes).

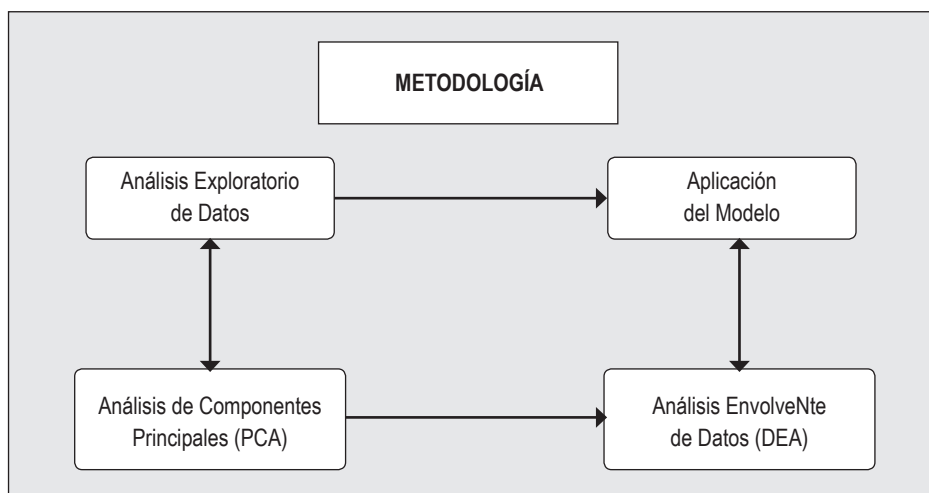
El conjunto de datos está compuesto por 106 columnas por observación (estudiante) que contienen la información personal y el resultado de las pruebas por estudiante. Para realizar este artículo se seleccionaron nueve variables que corresponden al resultado de las pruebas específicas, al resultado de las pruebas genéricas y a la modalidad de financiación de la carrera universitaria. Por otro lado, se seleccionan los resultados del 2018 de la carrera Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de Bolívar: en total son 114 observaciones [17].

El primer conjunto de variables que corresponde a las pruebas específicas de Ingeniería Industrial cuenta con tres áreas: formulación de proyectos de ingeniería (FPI), pensamiento matemático y estadístico (PCME), y diseño de procesos productivos y logísticos (DPL). El segundo conjunto de variables, que corresponde a las pruebas genéricas, cuenta con cinco áreas: comunicación escrita (CE), Inglés (IN), lectura crítica (LC), razonamiento cuantitativo (RC) y competencias ciudadanas (CC). La última variable



es la modalidad de financiación que tiene tres niveles: becado tiene un valor de cero (0), crédito tiene un valor asignado de uno (1) y cuenta propia que tiene un valor de dos (2).

A fin de realizar la medición de la eficiencia se sigue la metodología planteada en la Figura 2. Primero se realiza un análisis exploratorio de datos usando la herramienta PCA y luego se aplica la metodología DEA en la medición de la eficiencia de los resultados de las pruebas. Por otra parte, para la aplicación de las técnicas mostradas en la metodología se usa el *software* libre llamado R versión 3.6.1.



**Figura 2. Metodología implementada**

Fuente: elaboración propia.

#### 4. RESULTADOS

Como se mencionó, primero se realiza el análisis exploratorio de los datos con la herramienta PCA. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos al aplicar el análisis de componentes principales.

**Tabla 1. Componentes principales**

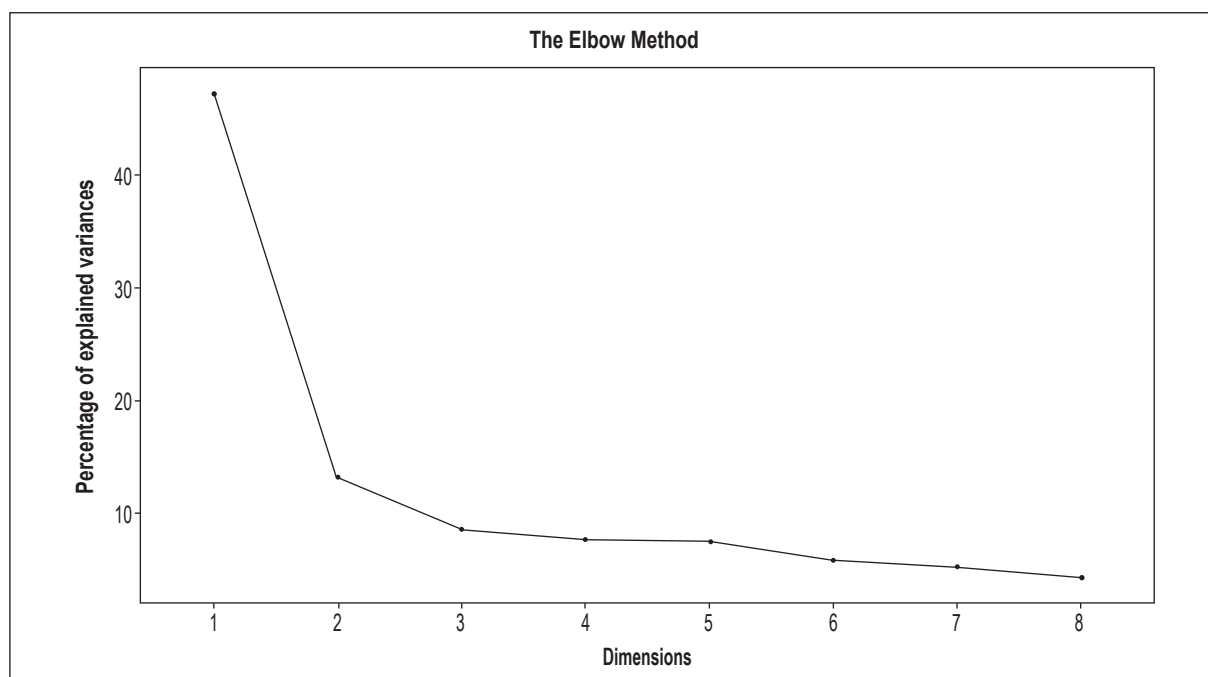
Componente	Autovalor	Porcentaje de varianza	Porcentaje de varianza acumulado
1	3,80	47,53	47,53
2	1,05	13,23	60,77
3	0,69	8,69	69,47
4	0,62	7,77	77,24
5	0,58	7,35	84,60
6	0,47	5,90	90,50
7	0,41	5,22	95,73
9	0,34	4,26	100,00

Fuente: elaboración propia.



La primera columna corresponde a las componentes (se tiene tantas componentes como variables), la segunda columna corresponde a los autovalores de cada componente, la tercera el porcentaje de la varianza de cada componente y la última corresponde al porcentaje de la varianza acumulada; la variable de modalidad de pago se tiene en cuenta para clasificar las observaciones, es decir, de carácter informativo.

Con el objetivo de complementar la Tabla 1 se presenta la gráfica del método Elbow (véase la Figura 3). Esta información se utiliza para seleccionar las componentes principales que explican la mayor variabilidad de la información.



**Figura 3. Método Elbow**

Fuente: elaboración propia.

Como se mencionó en el marco teórico, a fin de seleccionar el número de componentes principales se utilizan las técnicas Kaiser y Varianza acumulada; para efectos de este análisis adicionamos la gráfica Elbow que consiste en elegir el número de componentes cuando la gráfica toma la forma de un codo.

Con el criterio Kaiser las componentes seleccionadas son las componentes 1 y 2, debido a que sus autovalores tienen un valor mayor a uno. El criterio de varianza acumulada se fija con un valor de 70 % [9], entonces, para este criterio las componentes son 1, 2, 3 y 4. En el método Elbow las componentes seleccionadas son las componentes 1, 2 y 3. Para seleccionar el número de componentes principales en este artículo se selecciona el criterio de varianza acumulada y se eligen las componentes que explican, al menos, el 70 % de la información (en este caso son las componentes 1, 2, 3 y 4, las cuales explican el 77,24 % de la información).

Para entender mejor los resultados que brinda el PCA usaremos el gráfico Biplot (Figura 4) que es la representación simultánea entre la nube de puntos formados por las observaciones, las variables estudiadas y el plano formado por las dos primeras dimensiones.

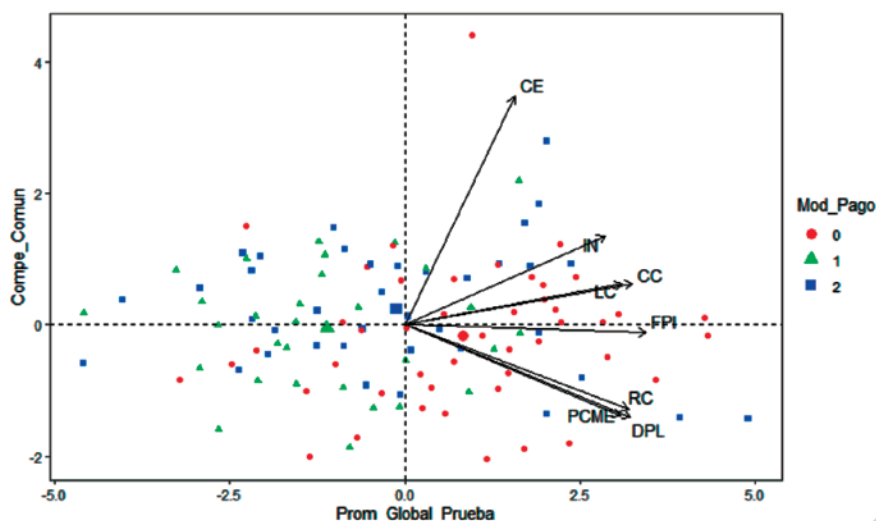
Las dimensiones que conforman el plano del gráfico Biplot se muestran en la Tabla 2. Esta tabla muestra la representación del resultado de la prueba sobre alguna dimensión valorada por un puntaje entre -1 y 1, donde -1 es una representación negativa, 0 es pobremente representado y 1 es una representación positiva. Por otro lado, se gráfica las dos primeras dimensiones debido a que tienen los valores de representación más altos.

En este artículo se consideran como nombre de las dimensiones 1 y 2, Prom\_Global\_Prueba y Compe\_Comun, respectivamente.

**Tabla 2. Dimensiones**

Prueba	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5	Dim.6	Dim.7	Dim.8
RC	0,730	-0,295	-0,112	0,229	0,442	-0,005	0,118	-0,325
LC	0,711	0,142	-0,387	-0,359	0,171	0,372	0,026	0,168
CC	0,743	0,145	-0,140	-0,327	-0,281	-0,371	0,254	-0,137
IN	0,654	0,310	-0,379	0,502	-0,146	-0,126	-0,158	0,138
CE	0,358	0,795	0,424	0,056	0,212	0,040	0,105	-0,012
DPL	0,736	-0,320	0,263	-0,108	0,256	-0,296	-0,141	0,319
FPI	0,787	-0,027	0,215	-0,124	-0,234	0,145	-0,433	-0,232
PCME	0,704	-0,316	0,275	0,227	-0,312	0,266	0,308	0,118

Fuente: elaboración propia.



**Figura 4. PCA**

Fuente: elaboración propia.

Cabe resaltar que esto es un análisis de carácter comparativo entre las observaciones, no evaluativo. Las observaciones pueden ser buenas o malas pero este análisis determina únicamente las diferencias entre las observaciones. Por otra parte, en el gráfico Biplot no se busca proximidad entre observación y variables, lo importante son las direcciones.

En el primer cuadrante tenemos que , luego se caracteriza por tener buen puntaje en CE, IN, CC, LC, FPI, RC, PCME y DPL; además, , por tanto, se caracteriza por tener buen puntaje en CE, IN, CC y LC.

De la información de las variables y el gráfico Biplot se puede decir que los mejores puntajes los tienen los estudiantes becados y quienes pagan por su cuenta; sin embargo, los becados tienen una mayor concentración del lado derecho del gráfico que es la dirección con la que crecen las variables. En la Tabla 3 se presenta el conteo de los niveles de la variable modalidad de pago por cuadrante, y son los cuadrantes 1 y 4 aquellos que tienen la dirección positiva de las variables.

**Tabla 3. Conteo de observaciones por cuadrante**

Tipo de pago	Total			
	Cuadrante 1	Cuadrante 2	Cuadrante 3	Cuadrante 4
0	15	5	9	17
1	3	12	11	4
2	9	12	9	8

Fuente: elaboración propia.

El conteo confirma lo observado en la gráfica Biplot: los estudiantes becados (0) son los que poseen mejores resultados en las pruebas.

Realizado el análisis y entendido los datos, se procede a realizar la aplicación de la herramienta DEA. Para la aplicación del modelo DEA se usa el modelo CCR orientado a las entradas. De acuerdo con esto tenemos lo siguiente:

$$\max_{u, v} h_o = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{ro}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{io}} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, j = 1, \dots, n \quad (2)$$

Donde,

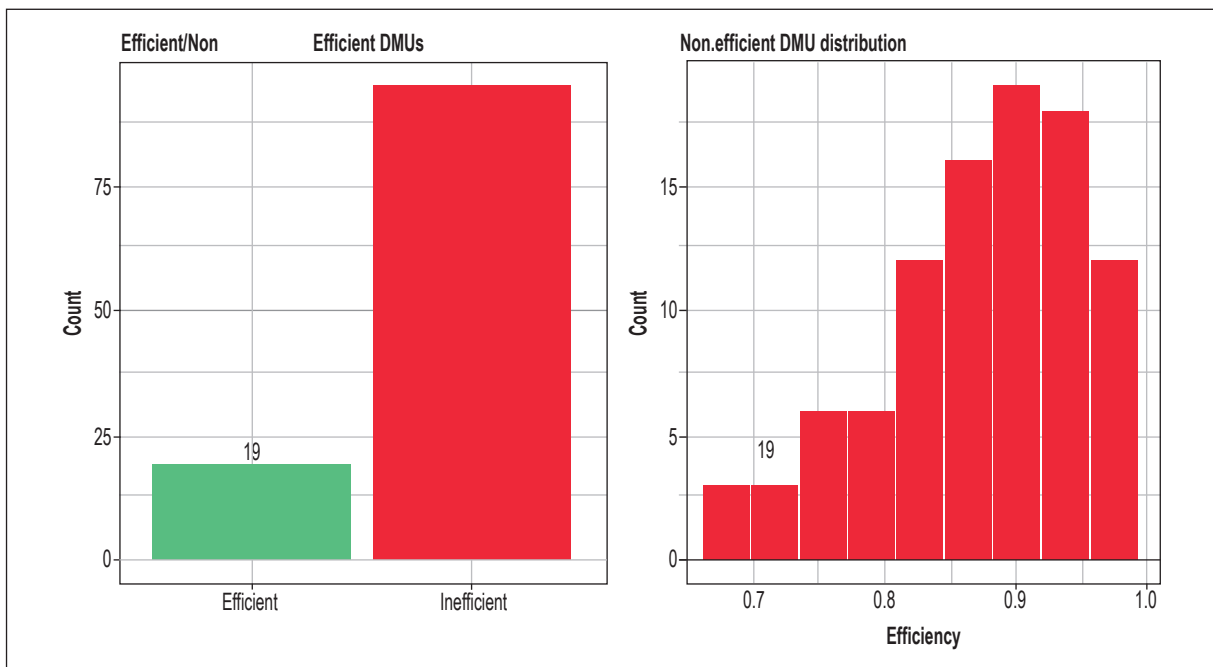
$n$ : cantidad de DMU del conjunto de datos.

$x_{ij}$ : cantidad de entrada  $i$  consumido por la  $j$ -ésima DMU.

- $x_{io}$ : cantidad de entrada  $i$  consumida por la DMU  $o$ .  
 $y_{rj}$ : cantidad observada de salidas  $r$  producida por la  $j$ -ésima DMU.  
 $y_{ro}$ : cantidad observada de la salida  $r$  producida por la DMU  $o$ .  
 $u_r$ : ponderación asignada por el modelo de la salida virtual  $r$ .  
 $v_i$ : ponderación asignada por el modelo de la entrada virtual  $i$ .

La ecuación (1) corresponde a la función objetivo del modelo de optimización de la herramienta DEA y la ecuación (2) a la restricción de la eficiencia.

Las entradas del modelo son los resultados de las pruebas genéricas y las salidas corresponden a los resultados de las pruebas específicas. De acuerdo con lo anterior se obtienen los resultados que se expresan la Figura 5.



**Figura 5. Unidades eficientes e ineficientes**

Fuente: elaboración propia.

Se observa en los gráficos de la Figura 5 que de 114 *decision making units* (DMU) solo 19 son eficientes y 95 DMU son ineficientes. A modo de ejemplo se presentan algunas DMU eficientes y otras ineficientes.

**Tabla 4. DMU eficientes y DMU ineficientes**

DMU	Eficiencia	Tipo Pago	RC	LC	CC	IN	CE	DPL	FPI	PCME
U30	1	0	160	185	97	177	172	150	183	155
U34	1	0	124	129	116	189	111	138	140	119
U44	1	0	162	137	87	130	122	152	162	155
U101	0,99	2	185	161	174	186	130	185	191	160
U10	0,98	0	203	196	182	141	126	182	163	155
U68	0,98	2	181	160	155	161	179	126	194	117

Fuente: elaboración propia.

Ahora se procede a calcular el conjunto de referencia. Algunas DMU son más importantes en el momento de evaluar DMU ineficientes. Esto se evidencia en la Tabla 5; por ejemplo, las DMU de esta tabla, a excepción de la DMU U73, se usan como referencias varias veces, mientras que la U73 no se usa como referencia de alguna otra DMU, aunque es declarada como eficiente. Esto es un criterio para la clasificación de DMU eficientes y brinda una mejor posición a aquellas DMU que aparecen más veces en la evaluación de las demás.

Como se mencionó, el número de veces que una DMU eficiente aparece como referencia de una DMU ineficiente puede servir como herramienta de clasificación. En la Tabla 5 se presenta la clasificación por grupo de las DMU eficientes, en la que el grupo 1 es el que tiene las DMU más eficientes y, a medida que sube el número del grupo, aumenta y será menos eficiente que las primeras.

**Tabla 5. Clasificación de las DMU**

DMU	Número de veces que aparece como referencia	Grupo de clasificación
U44	63	1
U88	45	2
U2	40	3
U86	36	4
U107	34	5
U79	34	5
U60	31	6
U93	31	6
U28	19	7
U67	14	8
U75	13	9
U76	11	10
U51	9	11

DMU	Número de veces que aparece como referencia	Grupo de clasificación
U98	9	11
U87	8	12
U30	6	13
U34	6	13
U65	5	14
U73	0	15

Fuente: elaboración propia.

Luego del análisis de los resultados del modelo DEA se procede a observar el comportamiento de las DMU ineficientes. A manera de ejemplo se presenta en la Tabla 6 los resultados de las pruebas de las DMU y en la Tabla 7 los objetivos que deben alcanzar para ser eficientes.

**Tabla 6. Puntaje de las DMU**

DMU	Eficiencia	Tipo Pago	RC	LC	CC	IN	CE	DPL	FPI	PCME
U3	0,97	2	158	122	92	161	129	154	136	101
U5	0,86	0	186	186	180	201	183	178	185	139

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 7. Holgura de las variables**

DMU	S-RC	S-LC	S-CC	S-IN	S-CE	S-DPL	S-FPI	S-PCME
U3	0	0	0	23,83	0	0	15,04	36,17
U5	0	0	0	0	0	0	0	14,38

Fuente: elaboración propia.

La DMU U3 tiene una eficiencia del 97 %, aproximadamente. De acuerdo con la tabla de holgura (Slack-S), debería enfocarse en estudiar FPI y PCME, y de acuerdo con la interpretación de las holguras, es lo que puede disminuir (entradas) o aumentar (salidas) para llegar a la eficiencia. En este contexto, las DMU U3 debería “disminuir” su puntaje de inglés en 23,83 puntos, lo cual indica que tiene un puntaje superior a lo que necesita para ser eficiente (es decir, tiene buen puntaje en las entradas o competencias específicas). No obstante, sus competencias específicas FPI y PCME tienen un puntaje bajo y deben aumentar 15,04 y 36,17 puntos, respectivamente, para llegar a ser una DMU eficiente. En el caso de la DMU 5 tiene una eficiencia de 86 % y las holguras de las entradas están en cero, lo cual indica que tiene un puntaje en las competencias genéricas bueno, sin embargo, la competencia específica PCME debe reforzarse para subir 14,38 puntos y ser una DMU eficiente.

## 5. CONCLUSIÓN

En este artículo se presenta la herramienta DEA como una herramienta para la medición de la eficiencia del resultado de una prueba académica, así como con miras a la clasificación de observaciones (estudiantes) eficientes [18]. También se presenta la técnica PCA como herramienta para el análisis exploratorio de datos y determinar las componentes principales que reducen la dimensión del problema y agilizan el modelo. Estas dos herramientas generan una metodología robusta y sencilla que permite analizar, clasificar e interpretar los resultados de cualquier prueba académica, en este caso la prueba de estados Saber PRO del 2018. De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio se concluyen los siguientes puntos.

1. La utilización del DEA como herramienta para la medición de la eficiencia de los estudiantes de la universidad ha permitido establecer una hipótesis según la cual la mayor cantidad de estudiantes con puntajes eficientes son becados, le siguen las personas que pagan por cuenta propia y, finalmente, las personas con crédito.
2. Con respecto a las holguras en las entradas, se debe a que el estudiante tiene buenas bases en las competencias genéricas, sin embargo, aplicarlas en su contexto profesional se les dificulta (lo que se evidencia en la Tabla 7), por lo que hay estudiantes que necesitan aumentar solo los puntajes en sus competencias específicas.
3. De acuerdo con el PCA, los estudiantes deben enfocar sus esfuerzos en fortalecer las competencias de comunicación escrita (CE) y pensamiento científico, matemático y estadístico (PCME).

En cuanto a las oportunidades para futuros trabajos e investigaciones, DEA se puede usar en la clasificación de grupos eficientes y como indicador de gestión educativa. Esto puede ser útil en la predicción del puntaje de alguna prueba que tenga como entrada los grupos de clasificación existentes. Además, finalmente, la comprobación de la hipótesis planteada en el inciso 1 de la conclusión.

## REFERENCIAS

- [1] Mineducación, “Art 1, Ley 115 de 1994”, 1994. [https://leyes.co/se\\_expide\\_la\\_ley\\_general\\_de\\_educacion/1o.htm](https://leyes.co/se_expide_la_ley_general_de_educacion/1o.htm) (consultado sep. 11, 2019).
- [2] Congreso de Colombia, “Ley 30 de 1992”, 1992. [http://www.legal.unal.edu.co/rlunal/home/doc.jsp?d\\_i=34632](http://www.legal.unal.edu.co/rlunal/home/doc.jsp?d_i=34632) (consultado sep. 11, 2019).
- [3] O. Buitrago, A. Espitia, y L. Molano, “Análisis envolvente de datos para la medición de la eficiencia en instituciones de educación superior: una revisión del estado del arte”, *Rev. Científica Gen. José María Córdova*, vol. 15, n.º 19, pp. 147-173, jun. 2017, doi: 10.21830/19006586.84.
- [4] J. Vela Valdés, “Educación superior: inversión para el futuro\*”, *Educ. Médica Super.*, vol. 14, n.º 2, pp. 171-183, ago. 2000.

- [5] Á. León, H. Llinás y J. Tilano, "Análisis multivariado aplicando componentes principales al caso de los desplazados", *Rev. Científica Ing. Desarro.*, vol. 23, n.º 23, pp. 119-142-142, jul. 2011.
- [6] D. Peña, "Análisis de datos multivariantes", p. 515, 2002.
- [7] C. Lozares y P. López, "El análisis de componentes principales: aplicación al análisis de datos secundarios", *Pap. Rev. Sociol.*, vol. 37, n.º 0, pp. 31-63, jul. 1991, doi: 10.5565/rev/papers/v37n0.1595.
- [8] J. M. Polanco Martínez, "El papel del análisis por componentes principales en la evaluación de redes de control de la calidad del aire", *Comun. En Estad.*, vol. 9, n.º 2, p. 271, sep. 2016, doi: 10.15332/s2027-3355.2016.0002.06.
- [9] E. R. Pérez y L. A. Medrano, "Análisis factorial exploratorio: Bases conceptuales y metodológicas", *Rev. Argent. Cienc. Comport. RACC*, vol. 2, n.º 1, pp. 58-66, 2010.
- [10] J. C. M. Pires, M. C. Pereira, M. C. M. Alvim-Ferraz, y F. G. Martins, "Identification of redundant air quality measurements through the use of principal component analysis", *Atmos. Environ.*, vol. 43, n.º 25, pp. 3837-3842, ago. 2009, doi: 10.1016/j.atmosenv.2009.05.013.
- [11] J. Pino, F. Solís, M. Delgado, y R. el C. Barea, "Evaluación de la eficiencia de grupos de investigación mediante análisis envolvente de datos (DEA)", 2010, doi: 10.3145/epi.2010.mar.06
- [12] J. Perdomo y J. Mendieta, "Factores que afectan la eficiencia técnica y asignativa en el sector cafetero colombiano: una aplicación con análisis envolvente de datos\*", *Rev. Desarro. Soc.*, jun. 2017, doi: 10.13043/dys.60.1.
- [13] J. Ferrera, F. Pedraja-Chaparro, y J. Salinas-Jimenez, "Measuring Efficiency in Education: An Analysis of Different Approaches for Incorporating Non-discretionary Inputs", *Appl. Econ.*, vol. 40, pp. 1323-1339, feb. 2008, doi: 10.1080/00036840600771346.
- [14] J. Ligarda y M. Ñaccha, "La eficiencia de las organizaciones de salud a través del análisis envolvente de datos: Microrredes de la Dirección de Salud IV Lima Este 2003", *An. Fac. Med.*, vol. 67, n.º 2, pp. 142-151, jun. 2006.
- [15] S. G. Legaz, "El análisis envolvente de datos como sistema de evaluación de la eficiencia técnica de las organizaciones del sector público: aplicación en los equipos de atención primaria", *Rev. Esp. Financ. Contab.*, vol. 27, n.º 97, pp. 979-1004, 1998.
- [16] T. Fontalvo, E. De La Hoz, E. De La Hoz, T. Fontalvo, E. De La Hoz, y E. De La Hoz, "Método Análisis Envolvente de Datos y Redes Neuronales en la Evaluación y Predicción de la Eficiencia Técnica de Pequeñas Empresas Exportadoras", *Inf. Tecnológica*, vol. 29, n.º 6, pp. 267-276, dic. 2018, doi: 10.4067/S0718-07642018000600267
- [17] E. Delahoz-Dominguez, R. Zuluaga y T. Fontalvo-Herrera, "Dataset of academic performance evolution for engineering students", *Data Brief*, vol. 30, p. 105537, jun. 2020, doi: 10.1016/j.dib.2020.105537.
- [18] J. A. Calderón Velasco, G. A. Amarillo Cárdenas, L. A. Silva Bahamon, y C. G. Donoso Albarracín, "Biometría dactilar: una nueva alternativa de controlar efectivamente la asistencia a clases", *Inv. Inn. Ing.*, vol. 6, n.º 1, pp. 27-39, ene. 2018.



# Análisis de curvas de Covid-19 en Colombia utilizando ajuste por mínimos cuadrados

## Analysis of Covid-19 curves in Colombia using least squares adjustment Julián

Luis Eduardo Ramírez Carvajal<sup>1</sup>

Karla Cecilia Puerto López<sup>2</sup>

Germán Luciano López Barrera<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.29.7434>

### RESUMEN

Este artículo presenta un análisis de curvas de Covid-19 en Colombia utilizando ajuste por mínimos cuadrados. Tomados los datos de contagios, recuperados y fallecidos de Covid-19 en Colombia, entre marzo y abril, se realizó un modelamiento. Mediante la suma de los datos de mayo, junio y julio se llevó a cabo un segundo modelamiento. También se realizaron predicciones que fueron comparadas con los datos reales de la pandemia a fin de validar el pronóstico. Finalmente, se realizó un tercer modelamiento sumando los datos del mes de agosto y se realizaron predicciones para septiembre. Los coeficientes de determinación de los primeros dos modelamientos estuvieron en un rango entre 0,7124 y 0,9985, y en el tercer modelamiento entre 0,9524 y 0,9955. Finalmente, se concluye que el Covid-19 en Colombia ha seguido los pronósticos establecidos por los modelos más acertados de este estudio con errores inferiores al 7 %; de seguir así, se espera una mitigación de la pandemia para inicios de septiembre, pero un aumento de contagios para finales del mismo mes. Se recomienda guardar los protocolos de bioseguridad establecidos por el Gobierno y reforzar las medidas de prevención en caso de presenciar el inicio de este aumento a mediados de septiembre.

**Palabras claves:** Análisis; Ajuste de curvas; Modelamiento; Covid-19; Mínimos cuadrados.

### ABSTRACT

This paper presents a curve analysis of Covid-19 in Colombia using least squares fitting. Data on Covid-19 infections, recoveries and deaths in Colombia between March and April were modeled. Adding the data from May, June and July, a second modeling was performed. Predictions were made and compared with actual pandemic data to validate the forecast. Finally, a third modeling was performed, summing the data for the month of August, and predictions were made for September. The coefficients of determination for the first two modelings ranged between 0.7124 and 0.9985, and for the third modeling between 0.9524 and 0.9955. Finally, it is concluded that Covid-19 in Colombia has followed the forecasts established by the most accurate models of this study with errors lower than 7%; if this continues, a mitigation of the pandemic is expected by the beginning of September, but an increase in infections by the end of September. It is recommended to follow the biosecurity protocols established by the government and to resume mandatory isolation in case of witnessing the beginning of the increase in mid-September.

**Keywords:** Analysis; Curve fitting; Modeling; C-19; Least squares.



**Como citar este artículo:** J. Santoyo Díaz y K. Serrano Medina, Análisis de curvas de Covid-19 en Colombia utilizando ajuste por mínimos cuadrados, *ingeniare*, vol. 2, n.º 29, dic. 2020.

1. Ingeniero Electrónico. Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia, Correo: [luiseduardorc@ufps.edu.co](mailto:luiseduardorc@ufps.edu.co)

2. Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones, Orcid: 0000-0003-3749-676X, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia, Correo: [karfaceciliapl@ufps.edu.co](mailto:karfaceciliapl@ufps.edu.co)

3. Maestría en ciencias en biotecnología genómica, Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde el momento en el que la Organización Mundial de la Salud declaró la pandemia generada por el Covid-19 como una emergencia de salud pública de carácter internacional [1], diversos investigadores [2], [3], [4] y [5] enfocaron su atención en el análisis de la pandemia desde un punto de vista matemático y estadístico. La estadística ha sido muy importante en la historia de la humanidad. Así, por ejemplo, científicos como Rudolf Clausius, James Clerk Maxwell y, de manera muy especial, Ludwig Boltzmann, realizaron sus aportes en el siglo XIX [6]. Estos aportes, junto con los de otros científicos, han sido la base teórica para llevar a cabo diversas investigaciones, como las hechas por Flórez y Laguado [7] en dinámica de fluidos computacional, la de Plaza [8] en el modelado de fenómenos físicos y naturales, o la de Vera, Delgado y Sepúlveda [9] en el modelado matemático de un panel solar.

Utilizar ajuste de curvas por mínimos cuadrados es un método de modelado no lineal [10]. Desarrollar este método de manera computacional es acertado, ya que las herramientas tecnológicas han sido fundamentales en el avance de la ciencia en diferentes áreas del conocimiento tales como la electrónica [11], la visión artificial [12], la termodinámica [13] o, incluso, en contextos educativos [14], [15] y [16]. Lo anterior si se tiene en cuenta que estas permiten en poco tiempo efectuar comparaciones que llevan a la correcta elección de un modelo adecuado que describa los datos, así como nos proporciona elementos de juicio suficientes para la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre [17].

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Se consultaron fuentes sobre estadística [18], [19] y métodos numéricos [10] con el propósito de establecer los modelos adecuados para describir las curvas de la pandemia (contagios, recuperados y fallecidos por día) y realizar un pronóstico utilizando ajuste de curvas, ya que este método ha demostrado ser relevante en el estudio de la pandemia [3].

### 2.1 Modelo matemático

Un modelo matemático es una expresión que describe las características esenciales de un sistema físico o de un proceso. Por lo general, se representa mediante una función de la forma: variable dependiente =  $f$  (variables independientes, parámetros, funciones de fuerza).

Los modelos utilizados en la investigación se observan en la Tabla 1. Estos describen el comportamiento de la pandemia teniendo en cuenta que en otros países donde se presentaron los efectos del Covid primero que en Colombia esta ha demostrado ser una curva ascendente en el comienzo con un comportamiento exponencial y, al presentar un pico, desciende de la misma forma [4].

**Tabla 1. Modelos matemáticos usados en la investigación**

Modelo	Expresión matemática
Exponencial	$f(x) = ae^{bx} + be^{dx} + c$
Polinómico	$f(x) = P_1x^n + \dots + P_3x^2 + P_4x + P_5$
Potencial	$f(x) = ax^b + c$
Gaussiano	$f(x) = a_1e^{\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2e^{\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2} + \dots + a_n e^{\left(\frac{x-b_n}{c_n}\right)^2}$

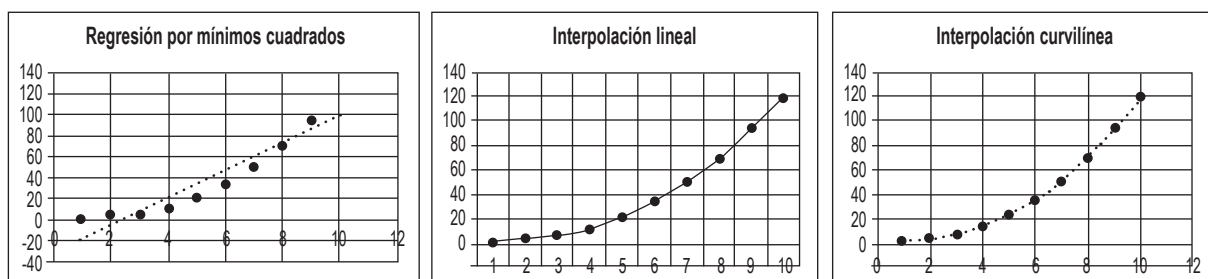
Fuente: elaboración propia.

### 2.2 Ajuste de curvas

El modelamiento matemático consiste en tomar una serie de datos de un sistema, fenómeno físico o proceso y ajustar una curva (exponencial, gaussiana, logarítmica, etc.) que describa dicho comportamiento de manera aproximada. Es común que los datos se den como valores discretos a lo largo de un continuo. Sin embargo, quizá se requiera la estimación de un punto entre valores discretos. Una manera de hacerlo es calcular valores de la función en un número discreto de valores en el intervalo de interés. Después, se obtiene una función más simple para ajustar dichos valores. Estas dos aplicaciones se conocen como ajuste de curvas.

Existen dos métodos generales para el ajuste de curvas que se distinguen entre sí al considerar la cantidad de error asociado con los datos. Primero, si los datos exhiben un grado significativo de error o “ruido”, la estrategia será obtener una sola curva que represente la tendencia general de los datos. Dado que cualquier dato individual puede ser incorrecto, no se busca intersecar todos los puntos. En lugar de esto, se construye una curva que siga la tendencia de los puntos tomados como un grupo. Un procedimiento de este tipo se denomina “regresión por mínimos cuadrados”.

En la Figura 1 se pueden observar tres diferentes ajustes de curva a 10 puntos.



**Figura 1. Tres tipos de ajuste de curva**

Fuente: elaboración propia.

### 2.3 Coeficiente de determinación

Se conoce como coeficiente de determinación  $r$  cuadrado ( $r^2$ ). Es una proporción que evidencia **la exactitud del ajuste de un modelo a la variable que pretende explicar**. Varía entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo y cuanto más cerca de cero menos ajustado estará el modelo y menos acertado será.

El  $r$  cuadrado ajustado (o coeficiente de determinación ajustado) se utiliza para evidenciar el nivel de efectividad que tienen las variables independientes al explicar la variable dependiente. Este coeficiente nos dice qué porcentaje de variación de la variable dependiente es explicado colectivamente por todas las variables independientes.

Se usa porque al añadir variables a una regresión el coeficiente de determinación sin ajustar tiende a aumentar, aunque la contribución de cada una de las nuevas variables añadidas no tenga relevancia estadística y se puede sobreestimar el modelo [20].

## 3. METODOLOGÍA

En la Figura 2 se puede observar la metodología descriptiva y aplicada utilizada en la investigación.



**Figura 2. Metodología utilizada en la investigación**

Fuente: elaboración propia.

Los datos fueron tomados del sitio web oficial del Instituto Nacional de Salud [21], con los cuales se realizaron tres modelamientos.

### 3.1 Modelos marzo-abril

Se realizaron cuatro modelos de contagios, cuatro modelos de recuperados y cuatro modelos de fallecidos de los meses de marzo y abril. Asimismo, se ajustaron curvas de pronóstico para predecir el comportamiento del Covid-19 en mayo y se compararon los resultados con el comportamiento real de la pandemia.

### 3.2 Modelos marzo-julio

Se realizaron cuatro modelos de contagios, cuatro modelos de recuperados y cuatro modelos de fallecidos de los meses de marzo a julio y se ajustaron curvas de pronóstico para predecir el comportamiento del Covid-19 en agosto, así como se compararon los resultados con el comportamiento real de la pandemia.

### 3.3 Modelos marzo-agosto

Finalmente, se realizaron dos modelos gaussianos con los datos de marzo a agosto teniendo en cuenta que el Gobierno colombiano inició una etapa de aislamiento preventivo [21]. Un modelo pronostica aumento de contagios y el otro mitigación. Se ajustaron curvas de pronóstico y se realizaron predicciones para septiembre.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se observan los coeficientes de determinación  $r^2$  ajustado de los modelos exponencial, polinómico, potencial y gaussiano para contagios (Con), recuperados (Rec) y fallecidos (Fall) de los primeros dos modelamientos.

**Tabla 2. Coeficientes de determinación marzo-abril y marzo-julio**

Modelos	Modelos marzo-abril			Modelos marzo-julio		
	R <sup>2</sup> Con	R <sup>2</sup> Rec	R <sup>2</sup> Fall	R <sup>2</sup> Con	R <sup>2</sup> Rec	R <sup>2</sup> Fall
Exponencial	0,7534	0,8260	0,7124	0,9655	0,9985	0,9892
Polinómico	0,7875	0,8753	0,7495	0,9644	0,9353	0,9895
Potencial	0,7815	0,8769	0,7505	0,9655	0,9350	0,9883
Gaussiano	0,8487	0,8943	0,8396	0,9804	0,9866	0,9902

Fuente: elaboración propia.

Cómo se observa en la Tabla 2, el modelo que mejor se ajustó, de acuerdo con el  $r$  cuadrado ajustado, fue el gaussiano. Para este modelo se obtuvieron los resultados que se observan en la Tabla 3.

**Tabla 3. Resultados de modelos mejor ajustados de marzo a abril y marzo a julio**

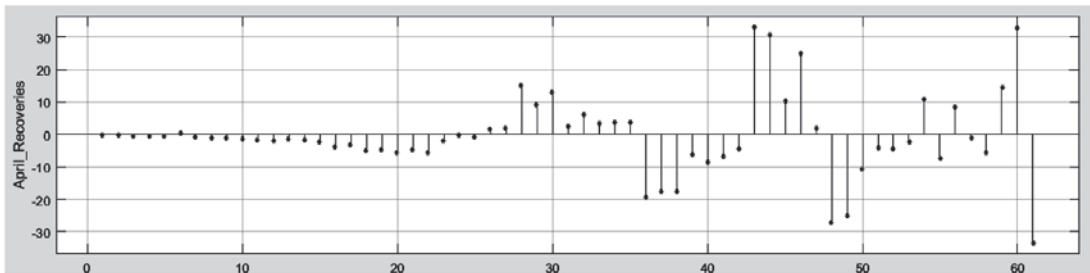
Modelos gaussianos	Modelos marzo-abril			Modelos marzo-julio		
	Con	Rec	Fall	Con	Rec	Fall
r <sup>2</sup>	0,8689	0,8978	0,861	0,9814	0,9873	0,9907
r <sup>2</sup> ajustado	0,8487	0,8943	0,8396	0,9804	0,9866	0,9902
SSE	77180	8915	306,9	19060000	4908000	11370
RMSE	38,3	12,4	2,429	363,8	184,6	8,886

Fuente: elaboración propia.

El modelo con mejor ajuste entre marzo y abril fue la curva gaussiana de recuperados, descrita por la siguiente ecuación:

$$f(x) = 95,57e^{-\left(\frac{x-58,56}{23,65}\right)^2} \quad (1)$$

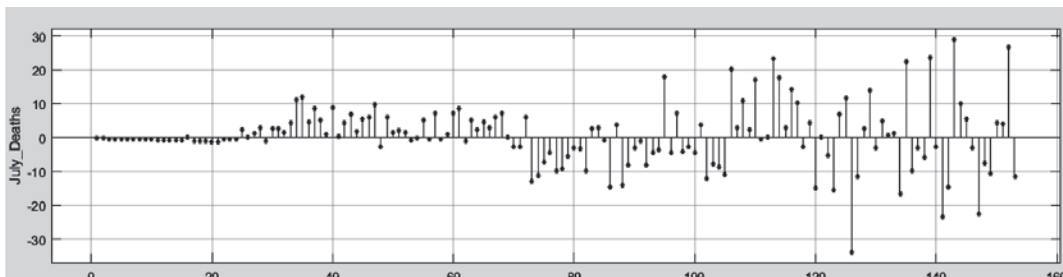
En la Figura 3 se puede observar la gráfica de residuos de dicho modelado.

**Figura 3. Gráfica de residuos para modelamiento gaussiano de recuperados con los datos de marzo a abril**

El modelo con mejor ajuste entre marzo y julio fue la curva gaussiana de fallecidos, descrita por la siguiente ecuación:

$$f(x) = 48,39e^{-\left(\frac{x-151,7}{0,6024}\right)^2} + 12,02e^{-\left(\frac{x-140,9}{6,909}\right)^2} + 392,4e^{-\left(\frac{x-190,9}{70,34}\right)^2} \quad (2)$$

En la Figura 4 se puede observar la gráfica de residuos de dicho modelado.



**Figura 4. Gráfica de residuos para modelamiento gaussiano de fallecidos con los datos de marzo a julio**

En la Tabla 4 se observan los coeficientes de determinación  $r^2$  ajustado de las dos curvas gaussianas de contagios, recuperados y fallecidos para el tercer modelamiento. Una curva pronostica aumento de los efectos de la pandemia y la otra pronostica mitigación.

**Tabla 4. Coeficientes de determinación marzo-agosto**

Modelos	Modelos marzo-agosto		
	R <sup>2</sup> Contagios	R <sup>2</sup> Recuperados	R <sup>2</sup> Fallecidos
Gaussiano 1-Aumento	0,9686	0,9955	0,9798
Gaussiano 2-Mitigación	0,9599	0,9911	0,9524

Fuente: elaboración propia.

El modelo con mejor ajuste fue el gaussiano 1, que pronostica un aumento de los efectos de la pandemia para el mes de septiembre. Dicho modelo tuvo los resultados que se observan en la Tabla 5.

**Tabla 5. Resultados del modelo gaussiano 1**

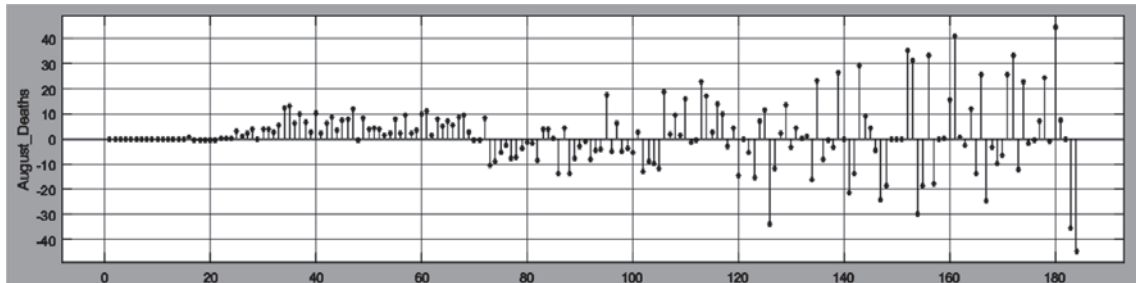
Datos	Con	Rec	Fall
r <sup>2</sup>	0,9715	0,9958	0,9966
r <sup>2</sup> ajustado	0,9686	0,9955	0,9964
SSE	82880000	21810000	8527
RMSE	706,6	246,5	6,981

Fuente: elaboración propia.

El modelo con mejor ajuste fue la curva gaussiana de fallecidos que está representada por la siguiente ecuación:

$$f(x) = 208,4e^{-\left(\frac{x-1,082}{0,02307}\right)^2} + 192,3e^{-\left(\frac{x-1,13}{1,013}\right)^2} + 113,14e^{-\left(\frac{x-1,271}{0,4691}\right)^2} \tag{3}$$

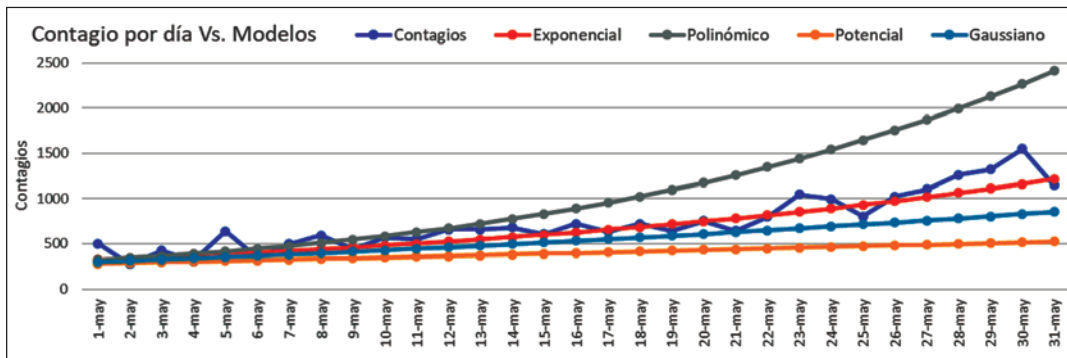
En la Figura 5 se observa la gráfica de residuos de dicho modelado.



**Figura 5. Gráfica de residuos para modelamiento gaussiano de fallecidos con los datos de marzo a agosto**

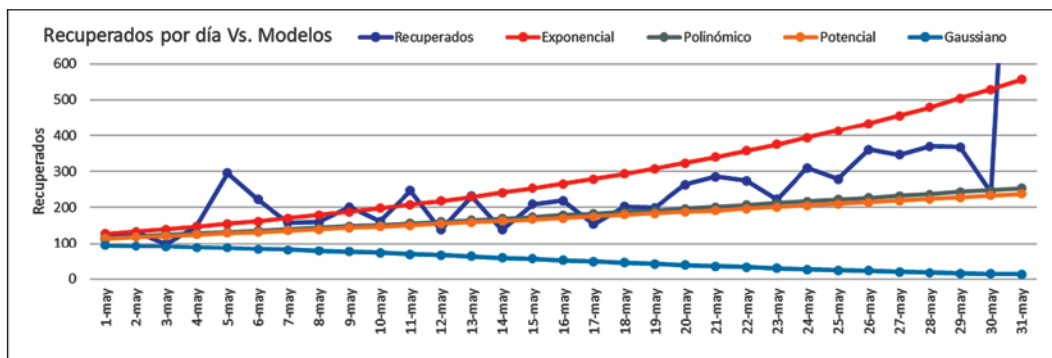
#### 4.1 Pronóstico vs. datos reales, modelos de marzo a abril

En la Figura 6 se pueden observar las curvas de pronóstico para contagios, en la Figura 7 para recuperados y en la Figura 8 para fallecidos después de hacer el ajuste a mayo.



**Figura 6. Modelos de contagios marzo-abril, pronósticos para mayo**

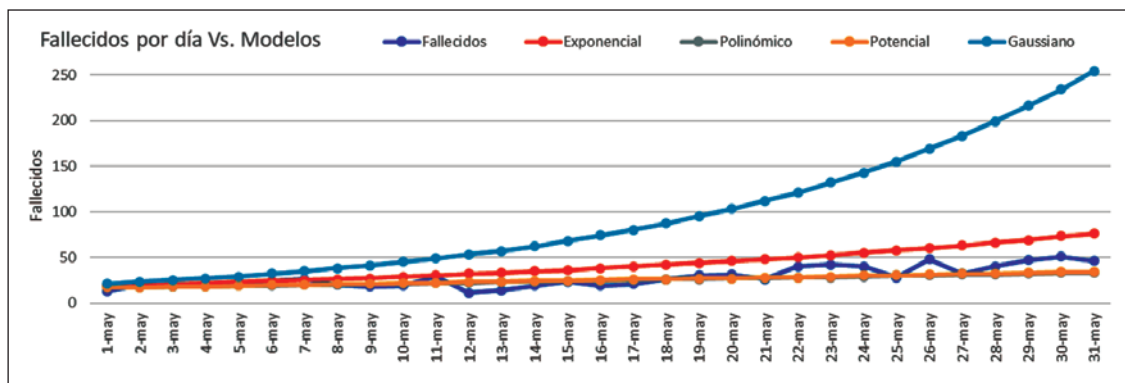
Fuente: elaboración propia.



**Figura 7. Modelos de recuperados marzo-abril, pronósticos para mayo**

Fuente: elaboración propia.





**Figura 8. Modelos de fallecidos marzo-abril, pronósticos para mayo**

Fuente: elaboración propia.

Las gráficas evidencian que el modelo más acertado en contagios y recuperados fue el exponencial, mientras que para fallecidos fue el potencial. Esto se puede ver en la Tabla 6, en la cual se muestran los errores para el pronóstico de contagios, recuperados y fallecidos acumulados para el 31 de mayo.

**Tabla 6. Errores en pronóstico de mayo**

Fecha	Contagios	Exp	Error%	Pol	Error%	Pot	Error%	Gauss	Error%
31-may	29 383	27 357	6,90%	39300	33,75%	18860	35,81%	23553	19,84%
Recuperados									
31-may	10 745	11 448	6,54%	7857	26,88%	7615	29,13%	3920	63,52%
Fallecidos									
31-may	1222	1657	35,60%	1124	8,02%	1153	5,65%	3315	171,28%

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2 Pronóstico vs. datos reales, modelos de marzo a julio

En la Figura 9 se puede observar las curvas de pronóstico para contagios, en la Figura 10 para recuperados y en la Figura 11 para fallecidos después de hacer el ajuste a agosto.

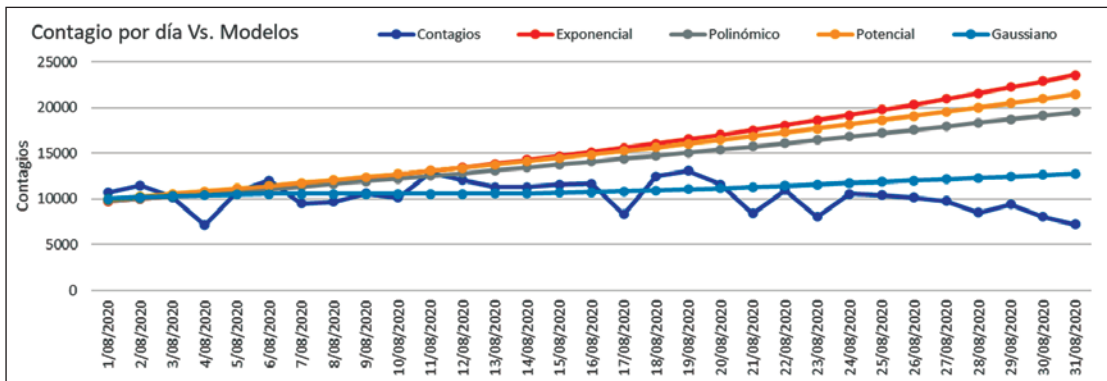


Figura 9. Modelos de contagios marzo-julio, pronósticos para agosto

Fuente: elaboración propia.

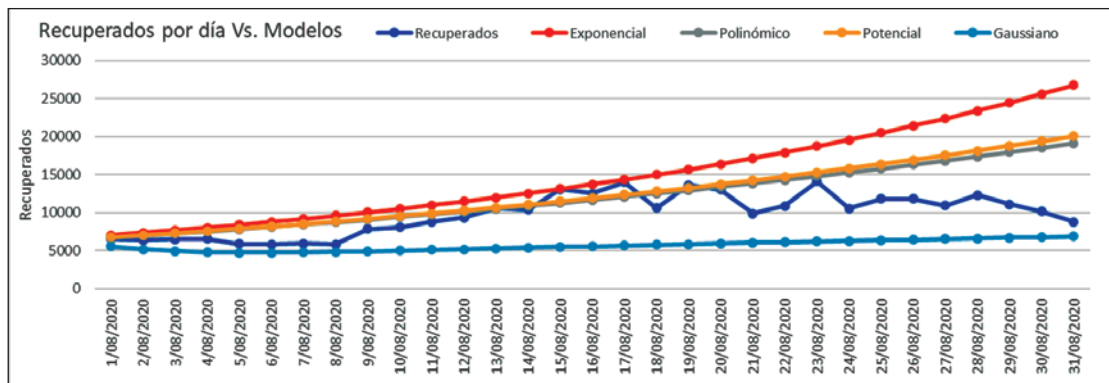


Figura 10. Modelos de recuperados marzo-julio, pronósticos para agosto

Fuente: elaboración propia.

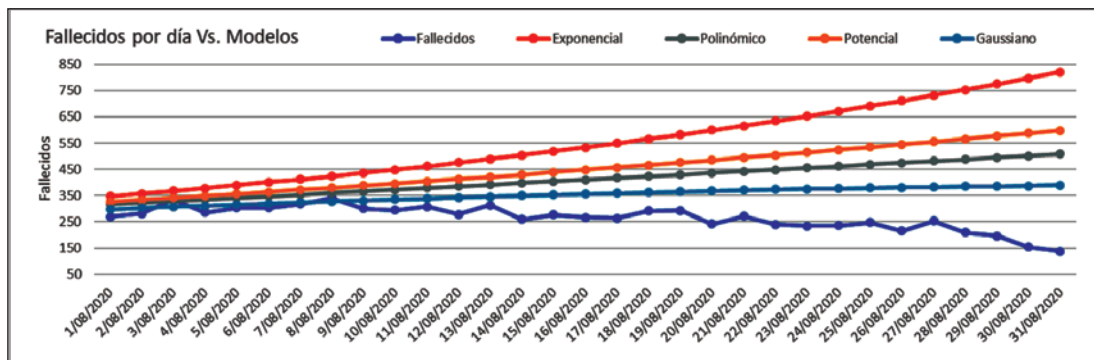


Figura 11. Modelos de fallecidos marzo-julio, pronósticos para agosto

Fuente: elaboración propia.

Las gráficas evidencian que el modelo más acertado en contagios y fallecidos fue el gaussiano, y para recuperados el polinómico. Esto se puede ver en la Tabla 7, en la que se muestran los errores para el pronóstico de contagios, recuperados y fallecidos acumulados para el 31 de agosto.

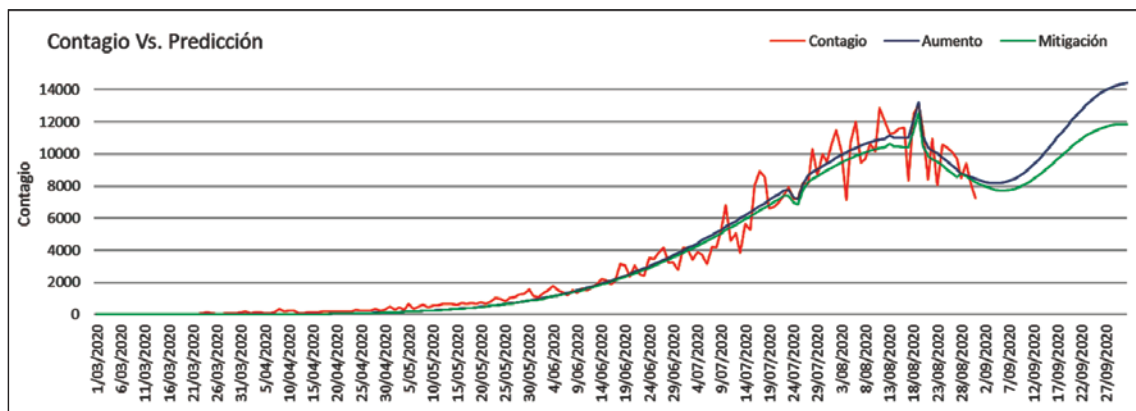
**Tabla 7. Errores en pronóstico de agosto**

Fecha	Contagios	Exp	Error%	Pol	Error%	Pot	Error%	Gauss	Error%
31-ago	615168	806112	31,04 %	73 7691	19,92 %	765933	24,51%	638825	3,85 %
Recuperados									
31-ago	459487	614949	33,83 %	531 496	15,67 %	541863	17,93 %	331897	27,77 %
Fallecidos									
31-ago	20037	28877	44,12 %	24 088	20,22 %	25396	26,75 %	22151	10,55 %

Fuente: elaboración propia.

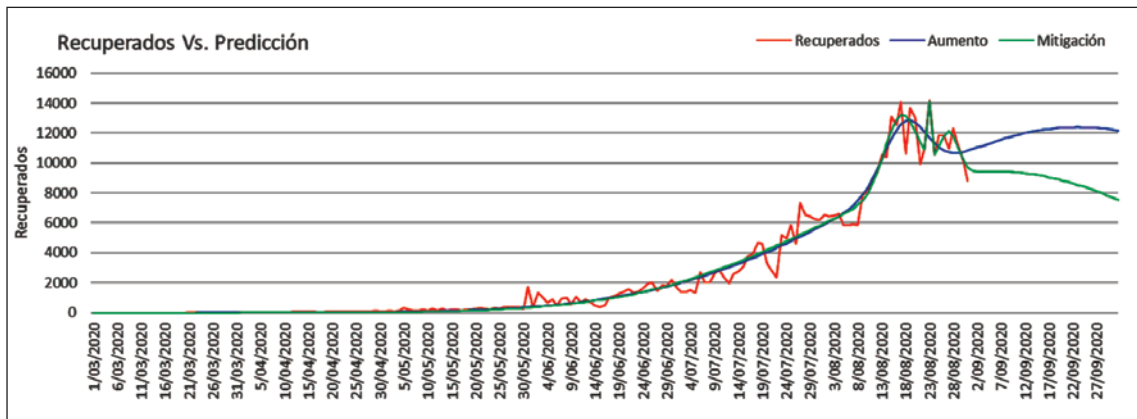
### 4.3 Modelos marzo-agosto

En la Figura 12 se pueden observar las curvas de pronóstico para contagios, en la Figura 13 para recuperados y en la Figura 14 para fallecidos después de hacer el ajuste y pronosticar el comportamiento de la pandemia en septiembre.



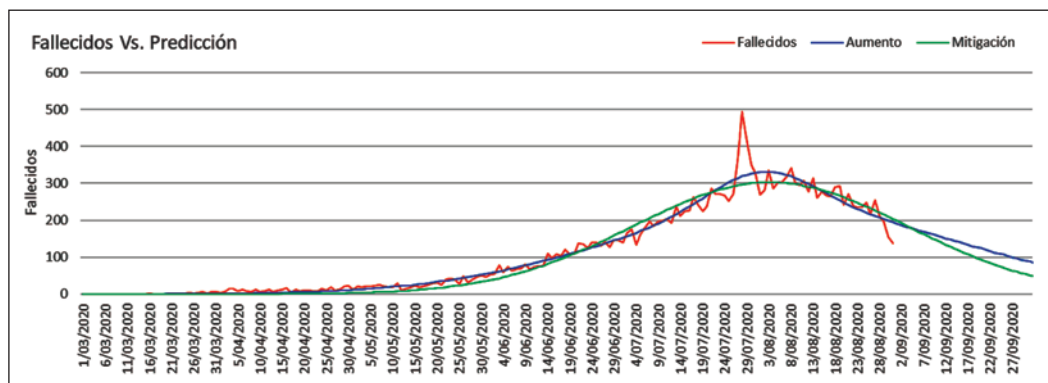
**Figura 12. Modelos de contagios de marzo-agosto, pronósticos para septiembre**

Fuente: elaboración propia.



**Figura 13. Modelos de recuperados de marzo-agosto, pronósticos para septiembre**

Fuente: elaboración propia.



**Figura 14. Modelos de fallecidos de marzo-agosto, pronósticos para septiembre**

Fuente: elaboración propia.

En las gráficas anteriores se observa el comportamiento real de la pandemia en color naranja y dos modelamientos gaussianos que permiten pronosticar dos comportamientos diferentes para septiembre. Un pronóstico de un posible aumento de contagios y un pronóstico de una posible mitigación de la pandemia.

En la Tabla 8 se observan algunos pronósticos para fechas específicas del mes de septiembre.

**Tabla 8. Pronósticos de septiembre**

Fecha	Contagio acumulado		Recuperados acumulados		Fallecidos acumulados	
	Aumento	Mitigación	Aumento	Mitigación	Aumento	Mitigación
1/09/2020	609943	584178	464637	466196	20065	19475
12/09/2020	703706	690746	591647	569482	21922	21261
30/09/2020	926196	862343	812944	724542	24060	22848

Fuente: elaboración propia.

## 5. CONCLUSIONES

Los coeficientes de determinación mostraron la exactitud de los modelos al describir el comportamiento de las curvas y ser el modelo gaussiano el que mejor ajuste tuvo.

Contar con diferentes modelos no lineales permite elaborar un análisis más acertado, ya que se cuenta con diferentes formas de evaluación del comportamiento de la pandemia.

Este estudio es relevante en comparación con otros modelamientos de la pandemia, si se tiene en cuenta que se realizó de manera sistemática. Esto al tomar primero cuatro modelos con solo los datos de dos meses [22]. Luego se ajustaron y seleccionaron los modelos adecuados para un segundo modelamiento, con la suma de más datos de los meses posteriores. Se validó el proceso con los datos reales mediante el cálculo de error en el pronóstico, el cual fue siempre inferior a 7 %; finalmente, se realizó un último pronóstico en el que se le sumaron los datos del mes de agosto.

Los pronósticos realizados para el mes de septiembre evidencian que si los contagios aumentan se puede llegar a presentar un pico mucho mayor que el primero. Se podría llegar a tener más de novecientos mil contagios y se podrían superar las veinticuatro mil muertes, por tanto, se recomienda a los ciudadanos acatar estrictamente los protocolos de bioseguridad establecidos por el Gobierno. A las autoridades se les sugiere, en caso de aumento de contagios a mediados de septiembre, reforzar las medidas de prevención con el fin de evitar un pico más alto que el primero a finales de mes.

## REFERENCIAS

- [1] W. H. Organization, "Coronavirus disease 2019 (COVID-19): situation report—30", 2020.
- [2] F. G. Manrique Abril, C. A. Agudelo Calderón, V. M. Gonzales Chordá, O. Gutiérrez Lesmes, C. F. Téllez Piñeres y G. Herrera Amaya, "Modelo SIR de la pandemia de Covid-19 en Colombia", *Sal. Púb.*, vol. 22, n.º 2, pp. 1-9, mar. 2020.

- [3] J. A. Obando Bastidas, A. P. Peña Pita, L. N. Obando Vargas y A. Franco Montenegro, "Importancia de los modelos de regresión no lineales en la interpretación de datos de la Covid-19 en Colombia", *Rev. Hab. Cien. Méd.*, vol. 19, 2020.
- [4] D. Ortega Lenis, D. Arango Londoño, E. Muñoz, D. E. Cuartas, D. Caicedo, J. Mena, M. Torres y F. Mendez, "Predicciones de un modelo SEIR para casos de Covid-19 en Cali, Colombia", *Sal. Púb.*, vol. 22, n.º 2, ab. 2020.
- [5] J. E. Díaz Pinzón, "Precisión del pronóstico de la propagación del Covid-19 en Colombia" *Rep. Med. y Cir.*, vol. 29, n.º 1, 2020.
- [6] R. Guzman y J. A. Cervera, "La mecánica estadística: sus orígenes y sus paradojas a la luz de los escritos de Paul y Tatiana Ehrenfest", *ILUIL*, vol. 29, pp. 331-356, 2006.
- [7] E. G. Florez Serrano y R. I. Laguado Ramírez, "Simulación bidimensional del flujo de convección libre en un cavidad cuadrada utilizando el método de la ecuación de Boltzmann en redes" *Ing. Univ.*, vol. 15, n.º 2, 2011.
- [8] L. F. Plaza Gálvez, "Modelación matemática en ingeniería", *IE Rev. Inv. Ed. REDIECH*, vol. 7, n.º 13, 2016.
- [9] Á. G. Vera Dávila, J. C. Delgado Ariza y S. B. Sepulveda Mora, "Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab", *Rev. Inv., Des. e Inn.*, vol. 8, n.º 2, 2018.
- [10] S. C. Chapra y R. P. Canale, *Métodos numéricos para ingenieros*, 7 ed. S. D. C. Interamericana Editores, Ed. McGraw-Hill Education, 2015.
- [11] L. E. Ramírez Carvajal, K. C. Puerto López, G. Sierra Peñaranda y D. Guevara Ibarra, "Computer-aided design software for multi-stage amplifiers with bipolar transistors and field effect", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1418, 2019.
- [12] C. Niño Rondón, S. Castro Casadiego y B. Medina Delgado, "Caracterización para la ubicación en la captura de video aplicado en técnicas de visión artificial en la detección de personas", *Rev. Col. Te. Av.*, vol. 2, n.º 36, ab. 2020.
- [13] G. F. Contreras Contreras, H. J. Dulce Moreno y R. Ardila Melo, "Arduino data-logger and artificial neural network to data analysis", *J. Phys: Conference Series*, vol. 1386, 2019.
- [14] A. A. Baez Perez y Á. J. Soto Vergel, "Enseñanza de sistemas de radiocomunicaciones terrestres con línea de vista mediante software educativo", *Rev. Ed. Ing.*, vol. 14, n.º 28, pp. 78-87, 2019.
- [15] J. S. Santóyo Díaz y K. H. Serrano Medina, "Herramientas de software libre para la creación de contenidos educativos", *Ing.*, n.º 28, pp. 43-58, 2016.
- [16] J. Araque Gallardo, J. L. López Prado y C. Yeneris, "Desarrollo de una herramienta didáctica para la enseñanza de conceptos básicos en sistemas embebidos", *Ing.*, n.º 26, pp. 89-98, 2015.
- [17] C. Minnaard, "Modelos de regresión lineales y no lineales: su aplicación en problemas de ingeniería de *IICaim-Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica*, San Juan, Argentina, 2010.
- [18] M. Badii y A. Guillen, "Estimaciones estadísticas: un acercamiento analítico" *Daena: International Journal of Good Conscience*, vol. 5, n.º 1, pp. 237-255, en. 2010.
- [19] W. Mendenhall, R. J. Beaver y B. M. Beaver, *Introducción a la probabilidad y estadística*, 13 ed. Cengage Learning, 2010.

- [20] O. Y. Guerrero Jaimes y R. M. Guerrero Jaimes, “Las empresas de Norte de Santander y su perspectiva acerca de la seguridad y salud en el trabajo», *Inv. Inn. Ing.*, vol. 5, n.º 2, pp. 26-45, nov. 2017.
- [21] Instituto Nacional de Salud, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.ins.gov.co/Noticias/Paginas/Coronavirus.aspx>. consultado el 13 de agosto 2020].
- [22] Presidencia de la República, “Aislamiento Preventivo Obligatorio” 2020.





# Desarrollo de una prensa para ensayos de tensión en polímeros<sup>1</sup>

## Development of a polymer tensile testing machine

Stephan Obando<sup>2</sup>  
Cristian Sepúlveda<sup>3</sup>  
Tito Piambac<sup>4</sup>  
Richard Moran<sup>5</sup>

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.29.7435>

### RESUMEN

Se presenta el desarrollo de una prensa de tensión para polímeros. La máquina fue diseñada y construida por estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, en Colombia. Para diseñar la máquina se siguió la metodología clásica de diseño mecánico propuesta por Shigley. El diseño se centró en el uso de componentes locales y procesos de mecanizado comunes. Según las evaluaciones preliminares, el prototipo se desempeña satisfactoriamente de acuerdo con sus parámetros de diseño, es decir, una capacidad de carga de 18.261 N y una velocidad máxima de 510 mm/min. Este proyecto demuestra cómo componentes especializados se pueden desarrollar con tecnología asequible en el propósito de satisfacer las necesidades experimentales en los programas educativos de los países en vías de desarrollo.

**Palabras clave:** Ensayo de tensión; Diseño mecánico; Materiales; Plásticos; Prensa universal.

### ABSTRACT

The development of a tension press for polymers is presented. The machine was designed and constructed by undergraduate students from Corporación Universitaria Autónoma de Nariño in Colombia. Classical methodology of mechanical design proposed by Shigley was followed to design the machine. Design was focused on using local components and common workshop processes. According to preliminary evaluations, the prototype performs satisfactorily according to its design parameters, e.g. a load capacity of 18.261 N and a maximum speed of 510 mm/min. This project demonstrates that specialized components can be developed with affordable technology in order to support the experimental needs in education programs from developing countries.

**Keywords:** Tension test; Mechanical design; Materials; Plastic; Universal press.



**Como citar este artículo:** S. Obado, C. Sepúlveda, T. Piambac y R. Moran, Desarrollo de una prensa para ensayos de tensión en polímeros, *ingeniare*, vol. 2, n.º 29, dic. 2020.

1. Proyecto Diseño y construcción de un equipo de ensayos de resistencia a la tensión de materiales (polímeros), en la Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, Grupos de Investigación Inmecnar y GRIM. Línea de investigación en diseño mecánico.
2. Ingeniero Mecánico, Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Mecánica, Cra. 28 # 19-24, Pasto, Nariño, Colombia. Correo: [stephanobando@gmail.com](mailto:stephanobando@gmail.com)
3. Ingeniero Mecánico, Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Mecánica, Cra. 28 # 19-24, Pasto, Nariño, Colombia.
3. Magíster en Industria 4.0, Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Mecánica, Cra. 28 # 19-24, Pasto, Nariño. Colombia Correo: [tito.piamba@aunar.edu.co](mailto:tito.piamba@aunar.edu.co)
4. Doctor en Ingeniería, Universidad Mariana, Facultad de Ingeniería, programa de Ingeniería Mecatrónica, Cra. 28 # 19-24, Pasto, Nariño, Colombia. Correo: [rmoran@umariana.edu.co](mailto:rmoran@umariana.edu.co)

Fecha de recepción: 16 de abril de 2020 • Fecha de aceptación: 20 de julio de 2020

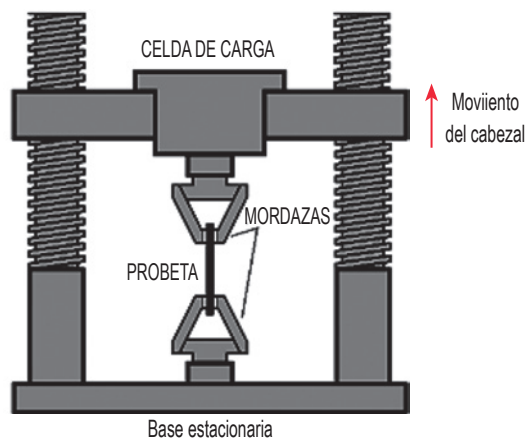
## 1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas permiten describir la respuesta de un material cuando se somete a diferentes condiciones de carga. Las propiedades más comunes, tales como la rigidez, la resistencia y la ductilidad se determinan con ensayos estandarizados de tensión [1].

Un ensayo de tensión consiste en la aplicación de carga unidireccional a una probeta elaborada con el material de interés, la cual tiene una geometría y unas dimensiones específicas con base en la norma apropiada y de acuerdo con el tipo de material y su aplicación [2,3]. La carga se debe aplicar progresivamente, mientras se registra su magnitud por algún método mecánico o electrónico (Figura 1). Asimismo, se necesita registrar el desplazamiento o la deformación de la probeta como resultado de la carga aplicada [3].

Para llevar a cabo estos ensayos se requieren equipos especiales, los cuales se conocen como “prensas universales” o “máquinas de tensión”. Estos aparatos están provistos de cuatro elementos básicos [4]. En primer lugar, un sistema mecánico de accionamiento que debe ser capaz de aplicar la fuerza y la velocidad necesaria que satisfaga las condiciones de la prueba. En segundo lugar, un sistema de adquisición de datos para registrar la carga, el desplazamiento o la deformación del espécimen de prueba [5]. En tercer lugar, una estructura de reacción capaz de soportar las fuerzas impuestas y que sea lo suficientemente rígida para no alterar las condiciones del ensayo [6]. Finalmente, un sistema de fijaciones o mordazas que permitan sujetar el espécimen de ensayo y evitar cualquier deslizamiento relativo mientras se ejecuta la prueba.

Todos estos sistemas se diseñan y calculan con alta precisión para garantizar las condiciones de exactitud y confiabilidad requerida en estas pruebas estandarizadas. Por ejemplo, las normas ASTM E8 [2] y D638 [7] brindan las condiciones mínimas que deben cumplir los equipos para ensayos de tensión de materiales metálicos y poliméricos, respectivamente. Estas máquinas son fabricadas por grandes compañías tales como Instron, MTS, Matest y Humboldt, entre otras.



**Figura 1. Configuración básica de una máquina de ensayos de tensión**

Fuente: adaptado de Engineering Archives [8]

En países en vía de desarrollo como Colombia, el diseño y la construcción de esta clase de equipos es relativamente bajo; son pocas las investigaciones que presentan el diseño y la construcción de estos equipos [9-11]. Además, para adquirir uno de ellos los centros de investigación, laboratorios e instituciones educativas tienen que importarlos a un costo relativamente alto. Por ejemplo, una prensa para ensayos estáticos con una capacidad de entre 10 000 y 20 000 N tiene un valor comercial promedio de USD 43 042 [12]. Por otra parte, la puesta en operación, la capacitación para el manejo, el mantenimiento, la actualización y el suministro de repuestos queda condicionado al fabricante. Esto genera una alta dependencia tecnológica y en un tiempo relativamente corto de uso, pues estos equipos quedan obsoletos y es más fácil adquirir otro que actualizarlo. En consecuencia, parece necesario desarrollar un equipo de ensayos con tecnología disponible localmente y a un costo asequible.

En un esfuerzo por dotar de un equipo para ensayos de tensión al laboratorio de materiales de la Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, se propuso desarrollar un prototipo de máquina de tensión para ensayos en polímeros, la cual tiene como propósito usos didácticos y de apoyo en la investigación de los programas de ingeniería de la universidad.

## 2. MÉTODOS

Para resolver este problema se utilizó la metodología clásica del diseño mecánico presentada por Shigley [13], la cual se puede dividir en cinco fases:

1. Identificación de la necesidad y definición de problema.
2. Planteamiento de alternativas de solución y selección.
3. Diseño detallado.
4. Construcción.
5. Ejecución de pruebas de funcionamiento.

En la primera fase se identificó la necesidad del equipo y cuáles son los requerimientos funcionales para satisfacer las necesidades de los usuarios y cumplir la normatividad.

En la segunda fase se identificaron configuraciones típicas de máquinas de ensayos para polímeros (Figura 2) y se eligió la más apropiada de acuerdo con el presupuesto y el alcance del proyecto.



**Figura 2. Dos configuraciones típicas de máquinas de ensayo: a) diseño a una sola columna, b) diseño de doble columna**

Fuente: [14]

Con el uso de una matriz morfológica [15] se eligieron los elementos comerciales que componen el diseño, considerando como criterios de selección el menor costo y la disponibilidad en el mercado local.

En la tercera fase se realizaron los cálculos de los principales elementos de la máquina. Se utilizaron las fórmulas básicas de diseño de máquinas para calcular tornillos, engranajes y elementos del bastidor. Además, con base en consideraciones dinámicas se calculó la potencia del motor. Finalmente, se usaron las herramientas de simulación con elementos finitos proporcionados por el *software* Inventor Profesional 2019 (Autodesk Inc., San Rafael, Estados Unidos), con lo cual se verificó que el diseño cumple con las condiciones de resistencia y rigidez requeridas durante los ensayos.

En la fase de construcción se utilizaron procesos de maquinado convencionales como, por ejemplo, el torneado, el esmerilado, el fresado, el corte y la soldadura, los cuales permitieron ejecutar este proceso de una manera eficiente y económica. Adicionalmente, la participación de estudiantes de pregrado en esta actividad mejoró su comprensión y dominio de estos procesos de manufactura. Por último, se realizaron pruebas al prototipo para verificar su correcto funcionamiento.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Identificación de la necesidad y definición del problema

Con base en la norma ASTM D638 [7] se determinaron las dimensiones máximas que puede tener la probeta para ensayos en plásticos, la cual tiene un diámetro en su sección calibrada de 11,2 mm. Por otra parte, con esta misma norma se determinó la velocidad máxima de prueba durante un ensayo que es de 510 mm/min. La fuerza máxima de prueba se estimó considerando el área máxima de una probeta típica que es de 98,1 mm<sup>2</sup> (con base en la norma ASTM D638) y la resistencia de la poliamida PAI (uno de los termoplásticos más resistentes) [1], cuya resistencia a la tracción es de 186 MPa. Con base en estas consideraciones se determinaron las especificaciones de la máquina de ensayo, las cuales se resumen en la Tabla 1.

La rigidez presentada en la Tabla 1 se estimó considerando la longitud calibrada de 57 mm correspondientes a probetas tipo I, II y III descritas en la norma ASTM D638, con un área transversal de 98,1 mm<sup>2</sup> y un módulo de rigidez de 5000 MPa, valor representativo de un plástico rígido como la poliamida [16]. Esta rigidez es la máxima esperada en una probeta plástica de las características descritas y, por tanto, la mínima que debe tener la máquina de ensayos para no presentar una distorsión excesiva de sus elementos durante un ensayo.

**Tabla 1. Especificaciones de la máquina de ensayo**

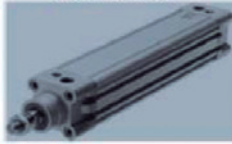




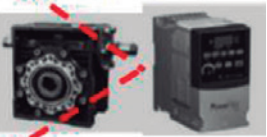

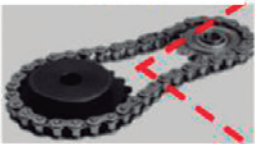

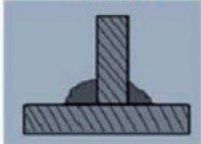
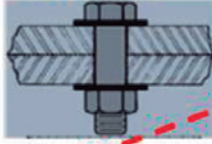




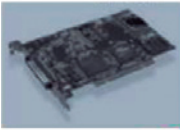


Fuerza máxima (N)	Velocidad máxima (mm/min)	Rigidez mínima (N/mm)
18 261	510	8605

Fuente: elaboración propia.

#### 3.2 Planteamiento de alternativas de solución y selección

La matriz morfológica presentada en la Figura 3 permitió considerar varias configuraciones de componentes y sistemas para la prensa. Se eligieron componentes fáciles de adquirir localmente y que cumplieran las demandas mecánicas, electrónicas y de programación para el desarrollo del prototipo.

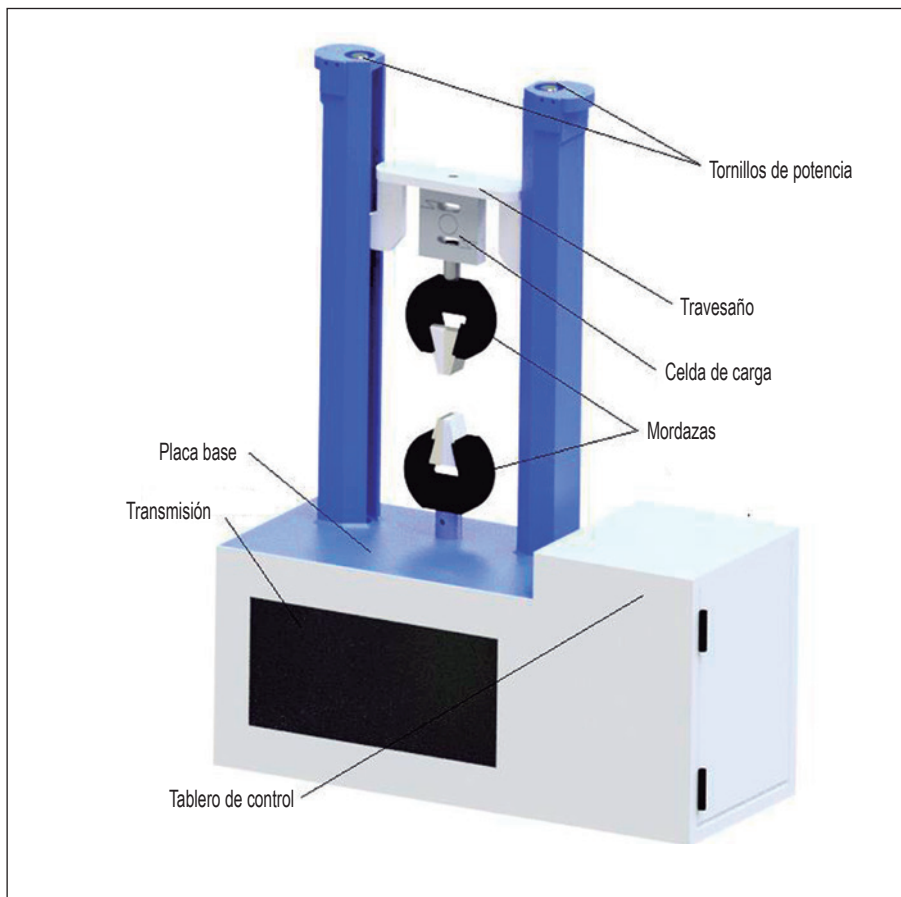
En la configuración escogida la probeta es tensionada por un mecanismo de dos tornillos de potencia que mueven un travesaño, al cual se une una celda de carga que contiene una mordaza, mientras la otra mordaza se fija a una placa que hace parte del bastidor del equipo (Figura 4).

Componente / Sistema	Opción A	Opción B	Opción C
Accionamiento	Neumático 	Mecánico 	Hidráulico 
Control de velocidad	Reductor 	Variador de velocidad 	Mixto 
Transmisión de movimiento	Bandas 	Cadenas 	Ejes 
Uniones estructurales	Soldadas 	Atornilladas 	Mixta 
Registro de carga	Celda de carga 	Dinamómetro 	Sensor de presión 
Adquisición de datos	Tarjeta de adquisición de datos 	Artheta Arduino 	PLC 
Software	Personalizado	Comercial	Libre

**Figura 3. Matriz morfológica que muestra las diversas alternativas en los componentes y sistemas que integran la prensa (la línea punteada de color rojo muestra los componentes elegidos)**

Fuente: [12]

Con base en un análisis de configuraciones de máquinas existentes (Figura 2), se eligió la configuración de doble columna que ofrece alta rigidez, capacidad de carga y un amplio espacio de trabajo que permita ensayos de compresión o flexión con el uso de accesorios que pueden desarrollarse en el futuro (Figura 4). El mecanismo de tornillos tiene una alta ventaja mecánica, por lo que el sistema de accionamiento resulta compact



**Figura 4. Configuración de la máquina de ensayo**

Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Diseño detallado

La configuración del mecanismo de transmisión se muestra en la Figura 5. Se eligieron tornillos de potencia, como, por ejemplo, el sistema para convertir el movimiento rotatorio del motor en movimiento de lineal transmitido a la probeta. Se eligieron tornillos de rosca ACME de 1" 3/8" de diámetro nominal, cuatro hilos por pulgada y una sola entrada, los cuales son fácilmente maquinados y adquiridos por metros en el mercado local. A estos tornillos se le realizaron los cálculos de torque de elevación, eficiencia

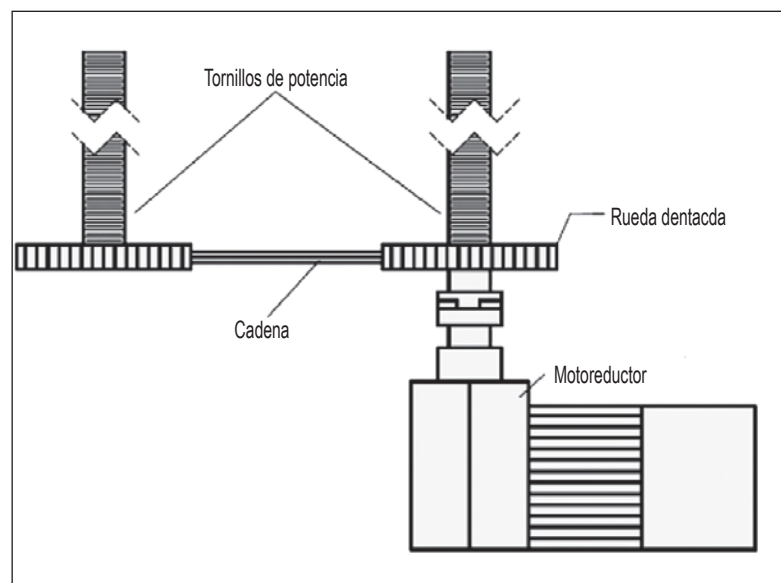
y carga crítica de pandeo, descritos en detalle por Shigley [13] y cuyo resumen se presenta en la Tabla 2. La carga crítica de pandeo fue 1727 % mayor que la fuerza máxima esperada en cada tornillo, la cual sería la mitad de presentada en la Tabla 2, por lo cual los tornillos tienen la rigidez suficiente para la aplicación elegida.

**Tabla 2. Resumen cálculos tornillos de potencia**

Torque (N.m)	Carga crítica de pandeo (N)	Eficiencia
50,5	157 746	0,27

Fuente: elaboración propia.

La rosca cuadrada es más eficiente que la ACME, sin embargo, esta última es más fácil de maquinar y, por esta razón, se eligió en el diseño.



**Figura 5. Mecanismo transmisión de potencia.**

Fuente: elaboración propia.

La potencia mecánica teórica se calculó como el producto de la fuerza y la velocidad máxima esperadas durante los ensayos (véase la Tabla 1) y resultó ser de 155,2 W. Esta potencia se amplificó por un factor de 1,3, considerando una posible sobrecarga del 30 % de la fuerza máxima especificada. Con esta potencia nominal y con la eficiencia de los tornillos (véase la Tabla 2) se determinó que la



potencia real del motor necesaria para mover el sistema a plena carga es de 733W. Por tanto, se eligió un motor Siemens referencia 1LE0142 de una potencia nominal de 746 W (1 Hp) girando a 1720 rpm. El motor está acoplado a un reductor (referencia HU50615) de la misma potencia y una relación de 20:1, lo cual garantiza una velocidad nominal del travesaño de 546 mm/min, calculada como la velocidad de rotación en la salida del reductor (86 rpm) multiplicada por el avance del tornillo (6.35 mm). Esta velocidad es mayor que la velocidad máxima requerida en ensayos de plásticos, por lo cual se usó un variador de velocidad marca Allen Bradley (modelo A4P5N104), de la misma potencia del motor y reductor, que permite configurar la velocidad requerida durante las pruebas. Para el movimiento de los tornillos se eligió una transmisión comercial por cadena con dos ruedas dentadas ANSI N.º 35 de paso 3/8".

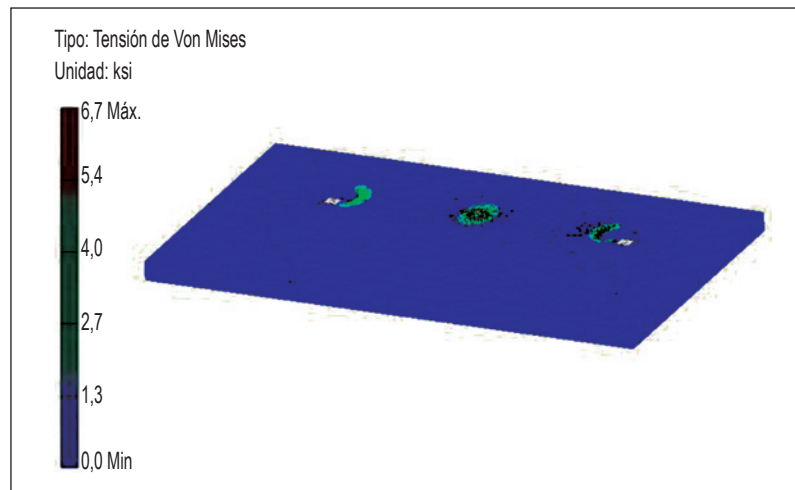
Con el análisis mecánico de elementos finitos a los principales componentes de la máquina tales como el tornillo, la placa base, el cabezal y las mordazas se determinaron los esfuerzos y desplazamientos máximos (véanse las figura 6 y 7), cuyo resumen se presenta en la Tabla 3. Los factores de seguridad se calcularon con base en la resistencia última del acero A-36 que es de 400 MPa [17]. Los tamaños de malla usados en los análisis con los modelos se definieron con base en un análisis de convergencia automático usado por el programa con diferencias en desplazamientos inferiores al 5 % entre mallas sucesivas.

**Tabla 3. Resumen del análisis con elementos finitos basados en una fuerza máxima 18261 N**

Componente	Esfuerzo Von Mises máximo (MPa)	Desplazamiento máximo (mm)	Factor de seguridad
Tornillo	184	1,0	2,2
Travesaño	50	0,2	8
Placa base	176	0,3	2,3
Mordaza	268	0,3	1,5

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con estos análisis se estimó la rigidez de cada elemento. La rigidez global entre mordazas se calculó como la rigidez equivalente de resortes en serie y paralelo, y fue de 14181 N/mm; este valor es 64 % mayor que la rigidez mínima determinada en las especificaciones (Tabla 1).



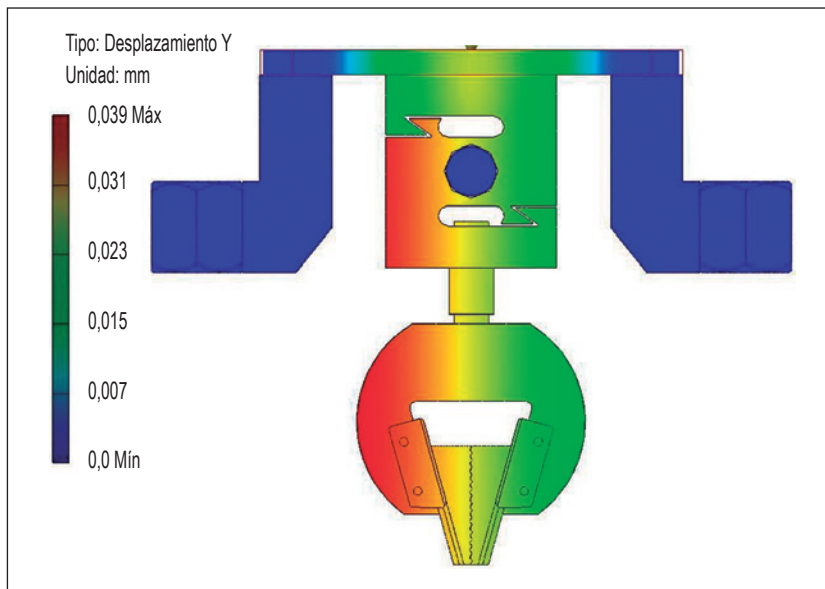
**Figura 6. Esfuerzos de Von Mises en la placa base bajo una carga de 4448 N actuando en el agujero central**

Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Construcción

La construcción se realizó en el taller de máquinas y herramientas de la Corporación Universitaria Autónoma de Nariño y fue realizada por los dos primeros autores, con la asistencia de un técnico. En este proceso se maquinaron componentes simples como placas y perfiles, las cuales luego se juntaron con procesos de soldadura (Figura 8).

Para el registro de datos se usaron componentes comerciales tales como una tarjeta Arduino Uno y una celda de Carga tipo S de 50000 N (Figura 9). Estos componentes fueron configurados y programados para brindar una alta flexibilidad y exactitud al proceso de control y registro. El sistema de adquisición de datos se diseñó con una interfaz electrónica a fin de conectarse con un computador en el que es posible adquirir y registrar los datos de los ensayos. Se utilizó la herramienta de código abierto NetBeans de Java para desarrollar esta interfaz.



**Figura 7. Contornos de desplazamiento de la mordaza bajo una carga axial de 4448 N**

Fuente: elaboración propia.



**Figura 8. Construcción del prototipo**

Fuente: elaboración propia.



**Figura 9. Elementos de mando, control y registro electrónico de carga**

Fuente: elaboración propia.

El prototipo terminado se muestra en la Figura 10.

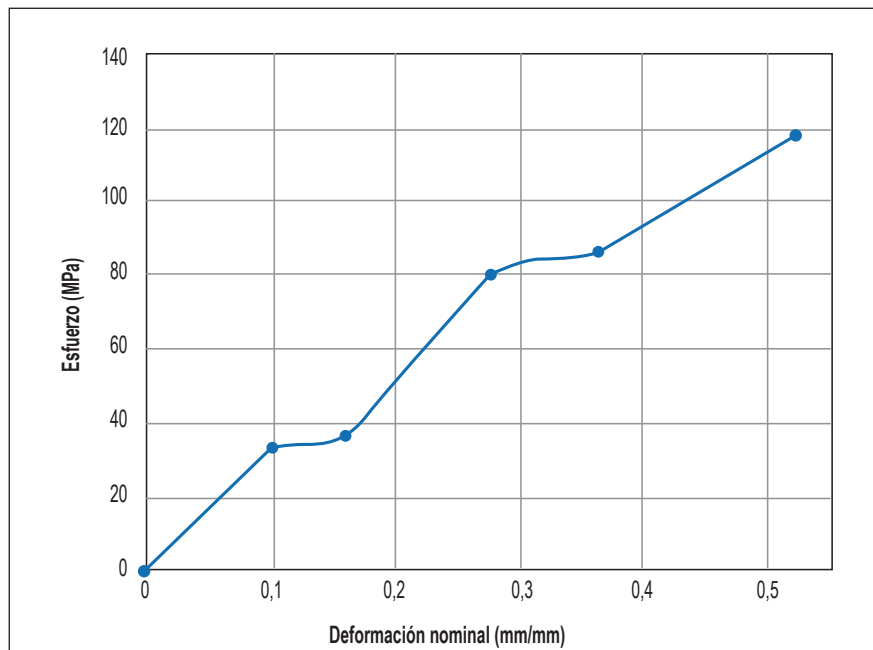


**Figura 10. Prototipo terminado**

Fuente: elaboración propia.

### 3.5. Pruebas de funcionamiento

Para verificar el funcionamiento del prototipo se llevaron a cabo dos ensayos con probetas plásticas. Los resultados de un ensayo en una probeta de nylon se muestran en la Figura 11. La probeta tuvo una longitud y área inicial de 68,5 mm y 145,7 mm<sup>2</sup> en la zona calibrada, respectivamente. Los ensayos se llevaron a cabo con control de desplazamiento a una velocidad de 0,5 mm/s. Se determinó una resistencia última nominal de 117 MPa.



**Figura 11. Curva de esfuerzo vs. deformación para la prueba con una probeta de nylon**

Fuente: elaboración propia.

Dado que durante los ensayos no se dispuso de un registro electrónico de desplazamiento, se realizó este registro con un calibrador para cada nivel de carga. Por tanto, no se tuvo la suficiente resolución para medir la pendiente inicial de la curva, la cual representa el módulo de elasticidad [18]. La probeta fue llevada hasta la falla (Figura 12).



**Figura 12. Ensayo de tensión sobre una probeta de nylon**

Fuente: elaboración propia.

#### **4. CONCLUSIONES**

El desarrollo del prototipo de máquina de tensión cumplió satisfactoriamente los requerimientos planteados en la fase de diseño. Sin embargo, se debe hacer un seguimiento de la duración del prototipo a largo plazo.

Se demuestra que con soluciones de bajo costo y usando tecnología local como la presentada en este trabajo se puede apoyar la dotación de laboratorios de universidades o centros de investigación.

Una limitación de este prototipo es que no se implementó un extensómetro que permitiera medir la deformación de la probeta y así calcular el módulo de rigidez del material. Sin embargo, con el sistema de adquisición de datos existente esta implementación resulta sencilla y será tema de futuros desarrollos.

## REFERENCIAS

- [1] D. Askeland y P. Phule, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 4 ed. México: International Thomson Editores, 2004.
- [2] American Society For Testing And Materials, “ASTM E8: tension testing of metallic materials”, West Conshohocken, 2016.
- [3] T. Beckwith, L. Buck y R. Maragoni, *Mechanical measurements*. Estados Unidos: Addison-Wesley, 1982.
- [4] R. Moran, “Desarrollo de una prensa de pruebas dinámicas para ensayos de biomecánica ortopédica”, tesis de maestría, Ingeniería Mecánica. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2009.
- [5] C. Carabali, *Diseño e implementación del sistema de adquisición de datos de una máquina universal de ensayos del laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones*. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2010.
- [6] American Standards for Testing and Materials, “F 1541-01 Specification and Test Methods for External Standards for Testing and Materials”, “ASTM D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”, ASTM, West Conshohocken, 2014.
- [8] E. Archives, “Engineering archives”, 2012. [En línea]. Disponible en: [http://www.engineeringarchives.com/les\\_mom\\_tensiletest.html](http://www.engineeringarchives.com/les_mom_tensiletest.html). [Último acceso: 12 07 2018].
- [9] A. Leyton, D. Ballén, R. Moran, F. Casanova y G. J. Pinedo, “Desarrollo de una prensa para pruebas estáticas y dinámicas de elementos ortopédicos y biológicos”, *Ing. Inv.*, vol. 28, n.º 3, pp. 132-137, 2008.
- [10] E. Huerta, J. Corona y A. Oliva, “Universal testing machine for mechanical properties of thin materials”, *Rev. Mex. Fis.*, vol. 56, n.º 4, pp. 317-322, 2010.
- [11] D. Durango, E. Herrera y N. Otero, “Diseño, construcción y validación del prototipo de una máquina para ensayos de resistencia de materiales”, *Ing. e Inn.*, vol. 3, n.º 2, pp. 16-27, 2015.
- [12] S. Obando y C. Sepúlveda, “Diseño y construcción de un equipo de ensayos de resistencia a la tensión de materiales (polímeros), en la Corporación Universitaria Autónoma de Nariño 2017”, tesis de pregrado, Ingeniería Mecánica. Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, Pasto, Colombia, 2017.
- [13] R. Budynas y J. Nisbet, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill, 2012.
- [14] Instron, “Plastic testing solutions”, Instron, Panezza, 2017.
- [15] M. Fagnoli, E. Rovida y R. Troisi, “The morphological matrix: tool for the development of innovative design solutions”, *ICAD*, pp. 1-7, 2006.
- [16] Matweb, “Overview of materials for Polyamide-Imide, Molded”. [En línea]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1ca9588da84640d199959da7c00a6083>. [consultado el 15 de enero de 2020].
- [17] Matweb, “ASTM A36 Steel, plate”, A36 Steel, [En línea]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6>. [consultado el 15 de enero de 2020].
- [18] R. Avellaneda, S. Cabrera, P. Martínez, C. Donoso, “Apoyo tecnológico para la fidelización y captación de nuevos clientes por medio de una aplicación móvil”, *Inv. Inn. Ing.*, vol. 5, n.º 1.





# Impacto de las obras de plantas de tratamiento de aguas residuales sobre el río Bogotá con la metodología de la huella hídrica

## Impact of sewage treatment plant works on the Bogota River using the water footprint methodology

Yulia Ivanova<sup>1</sup>

Sharith Yessenia Parra Cendales<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.29.7436>

### RESUMEN

Bogotá se considera el principal causante de la contaminación del río homónimo debido al desarrollo de todas las actividades socioeconómicas y a la carencia de un sistema adecuado de descontaminación de los vertimientos. Con miras aun al manejo ambientalmente sostenible de los efluentes, se proponen los proyectos sanitarios de ampliación de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Salitre y de la construcción de la PTAR Canoas. Con el fin de evaluar el acercamiento de la ciudad hacia la sostenibilidad ambiental, se aplicó la metodología de la huella hídrica para el escenario actual de tratamiento de aguas residuales y el escenario futuro con el funcionamiento de las nuevas obras sanitarias. Se concluye que la huella hídrica gris total se disminuirá 3,8 veces, lo que representa una disminución porcentual de un 87 % de los sólidos totales en suspensión, indicando un acercamiento significativo al manejo ambiental deseado de los vertimientos en la capital colombiana.

**Palabras clave:** Bogotá; Huella hídrica gris; Tratamiento del agua; Urbanización; Vertimientos.

### ABSTRACT

The Bogotá city is considered the main cause of pollution of the Bogotá river because to the development of all socio-economic activities and the lack of an adequate decontamination system for discharges. With a view to an environmentally sustainable management of the effluents, the sanitary expansion projects of the Salitre residual water treatment plant and the construction of the Canoas residual water treatment plant are proposed. To evaluate the city's approach to environmental sustainability, the water footprint methodology was applied for the current wastewater treatment scenario and for the future scenario with the operation of the new sanitation works. It concludes that the total gray water footprint will be reduced by 3,8 times which represents a percentage decrease of 87 % of the total solids in suspension, indicating a significant approach to the environmental management of discharge the Colombian capital.

**Keywords:** Bogotá City; Gray water footprint; Water treatment; Urbanization; Discharge.



**Como citar este artículo:** Y. Ivanova y S. Y. Parra Cendales, Impacto de las obras de plantas de tratamiento de aguas residuales sobre el río Bogotá con la metodología de la huella hídrica, *ingeniare*, vol. 2, n.º 29, dic. 2020.

1. Ingeniera Hidróloga, M.Sc. en Gestión Ambiental, Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada, Grupo de Investigación IGE-Ingeniería, Geomática e Investigación. Correo: [yulia.ivanova@unimilitar.edu.co](mailto:yulia.ivanova@unimilitar.edu.co)

2. Ingeniera Civil, Facultad de Ingeniería de la Universidad Militar Nueva Granada, Grupo de Investigación IGE-Ingeniería, Geomática e Investigación. Correo: [u1102384@unimilitar.edu.co](mailto:u1102384@unimilitar.edu.co)

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el mundo atraviesa por acelerados procesos de crecimiento demográfico y urbanización [1] que afectan directamente el entorno ecosistémico [2], generando así núcleos de presión sobre los recursos naturales, de manera que el recurso hídrico es uno de los más intervenidos por participar en la mayoría de los ciclos que ocurren en la naturaleza [3].

Bogotá sustenta su vida en la disponibilidad del recurso hídrico que sirve de base para el desarrollo de las actividades socioeconómicas a través de las cuales se genera el 25,7 % del PIB nacional.

El crecimiento de la ciudad genera presiones tanto en disponibilidad como en la calidad de fuente receptora de los vertimientos. En las últimas décadas se han realizado esfuerzos encaminados a la disminución de los consumos per cápita del agua [4], pero el tema de descontaminación de los vertimientos al río Bogotá ha sido abordado de manera insuficiente [5].

Actualmente, la capital colombiana cuenta con el sistema de alcantarillado mixto en manos de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAB), conformado por tres cuencas de captación de aguas que son Chingaza, Tibitóc y Tunjuelo, para en adelante tomar partida las actividades de recolección, transporte y tratamiento primario de los residuos líquidos [6] hasta la PTAR Salitre (zona norte) en compañía del río Fucha y Tunjuelo (subcuencas que vierten sus aguas directamente sin ningún tratamiento previo), de manera que se realizan estos tres vertimientos a la cuenca del río Bogotá.

Considerando el principio ambiental “de la cuna a la tumba” [7], la responsabilidad de la capital está en tratar las aguas residuales y devolver así el recurso hídrico a la fuente receptora en el mismo estado en el que fue captado hasta su concentración ambientalmente aceptable. Según lo mencionado, Bogotá carece de un sistema de tratamiento adecuado para la descontaminación de los vertimientos, para lo cual, hacia el 2008, se tomó la decisión de poner en marcha soluciones en cuanto a obras sanitarias con la ampliación de la PTAR Salitre para el año 2022 a través de la implementación de un sistema secundario convencional de lodos activados con ampliación de caudal a 8 m<sup>3</sup>/s y la construcción de la PTAR Canoas para el 2027 a través del tratamiento de las aguas provenientes de las cuencas Fucha y Tunjuelo, con una capacidad de 16 m<sup>3</sup>/s y remoción de sólidos totales en suspensión (SST) en un 40 %. Con dichas obras sanitarias se pretende disminuir el impacto negativo de la ciudad sobre la calidad del recurso hídrico del río Bogotá.

En la presente investigación se evalúa que tanto se acercará Bogotá al manejo ambientalmente sostenible de los efluentes al río con el mismo nombre. Existen diferentes metodologías para identificar el mencionado impacto, pero la mayoría de estas no evidencian de manera cuantitativa el resultado esperado de dicha evaluación. En el estudio se aplicó la metodología de la huella hídrica, la cual se define como un indicador alternativo que permite evaluar los efectos de la contaminación en los vertimientos

al río Bogotá, así como los volúmenes de agua necesarios para ser vertidos a la fuente receptora con el fin de llevar la concentración de SST hasta su concentración ambiental.

Actualmente, la metodología de la huella hídrica se utiliza ampliamente con el fin de evaluar los impactos de los diferentes sectores consumidores del agua como el sector agrícola [8], industrial [9] y económico [10], entre otros. Existen estudios recientes en los que la metodología se aplica para evaluar el impacto de las PTAR sobre la calidad ambiental de los ríos [11].

El resultado de la investigación sirve de indicador para dar a conocer cómo la capital colombiana se acerca al uso sostenible y la calidad del recurso hídrico.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

Existen diferentes metodologías para evaluar impactos ambientales de diferentes actividades humanas sobre sistemas siconaturales. Entre estas se pueden relacionar la huella ecológica [12], la de carbono [13] y la de la huella hídrica [14], entre otros. En el estudio se utilizó el concepto de la “huella hídrica”, desarrollado en el 2002 por Arjen Hoekstra [15], porque resultados de evaluación de contaminación del agua se obtienen en unidades volumétricas que se pueden integrar a los estudios de demandas directas del agua y dar así a conocer de manera integral los efectos de uso y de contaminación del agua [16].

La huella hídrica total se compone de tres elementos diferenciados por los colores azul (demandas hídricas superficiales), verde (uso del agua evaporada) y gris (indicador de apropiación del agua dulce tanto para usos directos como indirectos [9] que integra los efectos de contaminación del recurso hídrico). Mediante el estudio de los efectos de los efluentes de la ciudad al río Bogotá se empleó el concepto de la huella hídrica gris que se relaciona con el volumen del agua necesario para diluir los contaminantes asociados a los vertimientos hasta el valor de la concentración natural ambiental en el río receptor [17].

## 3. METODOLOGÍA

Partiendo del concepto de la huella hídrica gris, esta se define a través de la siguiente ecuación:

$$HH_{gris} = \frac{L}{c_{m\acute{a}x} - c_{nat}} \quad (1)$$

Donde:

$HH_{gris}$  : huella hídrica gris, (volumen/tiempo);

$L$  : carga contaminante, (masa/tiempo);

$c_{m\acute{a}x}$  : concentración máxima aceptable, (masa/ volumen);

$c_{nat}$  : concentración natural en el cuerpo de agua receptora, (masa/volumen);

La evaluación de la huella hídrica gris de I Bogotá se aplicó para dos escenarios de tratamiento de aguas residuales.

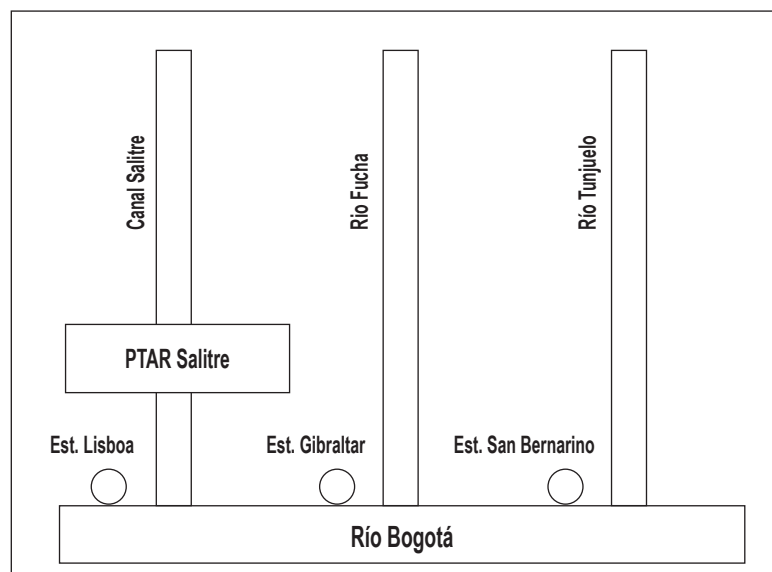
El primero se relaciona con las condiciones actuales a), en las que se cuenta con tres puntos de vertimiento al río Bogotá por las descargas de la PTAR Salitre y los ríos Fucha y Tunjuelo. A través de los dos últimos vertimientos se realizan descargas directas sin ningún tipo de tratamiento, mientras que el canal Salitre direcciona las aguas residuales a la PTAR con el mismo nombre, donde se hace el tratamiento primario de las aguas residuales. De este modo, la huella hídrica gris de la ciudad de Bogotá en el escenario actual se calcula sumando los tres componentes correspondientes a cada uno de los efluentes. Por la concentración natural se entiende la concentración de los SST aguas arriba del primer vertimiento realizado por Bogotá, correspondiente a la estación hidrológica Lisboa, monitoreada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). En cuanto a la concentración máxima permisible se adopta el valor de 90 mg/L estipulado según la Resolución 0631 de 2015 [18]. De esta manera, las ecuaciones para la definición de la huella hídrica gris de Bogotá en el escenario actual son las siguientes:

$$HH_{gris\ actual} = HH_{Salitre} + HH_{Fucha} + HH_{Tunjuelo} \quad (2)$$

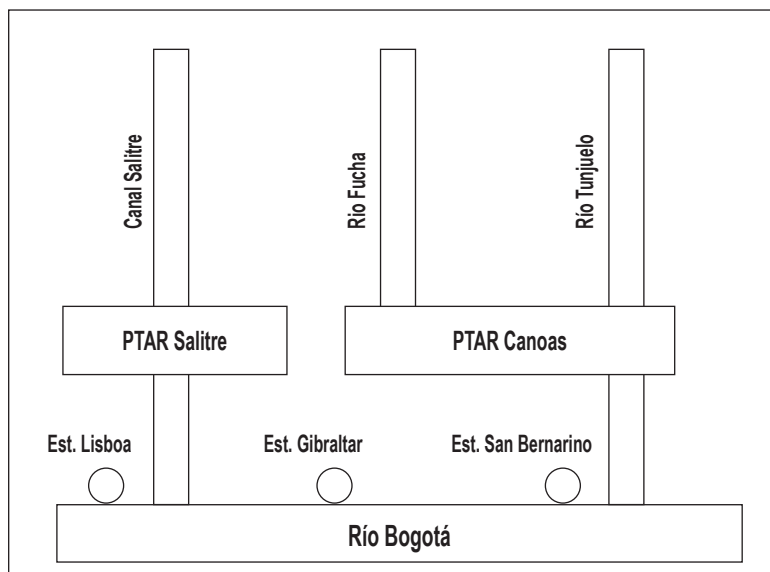
$$HH_{Salitre} = \frac{L_{Salitre}}{C_{m\acute{a}x} - C_{Lisboa}} \quad (3)$$

$$HH_{Fucha} = \frac{L_{Fucha}}{C_{m\acute{a}x} - C_{Lisboa}} \quad (4)$$

$$HH_{Tunjuelo} = \frac{L_{Tunjuelo}}{C_{m\acute{a}x} - C_{Lisboa}} \quad (5)$$



a) escenario actual



b) escenario futuro (2027)

**Figura 1. Escenarios de tratamiento de agua residual en la ciudad de Bogotá**

Fuente: elaboración propia.

El segundo escenario se proyecta hacia el 2027 con la terminación de obras de la ampliación de la PTAR Salitre y la construcción de la PTAR Canoas (Figura 1b).

Teniendo en cuenta que no se conoce con certeza la evolución de la contaminación del río Bogotá aguas arriba de la ciudad, para el escenario futuro, en razón a la concentración natural se tomará el mismo valor que el de SST en el escenario actual, correspondiente a la estación de calidad de agua Lisboa. Según lo mencionado, la huella hídrica gris de Bogotá representa la suma de los dos componentes asociados a la PTAR Salitre y Canoas.

$$HH_{gris\ futuro} = HH_{Salitre\ futuro} + HH_{Canoas} \tag{6}$$

Dónde:

$$HH_{Salitre\ futuro} = \frac{L_{Salitre\ futuro}}{c_{m\acute{a}x} - c_{Lisboa}} \tag{7}$$

$$HH_{Canoas} = \frac{L_{Canoas}}{c_{m\acute{a}x} - c_{Lisboa}} \tag{8}$$

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se consultaron datos de las diferentes entidades encargadas de la gestión del agua del río Bogotá, entre las que se encuentran la EAB, la CAR y la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) con los datos de monitoreo de la calidad del recurso hídrico.

En la Tabla 1 se presentan los valores de los SST y los caudales de descarga para la situación actual de Bogotá y la proyección de los parámetros de entrada asociados a la ampliación de la PTAR Salitre y la construcción de la PTAR Canoas con sus respectivas fuentes de información.

**Tabla 1. Datos iniciales para cálculo de la huella hídrica gris de Bogotá (escenario actual y futuro)**

Parámetro	Unidad	Valor	Fuente de la información
<b>Escenario actual</b>			
<i>PTAR Salitre</i>			
Q	(m <sup>3</sup> /s)	4,0	[19]
Carga	(% remoción)	60,0	[19]
SST	(mg/L)	30,0	[19]
<i>Río Fucha</i>			
Q	(m <sup>3</sup> /s)	9,2	
SST	(mg/L)	189,0	[20]
<i>Río Tunjuelo</i>			
Q	(m <sup>3</sup> /s)	6,7	[20]
SST	(mg/L)	346,0	[20]
<b>Escenario futuro</b>			
<i>PTAR Salitre</i>			
Q	(m <sup>3</sup> /s)	8,0	[19]
SST	(mg/L)	30,0	[19]
<i>PTAR Canoas</i>			
Q	(m <sup>3</sup> /s)	16,0	[21]
SST	(mg/L)	53,5	[22]

Fuente: elaboración propia.

Con base en los datos iniciales se calcularon los componentes de la huella hídrica gris para los dos escenarios en mención. Los resultados se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 2.

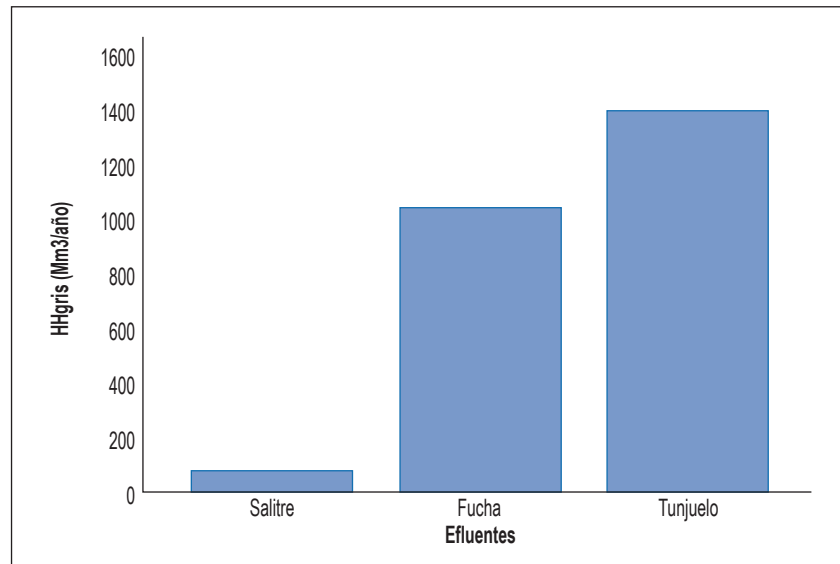
Tabla 2. Huella Hídrica gris de la ciudad de Bogotá

	Escenario actual			Escenario futuro		
	Parámetro	Un	Valor	Parámetro	Un	Valor
	$C_{Lisboa}$	(Kg / m <sup>3</sup> )	0,0185	$C_{Lisboa}$	(Kg / m <sup>3</sup> )	0,0185
	$C_{m\acute{a}x}$	(Kg / m <sup>3</sup> )	0,07	$C_{m\acute{a}x}$	(Kg / m <sup>3</sup> )	0,07
	PTAR Salitre			PTAR Salitre		
	Q	(m <sup>3</sup> / s)	4,0	Q	(m <sup>3</sup> / s)	8,0
	SST Salitre	(Kg / m <sup>3</sup> )	0,03	SST Salitre	(Kg / m <sup>3</sup> )	0,03
	L Salitre	(Kg / s)	0,12	L Salitre	(Kg / s)	0,24
	HH Salitre	(m <sup>3</sup> / s)	2,3319	HH Salitre	(m <sup>3</sup> / s)	4,66
		(Mm <sup>3</sup> / a\~no)	73,54		(Mm <sup>3</sup> / a\~no)	147,08
	Cuenca del r\~o Fucha			PTAR Canoas		
	Q	(m <sup>3</sup> / s)	9,17	Q	(m <sup>3</sup> / s)	16,0
	SST Fucha	(Kg / m <sup>3</sup> )	0,189	SST Canoas	(Kg / m <sup>3</sup> )	0,0535
	L Fucha	(Kg / s)	1,7331	L Canoas	(Kg / s)	0,8566
	HH Fucha	(m <sup>3</sup> / s)	33,679	HH Canoas	(m <sup>3</sup> / s)	16,646
		(Mm <sup>3</sup> / a\~no)	1062,1		(Mm <sup>3</sup> / a\~no)	524,97
	Cuenca del r\~o Tunjuelo					
	Q	(m <sup>3</sup> / s)	6,7			
	SST Tunjuelo	(Kg / m <sup>3</sup> )	0,346			
	L Tunjuelo	(Kg / s)	2,3182			
	HH Tunjuelo	(m <sup>3</sup> / s)	45,048			
		(Mm <sup>3</sup> / a\~no)	1420,6			

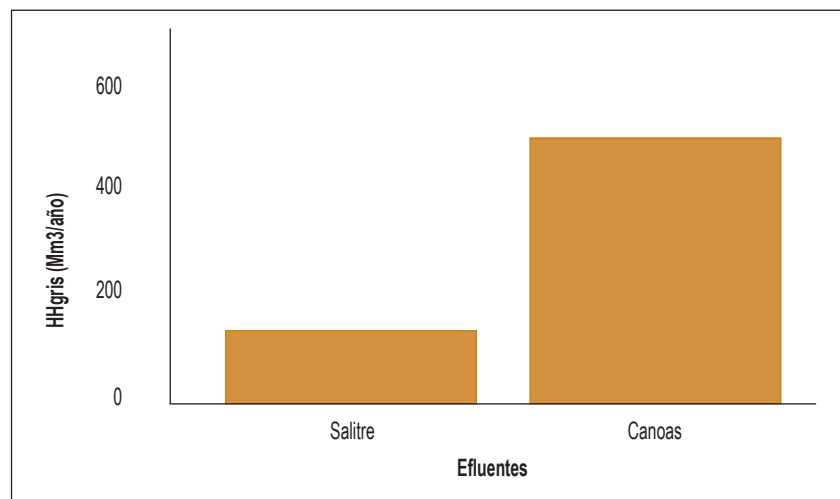
Fuente: elaboraci3n propia.

Al sumar los aportes de los afluentes de Salitre, Fucha y Tunjuelo en el escenario actual de tratamiento de aguas residuales, la huella hídrica gris de la ciudad es de 2556,30 mm<sup>3</sup>/año. Este valor equivale al volumen de agua que anualmente debería ser vertido al río Bogotá para diluir la carga contaminante de SST hasta su concentración natural. El 55,6 % (o 1420,65 mm<sup>3</sup>/año) pertenece al aporte del río Tunjuelo, el 41,55 % (o 1062,11 mm<sup>3</sup>/año) hace parte de la cuenca del río Fucha, y el 2,9 % (o 73,54 mm<sup>3</sup>/año) corresponde a la huella hídrica gris de la cuenca del río Salitre. De acuerdo con los datos obtenidos de la huella hídrica actual, se evidencia que el aporte más relevante se da por la cuenca del río Tunjuelo, en la cual se descargan los vertimientos de productos de industrias textiles y confeccionados para el uso doméstico, sector de curtiembres y bebidas, sector de producción, transformación y conservación de carne y derivados cárnicos [23]. Según los censos realizados, en la cuenca del río Fucha, como segundo aportante a la huella hídrica gris, se han encontrado más de 180 vertimientos industriales [23].

En razón a su aporte a la contaminación del río Bogotá se destacan talleres metalmecánicos, industrias de alimentos, químicos y de textil [24], mientras que el aporte del sector de curtiembres y otros tipos de vertimientos son relevantes para la cuenca del río Tunjuelo [23], pero no son significativos para la cuenca del río Fucha. De manera gráfica los resultados se presentan en la Figura 2.



a) Escenario actual



b) Escenario futuro (2027)

**Figura 2. Representación gráfica de la huella hídrica gris de la ciudad de Bogotá**

Fuente: elaboración propia.



Según los resultados del escenario futuro, la huella hídrica gris total de Bogotá será de 672,05 mm<sup>3</sup>/año. El 78,1 % de la huella hídrica gris se relaciona con la PTAR Canoas y el 21,9 % corresponde al aporte de la PTAR Salitre. El valor de la PTAR Canoas equivalente a los 524,97 Mm<sup>3</sup>/año implica la unión y tratamiento de vertimientos de los ríos Fucha y Tunjuelo de manera conjunta.

Las obras sanitarias del escenario futuro como son la ampliación de la PTAR Salitre y construcción de la PTAR Canoas generan una disminución de la huella hídrica gris total en 3,8 veces en comparación con el escenario actual de tratamiento de aguas residuales de Bogotá. En cuanto a la huella hídrica gris de la PTAR Canoas, a pesar de su alto grado de magnitud, es 4,7 veces menor que la de los ríos Fucha y Tunjuelo en el escenario actual.

Se hace necesario mencionar que el crecimiento del valor de la huella hídrica gris de la PTAR Salitre es aparente dado por las siguientes razones: en primer lugar, en los datos actuales de vertimientos del canal Salitre no se cuantifican en estadísticas oficiales tanto caudal como concentración de los SST de los volúmenes del agua que superan los 4 m<sup>3</sup>/segundo, no son tratados por la PTAR Salitre y se vierten directamente al río Bogotá. Por consiguiente, la huella hídrica del escenario actual de descargas no tiene en cuenta un componente que potencialmente puede incidir en el valor final de la huella hídrica gris de la cuenca Salitre. En adición, la huella hídrica del escenario futuro tiene en cuenta el aumento en el caudal tratado, lo que directamente lleva al aumento en el valor de la huella hídrica gris. Todos estos factores conjuntamente influyen en que el valor futuro de la huella hídrica gris sea mayor que la del escenario actual. Al contrastarlos, se observa que esta tendrá una disminución de un 73,3 %.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian el impacto positivo significativo que generará la ampliación de la PTAR Salitre y la construcción de la PTAR Canoas sobre el mejoramiento de la calidad del agua del río Bogotá, lo cual se evidencia en los valores cuantitativos del cálculo de huella hídrica en comparación con el escenario actual de tratamiento, así como en la disminución del impacto negativo por las descargas de la capital colombiana sobre la salubridad de la corriente.

A través de la cuantificación de la metodología de la huella hídrica en la calidad del recurso hídrico aplicado a los escenarios de tratamiento se conceptualiza la adecuación y optimización objeto de la gestión ambiental del agua de Bogotá en los valores de disminución de la huella hídrica gris que indican un avance en el tema de la gestión integral del recurso hídrico en la capital colombiana, donde hasta el momento la mayoría de las acciones se relacionaban con la gestión de los consumos del agua y el tema de las descargas de los vertimientos no estaba en orden de prioridad.

Considerando el principio ambiental “de la cuna hasta la tumba” [7], el manejo del recurso hídrico en la ciudad comienza a tener rasgos de integralidad, no solo al impactar los consumos del recurso hídrico, sino en la responsabilidad de la sociedad frente a la necesidad de tratamiento de las aguas residuales [27].

Vista la situación desde esta perspectiva, la disminución de la huella hídrica gris debe ser un proceso continuo con fines de minimizar las concentraciones de las sustancias contaminantes al río Bogotá. Este objetivo se puede lograr no solo con los procesos de tratamiento de aguas residuales en las PTAR, sino al promover políticas e incentivos de la producción limpia en las industrias que se encuentran en el perímetro urbano de la ciudad [28]. Eso permitiría lograr que las aguas residuales lleguen a las PTAR con menores concentraciones de sustancias contaminantes y se disminuya la huella hídrica gris de Bogotá.

En el estudio se demostró que la metodología de la huella hídrica puede servir como indicador para evaluar el acercamiento de las áreas urbanas al manejo sostenible de los vertimientos a través de los resultados numéricos. El método, en parte, puede ser complementado con la adición de la consideración de otros tipos de contaminantes conservativos y no conservativos para una evaluación integral del estado del recurso hídrico.

El estudio demuestra que, en los próximos años, Bogotá tendrá avances significativos en el tema de tratamiento de aguas residuales, de modo que disminuya de manera importante el aporte de los SST a la fuente receptora. No obstante, aplicando el principio de responsabilidad ambiental “de la cuna a la tumba”, el valor de huella hídrica debería ser igual a cero, y devolver las aguas de efluentes en el mismo estado en el que fueron extraídas de las fuentes abastecedoras de Bogotá.

## REFERENCIAS

- [1] D. N. Koons, T. W. Arnold y M. Schaub, “Understanding the demographic drivers of realized population growth rates», *Eco. App.*, pp. 2102-2115, 2017.
- [2] G. I. Andrade, F. Remolina y D. Wiesner, “Assembling the pieces: A framework for the integration of multi-functional ecological main structure in the emerging urban region of Bogotá, Colombia”, *Urb. Ecos.*, pp. 723-739, dic. 2013.
- [3] AEET, “La evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano”, *Ecos.*, 2007.
- [4] OAB, “Consumo promedio per cápita de agua en el sector público distrital-PIGAAGUA”, Bogotá D. C., 2008.
- [5] Eab, “Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado” Bogotá, 2006.
- [6] EAB, “Plan de saneamiento y manejo de vertimientos” Bogotá, 2016.
- [7] G. Mesa Cuadros, *Derechos ambientales en perspectiva de integralidad*. Bogotá D. C.: Universidad Nacional de Colombia, 2013.

- [8] J. G. Lozano Arango, D. Arévalo Uribe y J. Sabogal Mogollón, “Estudio nacional de huella hídrica Colombia, sector agrícola”, *Rev. Int. Sost., Tec. Hum.*, 2011.
- [9] C. M. M. Cardona y B. Congote Ochoa, “La Huella Hídrica, un indicador de impacto en el uso del agua”, *Rev. Tecn.*, pp. 20-25, 2013.
- [10] A. K. Chapagain, “Water footprint: state of the art: what, why, and how?” en *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, pp. 153-163, 2017.
- [11] L. Corominas, S. Morera y M. Poch, “Water footprint assessment in wastewater treatment plants”, Elsevier, pp. 4741-4748, 2016.
- [12] Y. Gu, H. Wang, Z. P. Robinson, X. Wang, J. Wu, X. Li, J. Xu y F. Li, “Environmental footprint assessment of green campus from a food-water-energy nexus”, *Ener. Proc.*, vol. 152, n.º 240, pp. 240–246, 2018.
- [13] R. Mendoza-Flores, R. Quintero-Ramírez y I. Ortiz, “The carbon footprint of a public university campus in Mexico City”, *Carb. Manag.*, vol. 10, n.º 5, pp. 501-511, 2019.
- [14] K. Kandananond, “The application of water footprint and six-sigma method to reduce the water consumption in an organization”, *Int. J. Geom.*, vol. 17, pp. 21-27, 2019.
- [15] A. Y. Hoekstra, “Water footprint network” , 1 dic. 2017. [En línea]. Disponible en: <http://waterfootprint.org/en/>
- [16] Y. Ivanova, E. A. Domínguez Calle y A. Sarmiento, “Evaluación del efecto sobre el metabolismo hídrico de la ciudad Bogotá como respuesta al cambio en el modelo de gestión del agua en los años 90”, *Amb. y Des.*, vol. 22, n.º 42, pp. 1-10, 2018.
- [17] A. Hoekstra, A. Chapagain, M. Aldaya y M. Mekonnen, *The water footprint assessment manual*. Londres, Washington: Earthscan, 2011.
- [18] MADS, “Resolución 0631 de 17 de marzo de 2015”, Bogotá D.C.: MInambiente, 2015.
- [19] CAR, “Plan de Gestión Social para el proyecto de ampliación y optimización de PTAR Salitre”, Bogotá D. C.: CAR, 2017.
- [20] SDA y Universidad de los Andes, *Calidad del recurso hídrico de Bogotá D. C.*, Bogotá D. C.: Ediciones Uniandes, 2012.
- [21] EAB, “Radicado E-2016-048599” EAAB, Bogotá D. C., 2016.
- [22] EAB, “Radicado-2017-098358” EAAB, Bogotá D. C., 2017.
- [23] IDEAM, “VI Fase de seguimiento de efluentes industriales y corrientes superficiales de Bogotá D. C.”, Ideam, Bogotá D.C., 2016.
- [24] SDA y EAAB, VIII fase del programa de seguimiento y monitoreo de efluentes industriales y corrientes superficiales de Bogotá D. C., Bogotá D. C.: SDA, 2015.
- [25] J. P. Rodríguez Miranda, C. A. García Ubaque y C. A. Zafra Mejía, “El análisis del ciclo de vida aplicado a las plantas de tratamiento de aguas residuales”, *Cien. Soc.*, pp. 617-636, 2016.
- [26] EAB, “Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá”, 2018. [En línea]. Disponible en: [http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/portal/%21ut/p/c5/hY09D4lwGIR\\_0nsUWmCsii0GqKZBgYUwGGwi4GD8\\_UJcXJS78bkPamj22L1c3z3dNHZ3qqgRbeTZ3laawYRsh1QmSST84LCRYua1aLdK6iDMAM-](http://www.acueducto.com.co/wpsv61/wps/portal/%21ut/p/c5/hY09D4lwGIR_0nsUWmCsii0GqKZBgYUwGGwi4GD8_UJcXJS78bkPamj22L1c3z3dNHZ3qqgRbeTZ3laawYRsh1QmSST84LCRYua1aLdK6iDMAM-)

POACu4PaG0PIJ\_pX1Z\_r4Siu9jplbHmcmVB\_AP\_7e\_cPyQBBV6Gq5UrqzUMVWCHkMFd7z1b4I-1vLc%21/dl3/d3/. [Último acceso: 15 02 2018].

- [27] H. Camacho-Oviedo, D. Campos-Núñez, I. Mercado Martínez, N. Cubillán-Acosta, y G. Castellar-Ortega, "Uso de las cáscaras de papa (*Solanum tuberosum* L) en la clarificación del agua de la Ciénaga de Malambo", *Inv. Inn. Ing.*, vol. 8, n.º 1, pp. 100-111, feb. 2020.
- [28] R. Campos Segura, "Contaminación en la cuenca alta del río Bogotá: diagnóstico y ensayo", *Épsilon*, pp. 191-202, 2010.

## CÓDIGO DE ÉTICA – REVISTA INGENIARE

INGENIARE es una revista de divulgación científica para todas las áreas de la ingeniería, la cual se publica con periodicidad semestral. Todos los trabajos son sometidos a un proceso de revisión doble ciega, sin excepción. Todos los autores que deseen publicar en la Revista INGENIARE deberán expresar por escrito el carácter original e inédito del manuscrito presentado, además de manifestar explícitamente el acogerse a las políticas de ética de la revista, considerando y evitando los siguientes casos:

1. Publicaciones redundantes
2. Plagio
3. Datos alterados o falsos
4. Conflicto de intereses

### I. PUBLICACIONES REDUNDANTES

En la carta de presentación de cada trabajo sometido a evaluación, los autores deben declarar explícitamente que éste no ha sido publicado total o parcialmente en otra revista científica. En caso de que se trate de la ampliación de un artículo ya publicado, debe declararse en el trabajo presentado.

Los trabajos presentados a la revista INGENIARE, puede detectarse la redundancia en estado de manuscrito, por alguno de los pares evaluadores, o en estado de artículo publicado, por parte de algún lector de la revista. En cualquier caso, ante el señalamiento de redundancia, el Comité Editorial procederá a realizar la respectiva investigación. En caso de encontrar que, en efecto, existe redundancia, se procederá a contactar a los autores, quienes deberán presentar por escrito una justificación del alcance de la redundancia, de la admisión de la culpa o del rechazo de la redundancia encontrada. El Comité Editorial estudiará el descargo presentado por el(los) autor(es).

- a. Si se trata de un artículo en revisión: De ser satisfactoria la explicación presentada, se procederá a rechazar el manuscrito y se notificará al(os) autor(es).
- b. Si se trata de un artículo publicado: De ser satisfactoria la explicación presentada, se notificará al(os) autor(es) y se les solicitará una carta donde se retracten, para ser publicada en la revista.

En cualquier caso donde el(los) autores no respondan a los requerimientos del Editor o el Comité Editorial, se contactará a la entidad donde los autores registran filiación sobre el caso, para notificar el caso y solicitar información de contacto de cada uno de los autores.

### II. PLAGIO

Todo manuscrito presentado a consideración para publicación en la Revista INGENIARE debe referenciar adecuadamente todas las fuentes bibliográficas utilizadas, incluyendo lo referente a gráficas, tablas, ilustraciones o cualquier otro aparte, señalando con claridad la fuente cuando se trate de terceros,

de acuerdo a los lineamientos del documento “IEEE Citation Reference” vigente (Consultar los lineamientos para los autores). Al presentar el escrito a la Revista, los autores deberán garantizar por escrito que el texto fue sometido a su adecuada revisión para evitar plagio.

Todos los trabajos recibidos por el Comité Editorial son sometidos a una revisión de coincidencias con respecto a otros trabajos. Si no se detecta plagio, al trabajo se le asignan pares evaluadores de acuerdo a su temática, para continuar con el proceso de evaluación. Si se detecta plagio en un manuscrito, se procederá de la siguiente forma:

- a. Plagio evidente [p. ej. presentación de una larga porción de texto o datos sin atribución explícita a la(s) fuente(s) originales, presentándolo como propios]: El editor contactará al autor, notificándole el rechazo del artículo junto con la evidencia de plagio. El Comité Editorial evaluará la posibilidad de notificar el caso a la entidad a la cual el(los) autores reportan filiación así como al(los) autor(es) del texto objeto de plagio.
- b. Plagio menor [p.ej. fragmentos pequeños de texto o frases donde aparece(n) la(s) referencia(s) mal citada(s)]. El Editor contactará al(los) autor(es), solicitándole las correcciones respectivas. Una vez se reciban, si las correcciones son satisfactorias, se continuará con el proceso editorial. De lo contrario, se procederá a rechazar el artículo definitivamente y se le notificará de la decisión al(los) autor(es) del manuscrito.

En caso de que el plagio se detecte posterior a la publicación del artículo, el Comité Editorial estudiará las acciones a tomar de acuerdo a lo señalado por el COPE, lo cual incluye, pero no está limitado a:

- Publicación de una retracción por parte de los autores.
- Informar a los autores del texto original sobre el plagio acontecido y las acciones a ejecutar.
- Informar a la institución a la cual está(n) afiliado(s) el(los) autor(es) sobre el caso de plagio acontecido.

### III. DATOS FALSOS

Todo artículo presentado a consideración para publicación en la Revista INGENIARE deberá partir de datos reales e información veraz, obtenidos por el(los) propio(s) autor(es) y señalando cuándo se parte de datos suministrados por fuentes secundarias o terciarias, en cuyo caso deberá mencionarse la fuente de manera explícita. Así mismo, deberá dársele a los datos un tratamiento objetivo y científico, sin someterlos a ningún tipo de procedimiento que los altere o sesgue para mostrar resultados favorables a la investigación cuando, en realidad, éstos muestren resultados parcial o totalmente desviados del objetivo de la investigación presentada. En caso de que los pares evaluadores de un manuscrito o los lectores del artículo ya publicado sospechen que un trabajo se basó en datos falsos o adulterados, deberán notificar el caso al editor de la revista INGENIARE, en cuyo caso se procederá a investigar bajo los criterios que plantea el COPE.

## IV. CONFLICTO DE INTERESES

Todo manuscrito presentado a la revista INGENIARE para su revisión deberá adjuntar una declaración firmada por todos los autores donde se declara que tanto la investigación como el artículo a publicar no presenta conflicto de intereses [por ej. Con la institución que financia el estudio o la institución a la cual están afiliados los autores]. En caso de detectarse conflicto de intereses por parte de los revisores del artículo, en el estado de manuscrito, o de denunciarse por parte de algún lector, en el evento en que el artículo sea publicado, el Comité Editorial de la revista procederá de acuerdo a los lineamientos señalados por el COPE.

## DIRECTRICES PARA AUTORES/AS

Ingeniare es una revista creada para la divulgación de los resultados de la investigación realizada en las distintas áreas de la ingeniería y ciencias afines, emitida con una periodicidad semestral. La Revista se ocupa de la publicación de artículos científicos producto de la investigación, sea esta básica o aplicada, siempre que procuren el desarrollo científico en los campos del saber relacionados con la Ingeniería.

De esta forma, Ingeniare pretende contribuir con la difusión e intercambio del conocimiento en los escenarios nacionales e internacionales, abriendo un espacio para la visibilidad de la producción científica, buscando también su consolidación como una fuente reconocida de consulta dentro de la comunidad académica y científica.

La Revista Ingeniare es editada por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Libre, Seccional Barranquilla. Actualmente, se encuentra indexada en la categoría C ante Publindex-Colciencias.

## I. TIPOS DE ARTÍCULOS

Con el fin de cumplir con los criterios de calidad científica requeridos por el Comité Editorial de la Revista Ingeniare, los artículos presentados deben cumplir con la siguiente tipología:

- Artículo de investigación e innovación. Documento que presenta la producción original e inédita, publicada en una revista de contenido científico, tecnológico o académico, resultado de procesos de investigación, reflexión o revisión, que haya sido objeto de evaluación por pares. Los artículos de investigación e innovación abarcan la siguiente subclasificación:
- Artículos de Investigación científica y tecnológica: Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
- Artículos de reflexión: Documento que presenta resultados de investigación terminada desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.

- Artículo de revisión: Documento resultado de una investigación terminada donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias.
- Artículo corto: Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren de una pronta difusión.

## II. ESPECIFICACIONES

Los artículos que aspiran a la publicación en esta Revista deben remitirse vía E-mail, al correo electrónico a los correos electrónicos [revistaingeniare@unilibrebaq.edu.co](mailto:revistaingeniare@unilibrebaq.edu.co) ó [rdelahoz@unilibrebaq.edu.co](mailto:rdelahoz@unilibrebaq.edu.co), junto con una carta de presentación del autor o autores firmada y dirigida al Comité Editorial de la Revista, indicando el título completo de trabajo y tipo de artículo, nombre del proyecto en que trabaja (si es investigador) y nombre del grupo de investigación al que pertenece. La carta debe certificar la originalidad y el carácter inédito del artículo al tiempo que su exclusividad para la Revista Ingeniare.

## III. PROCEDIMIENTO DE ENTREGA Y PUBLICACIÓN DE ARTICULOS

### 1. RECEPCIÓN:

El artículo se debe entregar, en formato impreso (original y dos copias) y en medio magnético, en archivo Word para Windows, igual para los cuadros y los gráficos en Excel, al Editor de la Revista, quien realiza una evaluación preliminar con el Comité Editorial.

### 2. EVALUACIÓN:

El Editor de la Revista enviará los diferentes artículos a pares evaluadores para que emitan un concepto profesional de la calidad del documento, así: Artículo publicable, artículo publicable con ajustes por parte del autor, artículo rechazado. El comité Editorial tendrá en cuenta estos conceptos para su publicación. De todas maneras, se comunicará a los autores sobre la decisión tomada.

### 3. CORRECCIÓN:

Si el artículo es publicable con correcciones, el autor será notificado de las correcciones anotadas por los pares y deberá entregar nuevamente el artículo con las correcciones señaladas, dentro del período de tiempo estipulado por el Editor de la Revista.

### 4. PUBLICACIÓN:

Una vez el artículo se recibe y se corrobora la realización de las correcciones o se trata de un artículo publicable sin correcciones, es enviado a prensa para su impresión. Al autor se le notifica la aceptación final del artículo con los datos de la publicación.



## IV. REDACCIÓN:

Los artículos deben cumplir con lo expuesto a continuación:

- Debe escribirse en papel tamaño carta (21,6 x 27,9 cm), a espacio y medio, incluyendo resumen, tablas, diagramas, figuras y referencias, etc. El artículo debe estar dentro de un margen de 2,5 cm en todos los lados.
- Los artículos deben redactarse con un alto nivel de corrección sintáctica, sin errores ortográficos ni de puntuación y que evidencien una precisión y claridad en las ideas.
- Cada una de las tablas que aparezca en el documento en Word deben estarelaboradas en Hoja de Cálculo, preferiblemente Excel.
- Las fotografías que apliquen para ser vinculadas al documento deben estar adjuntas en una carpeta digital independiente llamada imágenes en formato JPG.

## V. ESTRUCTURA

Los artículos presentados a la Revista Ingeniare deben llevar la siguiente estructura:

- Título: letra Arial 14, centrado y en mayúscula sostenida. Deberá referenciar a pie de página, título de la investigación, grupo y línea de investigación y nombre del investigador principal. El título debe ser presentado en español e inglés.
- Nombre completo del autor (es): letra Arial 12 y en pie de página en Arial 10 especificar sus títulos académicos, filiación institucional, dirección de correspondencia y email. También se puede incluir el grupo y línea de investigación al que pertenece, si se trata de un artículo de investigación.
- Resumen: letra Arial 12; debe contener entre 100 y 150 palabras, redactado en tercera persona y en tiempo pasado. Evite las citas textuales, las abreviaturas y las referencias bibliográficas.
- Abstract: el mismo contenido del resumen, escrito en idioma inglés.
- Palabras claves: letra Arial 12, entre 5 a 10 palabras que representen el contenido del documento.
- Keywords: son las mismas palabras escritas en el idioma inglés.
- Desarrollo del documento: 1. Introducción, 2.Revisión de la literatura, 3.Metodología, 4. Resultados y discusión, 5. Conclusiones y 6. Referencias. Debe emplearse como fuente Arial e interlineado 1,0 para todo el documento. Cada sección debe titularse usando números arábigos (1.2.3....), empleando negrita y mayúscula sostenida.
- Tablas, Diagramas y Figuras: deben estar en Arial 8, negrita y especificar la fuente o aclarar si fue elaborada por los autores del documento, al pie de la misma. (p.ej. "Tabla 1. Nombre de la tabla. Fuente: Elaboración de los autores").

- Referencias Bibliográficas: Corresponden a los textos referenciados en el artículo y deben aparecer al final del mismo. Cada referencia debe indicarse en números arábigos encerrados entre corchetes [ ] y en orden de aparición en el texto. Seguir el formato de norma IEEE. (Ver sección VII).

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Para las referencias bibliográficas se empleará el estilo definido por la IEEE, el cual emplea la asignación de un número arábigo consecutivo, encerrado entre corchetes, de acuerdo al orden de aparición dentro del documento. Este número debe corresponder a la fuente colocada en el listado final de referencias bibliográficas, organizando la información según su naturaleza así:

- Libros

[Número asignado] Iniciales del nombre del autor. Apellido(s). Nombre del libro en cursiva, no. edición, Ciudad de publicación, País: Editorial, año, capítulo (opcional), sección (opcional), páginas consultadas. Ejemplo: [1] S.N. Neftci, *Ingeniería financiera*. Ciudad de México, México: McGraw – Hill, 2008, pp.430-550.

- Capítulo de libro con editor principal

[Número asignado] Iniciales del nombre del autor. Apellido(s). “Nombre del capítulo del libro entre comillas,” en Nombre del libro en cursiva, no. edición, Ciudad de publicación, País: Editorial, año, capítulo (opcional), sección (opcional), páginas consultadas. Ejemplo: [2] F. Castrillón y R. Carvajal, “Materiales y diseño,” en *Introducción a la Ingeniería Sanitaria*, Z. Domínguez, Comp., Madrid: La muralla, 2007, pp. 99 – 114.

- Referencia de publicación seriada

[Número asignado] Iniciales del nombre del autor. Apellido(s). “Nombre del artículo entre comillas,” en Nombre de la publicación seriada, Vol. x, no. x, páginas consultadas, Abreviatura de la publicación seriada (opcional), mes/período, año. Ejemplo: [3] V. Charria, K. Sarsosa y F. Arenas. “Factores de riesgo psicosocial laboral: métodos e instrumentos de evaluación”, en *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, Vol. 29, n°. 4, pp. 380 – 391, diciembre, 2011.

- Artículo de revista electrónica

[Número asignado] Iniciales del nombre del autor. Apellido(s). (Año, Mes, día). Nombre del artículo. Nombre de la revista en cursiva [Tipo de medio]. No. Vol. (No. ejemplar), páginas consultadas. Disponible en: <http://www.direcciónweb> Ejemplo: [4] J. Areito Bertolín y A. Areito Bertolín. (2009, abr). Test de penetración y gestión de vulnerabilidad, estrategia clave para evaluar la seguridad. *Revista Española de Electrónica* [En línea]. (653), 1. Disponible en: [http://www.redeweb.com/\\_txt/653/abril\\_2009.pdf](http://www.redeweb.com/_txt/653/abril_2009.pdf)

## FORMATO DE EVALUACIÓN DE ARTÍCULOS

### INSTRUCCIONES

Le agradecemos por su participación como par evaluador de la Revista INGENIARE. A continuación encontrará el formato de evaluación de artículos bajo los criterios definidos por el Comité Editorial, los cuales se dividen en dos categorías:

- **Criterios generales**, buscan evaluar la unidad del artículo en cuanto a su presentación
- **Criterios sobre el aporte**, buscan determinar el aporte del artículo al cuerpo de conocimiento y el grado de innovación presentado en la metodología, resultados y conclusiones.

Estos criterios son evaluados en una escala de 1 a 5, donde **1 es DEFICIENTE y 5 es EXCELENTE**. Después de evaluar estos aspectos, debe emitir su concepto de la siguiente forma:

- **Aceptado:** el artículo puede ser publicado en su estado actual
- **Aceptado con correcciones:** el artículo puede ser publicado, sujeto a la presentación de las correcciones planteadas por usted
- **Rechazado:** El artículo no es publicable debido a aspectos fundamentales de fondo

Al final del artículo puede presentar las observaciones que considere necesarias a los autores para mejorar el escrito. En caso de ser rechazado debe explicar a los autores los motivos.

Su evaluación constituye un aporte fundamental a la calidad de nuestra revista.

¡Gracias!

**RICARDO DE LA HOZ L.**  
*Editor*  
*Revista Ingeniare*

# INGENIARE

NOMBRE DEL EVALUADOR:	
Lugar de Trabajo	
Cedula o Pasaporte	
NOMBRE DEL ARTÍCULO:	

## I. CRITERIOS GENERALES DEL ARTÍCULO (Marque con "X")

CRITERIOS	5	4	3	2	1
a) Originalidad					
b) Contenido					
c) Actualidad					
d) Calidad de las referencias consultadas					
e) Redacción y coherencia del texto					
f) Calidad de los datos					
g) Metodología					
h) Resultados obtenidos e implicaciones					

## II. CRITERIOS SOBRE EL APOORTE DEL ARTÍCULO (Marque con "X")

CRITERIOS	5	4	3	2	1
a) El estado del arte presentado en el artículo cubre literatura relevante sobre el tema					
b) Las referencias empleadas son pertinentes, de calidad y dan sustento a los argumentos presentados por los autores. Todas o su mayoría pertenecen a publicaciones en revistas científicas.					
c) Presenta aportes relevantes y de calidad al área de conocimiento sobre el cual versa el trabajo					
d) El artículo está acorde a la temática de la Revista Ingeniare					

## III. CONCEPTO SOBRE EL ARTÍCULO

Considera que el artículo evaluado debe ser (Marque con "X"):

Aceptado	
Aceptado con correcciones	
Rechazado	

**IV. OBSERVACIONES A LOS AUTORES** (Explicar de qué manera los autores pueden mejorar el escrito o los motivos por los cuales fue rechazado)