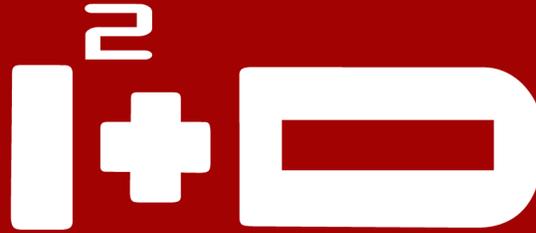




Uptc[®]
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia



INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

REVISTA I2+D

Ingeniería, Investigación y Desarrollo

Vol. 21 - No. 1 Enero - Junio 2021

RECTOR

Óscar Hernán Ramírez

VICERRECTOR ACADÉMICO

Manuel Humberto Restrepo Domínguez

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

Enrique Vera López

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO

Eduardo Avendaño Fernández

DECANO FACULTAD

Nelson Barrera Lombana

DIRECTOR / EDITOR

Jorge Enrique Espíndola Díaz

COMITÉ EDITORIAL Y CIENTÍFICO

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

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

MSc. Andrés Fernando Jiménez López
Universidad de los Llanos

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

Ph.D. Juan María Menéndez Aguado
Universidad de Oviedo

COMITÉ DE ARBITRAJE

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

MSc. Francisco Javier Ibargüen Ocampo
Universidad del Quindío

MSc. Heiner Castro Gutiérrez
Universidad del Magdalena

MSc. Nelson Javier Escobar Mora
Universidad Pontificia Bolivariana

MSc. Luis Carlos Olmos Villalba
Institución Universitaria Pascual Bravo

Ph.D. Carlos Arturo Ávila
Universidad de los Andes

Ph.D. José Ignacio Marulanda Bernal
Universidad EAFIT

Ph.D. Jeison Marín Alfonso
Universidad Pontificia Bolivariana

MSc. Ramiro Alejandro Plazas Rosas
Universidad del Valle

Esp. Carlos Gabriel Correa Chaparro
Fundación Universidad de América

MSc. Christian Ricardo Zea Forero
Pontificia Universidad Javeriana

MSc. Andrés Fernando Jiménez López
Universidad de los Llanos

MSc. William Fernando Álvarez Castañeda
Universidad Santo Tomás

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

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

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

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

ASISTENTE EDITORIAL / CORRECTOR DE ESTILO

Lic. Giseth Alexandra López López

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Esp. Vivian Espíndola Carvajal

Correspondencia Canje y Suscripciones a nombre

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

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

E-mail: revistaiid@uptc.edu.co

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

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

ISSN 1900-771X e-ISSN 2422-4324

Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo



TABLA DE CONTENIDO

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS PARA LA REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES EN LOS VERTIMIENTOS PRODUCIDOS EN LA MINERÍA DE CARBÓN EN EL MUNICIPIO DE GUACHETÁ, CUNDINAMARCA <i>Evaluation of techniques to reduce the concentration of sedimentable solids in the wastewater produced in the coal mining in the municipality of Guachetá, Cundinamarca</i> Sandra Liliana Chaparro Alba	5
ZONIFICACIÓN POR RIESGO DE EXPLOSIONES DE GAS METANO EN LA MINERÍA DEL CARBÓN EN BOYACÁ, COLOMBIA <i>Zoning for risk of methane gas explosions in coal mining in Boyacá, Colombia</i> Juan Sebastián Arteaga Hernández	18
MEJORA EN EL APROVECHAMIENTO DEL ESPACIO CÚBICO DE CONTENEDORES DE EXPORTACIÓN DE MANGUERAS EN UNA EMPRESA AGRO INDUSTRIAL EN EL PERÚ <i>Enhancing use of the cubic space of hose export containers in an agro-industrial company in Perú</i> Cristhian Giancarlo Aradiel Abad, Diego Ángel Dávila Vilchez, Tania Sthefany Gamboa Rojas, Gabriela Paola Veliz Ponce	27
APLICACIÓN INDUSTRIA 4.0 EN LOGÍSTICA DE RAPPI “ZONA T”, DE BOGOTÁ D.C., COLOMBIA <i>Industry 4.0 application on RAPPI logistics in “Zona T”, in Bogotá D.C., Colombia</i> Martha Lucia Belmonte Rodríguez, Rodrigo Eduardo Pardo Calderón, Luis Felipe Mogollón Loiza	32
APLICACIONES DE LA INDUSTRIA 4.0 EN LA ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LAS MERMELADAS <i>Applications of Industry 4.0 in the standardization of jams’ production process</i> Ángel Isaac Burgos Naranjo, Daniel Sebastián Vásquez Játiva, Danny Orlando Navarrete Chávez	39
ACELEROGRAMAS Y ESPECTROS DE RESPUESTA EN MEDIOS: SUELO Y ROCA, BOYACÁ, COLOMBIA <i>Comparison of accelerograms and response spectra in media: soil and rock, Boyacá, Colombia</i> Luis Humberto Pinto Morales, María del Carmen Fuentes Fuentes	47
ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF A MAGNETO-DIELECTRIC COMPOSED THROUGH AN ALGORITHM BASED ON THE NICOLSON-ROSS-WEIR METHOD <i>Propiedades electromagnéticas de un compuesto magneto dieléctrico a través de un algoritmo basado en el método Nicolson-Ross-Weir</i> Gabriel Peña Rodríguez, Rodrigo Vera Barrera, David Leonardo Mancipe, Luis Ángel Lara González	59

EDITORIAL

En el primer volumen del año 2021 de la Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo se presentan siete artículos los cuales pueden ser divididos en tres de las ramas de la Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Facultad Seccional Sogamoso, como lo son: 1) Ingeniería Industrial, 2) Ingeniería de Minas y 3) Ingeniería Geológica. Sin embargo, las investigaciones que se resumen en este volumen es fruto del carácter multidisciplinario de sus distintos autores.

Destacan en la rama de la Ingeniería Industrial, tres artículos, dos de ellos basados en el desarrollo de aplicaciones 4.0 en cadenas logísticas de distribución, o en los procesos de estandarización de técnicas en el sector productivo. Mientras que el tercer artículo, aborda los temas de optimización del espacio en contenedores. Todas las temáticas anteriormente mencionadas, constituyen técnicas novedosas que permiten el mejoramiento de procesos industriales, logísticos, transporte y productivos, tomando en cuenta soluciones amigables con el ambiente.

Los cuatro artículos restantes, se sitúan en el área de Ingeniería de Minas, Ciencias de la Tierra y Ciencias de los Materiales. La primera de estas investigaciones aborda una evaluación de técnicas existentes para la reducción de sólidos sedimentables en vertidos provenientes de la minería del carbón. La segunda investigación, se enfoca en una zonificación por riesgo de explosión por gas metano a lo largo del departamento de Boyacá, considerado como uno de los departamentos más sensibles con respecto a esta temática. El tercer artículo, al igual que el anterior, aborda los acelerogramas y espectros de respuesta en distintos suelos en nuestro departamento. Es importante mencionar que la presencia de fluidos, el grado de compactación del suelo, o la presencia de fallas podrían influenciar la respuesta de las ondas, y de esta manera la caracterización que se hace del medio podría resultar única.

Finalmente, en el último artículo, los autores emplean métodos computacionales, como el algoritmo de Nicolson-Ross-Weir para caracterizar las propiedades electromagnéticas de compuestos, o materiales que se usan en la rama de la ingeniería. Este método además permite analizar la homogeneidad de las propiedades analizadas, ya que cambios o pérdidas de las propiedades podrían ocasionar pérdidas significativas al momento de emplear determinados materiales.

Esperamos que este primer volumen del año 2021 sea de agrado para todos los lectores, y más aún quisiéramos aprovechar para invitarlos a someter sus manuscritos en los venideros números, toda esta sinergia permitirá no sólo una mejor clasificación de la revista, sino la visibilidad de la investigación que se realiza en el departamento de Boyacá, a través de alianzas de los docentes de la UPTC con la industria y con actores de diversas índoles (estado, industria, entre otros).

Mauricio Bermúdez
Profesor Escuela Ing. Geológica
UPTC, Facultad Seccional Sogamoso

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS PARA LA REDUCCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES EN LOS VERTIMIENTOS PRODUCIDOS EN LA MINERÍA DE CARBÓN EN EL MUNICIPIO DE GUACHETÁ, CUNDINAMARCA

Evaluation of techniques to reduce the concentration of sedimentable solids in the wastewater produced in the coal mining in the municipality of Guachetá, Cundinamarca

Sandra Liliana Chaparro Alba

Universidad Manuela Beltrán, Programa de Ingeniería Ambiental, Colombia.

Email: alba.sandraliliana@gmail.com

(Recibido el 10 de febrero de 2021 – Aceptado el 18 de junio de 2021)

Resumen

La filtración de aguas residuales superficiales y subterráneas es muy común cuando se avanzan labores de explotación minera, ya que se deben cruzar acuíferos subterráneos, bloques antiguos explotados y, dentro del proceso de extracción, se genera un asentamiento de los estratos que producen algún rango de subsidencia y fracturamiento, dando lugar a la filtración de estas aguas desde la superficie del terreno al interior de las minas. Las aguas residuales deben ser evacuadas nuevamente hacia la superficie, para lo cual es necesario conducir las a lo largo de las labores mineras (utilizando mecanismos como cunetas, mangueras y tuberías), proceso que tiende a contaminar el ambiente de polución minera, inclusive, con el contacto directo de las rocas de las excavaciones. Una vez conducidas a la superficie, por medio de electrobombas de gran capacidad y caudal, y dependiendo de la profundidad de las labores, estas aguas residuales deben ser manejadas en sistemas de tratamiento con el fin de realizar una limpieza, en este caso de las concentraciones de sólidos sedimentables y poder ser vertidas a las fuentes cercanas, para ser reutilizadas en procesos diferentes al consumo humano. El presente estudio evaluó de manera técnica, económica y ambiental, tres alternativas de tratamiento de aguas, donde se obtuvo resultados de la alternativa 1 Coagulación-Floculación, un porcentaje de eficiencia del 99,12%, un costo total de instalación de \$17'363.978 pesos y una afectación ambiental baja, simulado con el software SuperDecisions® que la Alternativa 1 Coagulación-Floculación tiene el ranking número 1, seguido de la alternativa Carbón Activado con ranking número 2 y, por último, el mantenimiento del sistema con ranking 3.

Palabras Clave: *aguas residuales, minas de carbón, sólidos sedimentables, metodología AHP.*

Abstract

The filtration of surface and groundwater is very common when mining works is advancing, since underground aquifers, old blocks exploited must be crossed and within the extraction process, a settlement of the strata that produce some range of subsidence and fracture of these is generated, resulting in the filtration of these waters from the surface of the ground to inside of the mines. This wastewater must be evacuated back to the surface, which it is necessary to conduct it throughout the mining works (using mechanisms such as ditches, hoses and pipes), tending to contaminate with the environment of mining pollution and the same direct contact with the rocks of the excavations. Once driven to the surface, by means of pumps of great capacity and flow depending on the depth of the work, these wastewaters must be managed in treatment systems in order to perform a cleaning in this case of the concentrations of sediment solids and be able to be discharged to nearby sources, to be reused in processes other than human consumption. The present study evaluated in a technical, economic and environmental way three water treatment alternatives, getting results from alternative 1 Coagulation-

Flocculation, an efficiency percentage of 99.12%, a total installation cost of \$17,363,978 Colombian money, and a low environmental affectation, simulating with the SuperDecisions® software, that Alternative 1 Coagulation-Flocculation has the ranking number 1, followed by the alternative Activated Carbon with ranking number 2 and, finally the maintenance of the system with ranking 3.

Key Words: *wastewater, coal mines, sedimentable solids, AHP methodology.*

1. INTRODUCCIÓN

Para el trabajo de investigación, se realiza un diagnóstico del sistema actual de tratamiento de aguas residuales construido dentro del proyecto minero, el cual es comúnmente utilizado en las minas de la región, desde el punto de vista de los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua y del diseño hidráulico de este, con el fin de evaluar sus falencias con respecto a la eficiencia del sistema y su diseño hidráulico. En la Resolución No. 0631 del 17 de marzo del 2015, se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deben cumplir los vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

A partir de la normatividad vigente, se evalúan los parámetros de calidad de agua, para lo cual se realizó un muestreo y análisis inicial de las aguas residuales mineras con un laboratorio de aguas certificado, los resultados fueron tomados como base de comparación con la Resolución 0631 de 2015, con lo cual se determinó que el único parámetro que no cumple con la norma, es del Sólidos Sedimentables (SED). Así también, se evalúa técnicamente el diseño hidráulico del sedimentador principal desde sus dimensiones calculadas y construidas, así como, del caudal actual de la mina que alimenta el sistema.

En este sentido, para la reducción del parámetro de SED, se formulan tres alternativas técnicas para mejorar su eficiencia, las cuales se denominan Alternativa 1, Coagulación-Floculación; Alternativa 2, mantenimiento y limpieza del sistema de tratamiento actual y; Alternativa 3, construcción de un filtro de carbón activado. Para cada una de estas alternativas se evalúa la eficiencia técnica, un análisis de costos y la afectación ambiental. De tal

manera que, la elección provea la mejor alternativa que deba ser implementada; para lo cual se utiliza la metodología de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) por sus siglas en inglés, la cual usa una matriz de valoración de intensidad de importancia, que realiza una comparación paritaria, asignado según una escala de valores de uno (1) a nueve (9) y el grado de importancia de acuerdo a los mejores y peores resultados obtenidos en el proceso de cálculo de la eficiencia técnica, análisis de costos y afectación ambiental de cada alternativa, que toma como mejor opción la correspondiente al ranking 1. En últimas, la evaluación de técnicas presentada, tiene como fin que ingenieros ambientales, personal técnico y empresarios mineros de la zona, tengan una base que puedan replicar en sus unidades productivas, como solución para la reducción de SED, cumpliendo con el objetivo de mejorar la calidad del vertimiento, la aprobación de los permisos por parte de la autoridad ambiental y la calidad ambiental de la región.

2. CONTEXTO GEOGRÁFICO

El proyecto minero sitio de estudio, está ubicado en el municipio de Guachetá, Vereda "El Rabanal", departamento de Cundinamarca, dentro del área del título minero 1967t, de la empresa Minera Columbia Coal Company S.A. Para acceder al lugar se toma la vía principal que conduce de la ciudad de Bogotá al municipio de Ubaté y de este al municipio de Guachetá, con una distancia total de 118 Kilómetros. En la Figura 1 se observa la ubicación del área de estudio. El área de concesión minera tiene una extensión de 61 hectáreas, y se encuentra a una altitud entre los 2.620 a 2.900 metros sobre el nivel del mar con una temperatura media entre 12° y 14°C. Las aguas del vertimiento llegan a un canal efluente del río Lenguazaque, las cuales son utilizadas

para diferentes procesos agroindustriales; por ejemplo, el regadío de pastos para semovientes, afectando no solamente el agua sino también al suelo y a los animales [1].

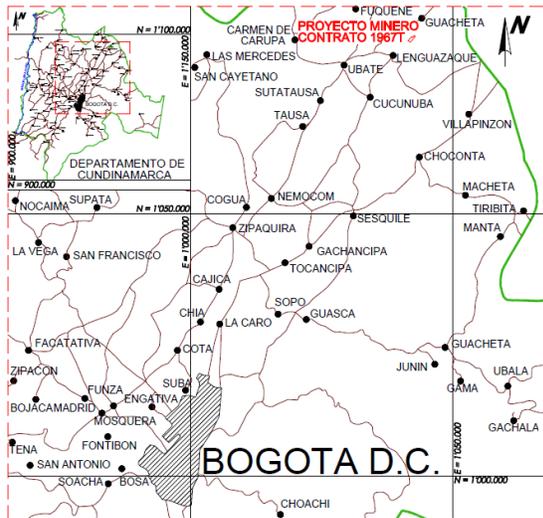


Figura 1. Ubicación del área del proyecto.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La elección de la mejor alternativa para la reducción de SED, inicia con un diagnóstico del sistema de tratamiento actual del proyecto, midiendo parámetros fisicoquímicos de calidad de agua, según la normatividad aplicada sobre aguas residuales en la industria minera y del diseño hidráulico del sistema en cuanto al cumplimiento de sus dimensiones. En la Figura 2, se observa la distribución del sistema de tratamiento del proyecto minero.



Figura 2. Sistema de tratamiento actual de aguas residuales.

Se evalúa técnicamente el diseño hidráulico del sedimentador principal, a partir de sus dimensiones y del caudal actual de la mina que alimenta el sistema. Para esta evaluación se utilizaron las fórmulas resumidas en la Tabla 1, según los parámetros que deben ser evaluados en el diseño.

Tabla 1. Fórmulas de diseño hidráulico cálculo tanque de sedimentación.

Nombre de la Fórmula	Ecuación	Parámetros	N°
Velocidad de Sedimentación	$V_s = \frac{1}{18} g \left(\frac{\rho_s - 1}{\eta} \right) d^2$	<p>V_s: Velocidad de sedimentación (cm/seg)</p> <p>d: Diámetro de la partícula (cm)</p> <p>η: Viscosidad cinemática del agua (cm²/seg)</p> <p>ρ_s: Densidad relativa de carbón</p>	(1)
Área Superficial	$A_s = \frac{Q}{V_{sed}}$	<p>A_s: Área superficial (m²)</p> <p>Q: Caudal de diseño (m³/seg)</p> <p>V_{sed}: Volumen del sedimentador (m)</p>	(2)
Velocidad horizontal	$V_H = \frac{100 \times Q}{B \times H}$	<p>Q: Caudal de diseño (m³/seg)</p> <p>B: Ancho del sedimentador (m)</p> <p>H: Altura del sedimentador (m)</p>	(3)
Tiempo de retención	$T_o = \frac{A_s \times H}{3600 \times Q}$	<p>A_s: Área superficial (m²)</p> <p>Q: Caudal de diseño (m³/seg)</p> <p>H: Altura del sedimentador (m)</p>	(4)

Número de orificios	$A_o = \frac{Q}{V_o}$	A_o : Área total de orificios (m ²) Q : Caudal de diseño (m ³ /seg) V_o : Velocidad de orificios (m/seg)	(5)
	$n = \frac{A_o}{a_o}$	a_o : Área de cada orificio (m ²) n : número de orificios	

Área del sedimentador	$A = \frac{V_{sed}}{H}$	V_{sed} : Volumen del sedimentador (m ³) H : Altura del Sedimentador (m) A : Área del sedimentador (m ²)	(6)
-----------------------	-------------------------	--	-----

Ancho del sedimentador	$a = \sqrt{\frac{A}{2}}$	a : Ancho de sedimentador A : Área del sedimentador	(7)
------------------------	--------------------------	--	-----

Longitud del sedimentador	$L = \frac{A}{a}$	L : Longitud del sedimentador A : Área del sedimentador a : Ancho de sedimentador	(8)
---------------------------	-------------------	---	-----

3.1. Alternativas de diseño para optimización técnica

Se estudian tres alternativas para el mejoramiento de la calidad del agua, las cuales se denominan: coagulación-floculación, mantenimiento y limpieza del sistema de tratamiento actual y la construcción de un filtro de carbón activado. En la Figura 3, se observa el diagrama de flujo del procedimiento que se lleva a cabo para la evaluación de la eficiencia de las alternativas.

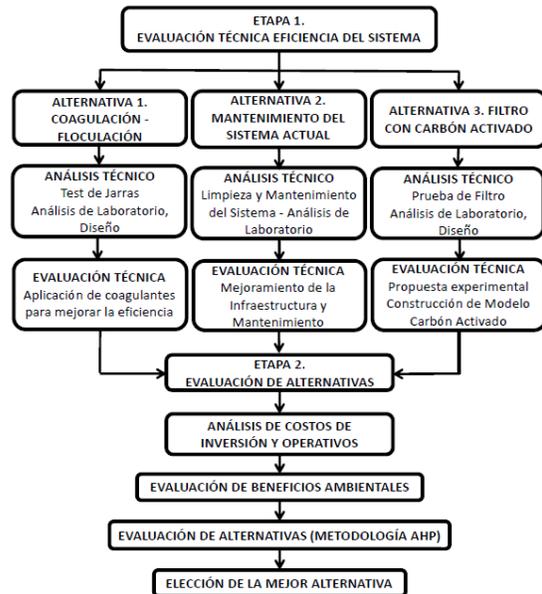


Figura 3. Diagrama de flujo para elección de alternativas.

Alternativa 1. Coagulación – Floculación. Se tomaron un total de diez (10) litros de agua los cuales se analizaron teniendo en cuenta las principales variables o parámetros de control de índole técnico de importancia dentro de la investigación, utilizando los respectivos instrumentos: pH (pH-metro), turbidez (Turbidímetro), sólidos sedimentables (cono Imhoff), y alcalinidad (titulación), en el laboratorio de aguas.

En el procedimiento de coagulación – floculación se realiza una prueba de test de jarras con el fin de observar el comportamiento de los sólidos frente a dos agentes coagulantes (sulfato de aluminio y cloruro férrico). Las variables a considerar en el diseño experimental son las características del Floc y su clasificación de acuerdo al índice Wilcomb, mediante la adición de Sulfato de Aluminio o Cloruro Férrico en cantidades de 1 mL, 3 mL y 5mL, comparando los resultados de los parámetros fisicoquímicos iniciales, y los resultados obtenidos después del ensayo de laboratorio. El procedimiento se lleva a cabo con los pasos que se observan en los diagramas de flujo de las Figuras 4 y 5.

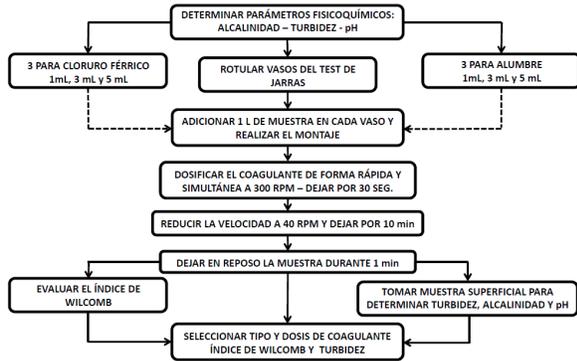


Figura 4. Diagrama de flujo prueba de jarras.

Se observa las características del Floc y se clasifica de acuerdo al índice de Wilcomb. (Ver Tabla 2 y Figura 6).

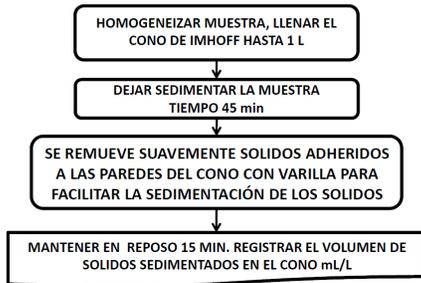


Figura 5. Diagrama de flujo prueba de cono Imhoff.

Tabla 2. Índice Wilcomb [2].

Nº	Descripción
0	Floc coloidal. Sin signo de aglutinación
2	Visible. Muy pequeño, casi imperceptible para observadores no entrenados.
4	Disperso. Bien formado, pero no uniformemente distribuido. Sedimenta muy lentamente o no sedimenta.
6	Claro. Floc de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud.
8	Bueno. Floc que se deposita fácil, pero no completamente.
10	Excelente. Floc que se deposita todo dejando el agua cristalina.

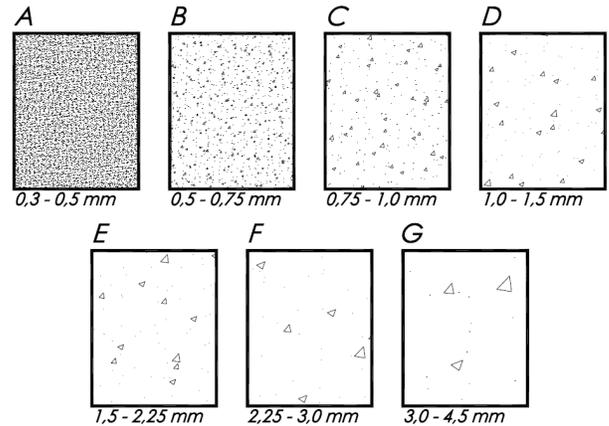


Figura 6. Índices de Wilcomb para determinar el tamaño del floculo [3].

Evaluación del tipo de coagulante: Se realiza el test de jarras y se evalúa el índice de Wilcomb, para los dos coagulantes adicionados, seleccionado el que mejor arrastre tenga para evaluar su dosis óptima.

Evaluación de la dosis óptima de coagulante: Una vez analizado y elegido del test de jarras, el coagulante cuyo resultado da el mayor valor de índice Wilcomb, se utiliza una dosis (en mL) por encima y una por debajo, para calcular la dosis óptima de coagulante. Para la realización de los cálculos de los parámetros de Sólidos Sedimentables, dosis de solución de coagulante y titulación, se utiliza las ecuaciones descritas a continuación en la Tabla 3:

Tabla 3. Fórmulas para cálculo de parámetros sólidos sedimentables

Nombre de la Fórmula	Ecuación	Parámetros	Nº
Sólidos Sedimentables Totales	$SST = \frac{W_f - W_i}{\text{Vol. muestra} \times 1000}$	W _f = Peso Final de Muestra W _i = Peso Inicial de muestra	(9)

Dosis de Solución de Coagulante	$V_i \times C_i = V_f \times C_f$	<p>V_i = Volumen de Sulfato de aluminio o Cloruro Férrico a dosificar.</p> <p>C_i = Concentración solución de Cloruro Férrico o Sulfato de Aluminio inicial</p> <p>V_f = Volumen del agua de mina a analizar</p> <p>C_f = Concentración deseada de sulfato de aluminio o cloruro férrico</p>	(10)
Ecuación de titulación	$N_A \times V_A = N_B \times V_B$	<p>N_A = Normalidad del ácido</p> <p>V_A = Volumen de ácido</p> <p>N_B = Normalidad de la base</p> <p>V_B = Volumen de la base</p>	(11)

Cálculo de la eficiencia del sistema: Se calcula la eficiencia del sistema para la alternativa 1, utilizando la ecuación (12) descrita a continuación, según los datos resultantes de turbiedad en el análisis de laboratorio y comparado con el dato de entrada antes de realizar los análisis de laboratorio.

$$\% \text{ Eficiencia Alternativa} = 1 - \frac{\text{Turbiedad de Salida}}{\text{Turbiedad de Entrada}} \times 100\% \quad (12)$$

Alternativa 2. Mantenimiento del sistema actual. Se realiza el mantenimiento y limpieza del sistema actual de tratamiento de aguas residuales, retirando del sedimentador y los depósitos de almacenamiento los

lodos existentes (ver Figura 7). Una vez se culmina la limpieza del sedimentador se realiza el llenado del mismo, y tiempo más tarde se vuelve a tomar una muestra puntual del agua considerando el sistema limpio, con fines de analizar su comportamiento. Se realiza el análisis de los parámetros de pH, turbidez, sólidos sedimentables y alcalinidad, a la muestra tomada.



Figura 7. Mantenimiento y limpieza del sistema actual

Alternativa 3. Carbón Activado. Para la alternativa de carbón activado se construye y evalúa el montaje de un diseño experimental, el cual simula el paso del agua residual de la muestra tomada por un sistema de filtro de múltiples etapas, con el fin de obtener los parámetros de calidad del agua y, posteriormente, compararlos con los análisis de la caracterización inicial. Un Filtro Grueso Dinámico (FGDi) consiste en dos o más unidades compuestas de tres capas de grava de diferente tamaño, desde gruesa en la parte inferior hasta fina en la superficie.

El agua se filtra a través del lecho de grava desde la superficie hasta el fondo, alcanzando el sistema de drenaje, desde el cual fluye a la siguiente unidad de tratamiento. El diseño de un FGDi debe tener una velocidad de filtración entre 0,5 y 2,0 m/h de acuerdo a la Organización Panamericana de la Salud/Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria [4], debe estar ente 2 y 3 m/h. Se debe tener en cuenta las ecuaciones de la Tabla 4 y sus parámetros, para el diseño y construcción del filtro grueso dinámico como alternativa real para su tratamiento.

Tabla 4. Fórmulas para cálculo del diseño de Filtro Grueso Dinámico FGDí.

Nombre	Ecuación	Parámetros	N°
Diámetro del tanque	$D = \sqrt{\frac{144 * Q}{\pi * V_f}}$	Q = Caudal (ml/cm) Vf = Volumen de filtración (m/h) 144 = Factor de corrección de Unidades D = Diámetro (cm)	(13)
Velocidad de filtración	$V_f = \frac{144 * Q}{\pi * D^2}$	Q = Caudal (ml/cm) Vf = Volumen de filtración (m/h) 144 = Factor de corrección de Unidades D = Diámetro (cm)	(14)

En la Figura 8, se observa el modelo a escala construido y utilizado en este diseño experimental, el filtro de carbón activado y su posterior evacuación del agua residual al almacenamiento para ser analizada de acuerdo con sus parámetros. En la construcción del diseño se realizó el tamizaje de los lechos filtrantes según la Norma Técnica Colombiana [5], pasándolos por mallas tamiz 8 para granulometría 2,73 mm (grava pequeña), y tamiz ½ pulgada para granulometría de 1,25 mm (grava gruesa). El carbón activado es de granulometría de 3 milímetros. A la muestra después del paso por el filtro, se le realiza el respectivo análisis de laboratorio de los parámetros de pH, turbidez, sólidos sedimentables y alcalinidad, con el fin de calcular su eficiencia y poder comparar la alternativa con las otras dos alternativas propuestas.



Figura 8. Esquema experimental tratamiento con carbón activado.

3.2. Evaluación de Costos para las alternativas

Se realizó la evaluación de los costos que interviene en cada una de las tres alternativas, tomando en cuenta las inversiones a realizar y los costos de operación, con el fin de ponderar cada alternativa desde el punto de vista de los costos totales para su evaluación y selección final. De esta manera, para los costos de inversión se tuvo en cuenta todos aquellos que implican la construcción de obras civiles, adquisición o alquiler de maquinaria y costos indirectos. Dentro de los costos de operación se toma en cuenta los costos en insumos, consumos de energía, mano de obra, impuestos, mantenimiento del sistema y construcción de obras.

3.3. Evaluación Ambiental de Alternativas

El método propuesto por Vicente Conesa Fernández-Vitoria [6], evalúa la importancia del impacto al valorar diferentes criterios de transformación (Ver Figura 9).

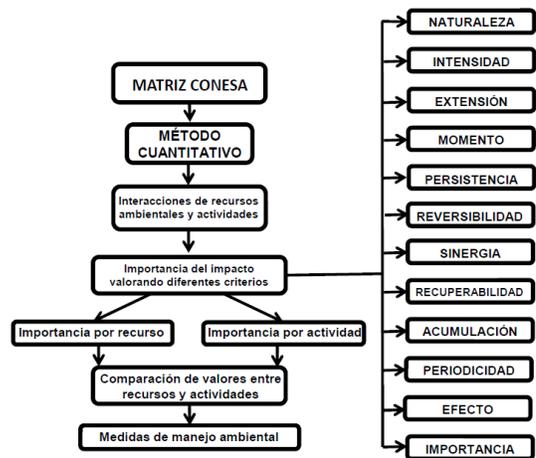


Figura 9. Diagrama del método de evaluación de impactos ambientales [6].

Las tres alternativas propuestas se evalúan con la matriz de Conesa, ya que este método permite valorar la importancia del impacto o afectación ambiental gracias a los criterios presentados en la Figura 9. Las siglas que representan los criterios de evaluación son: Naturaleza (N), Intensidad (IN), Extensión (EX), Momento (MO), Persistencia (PE), Reversibilidad (RV), Sinergia (SI), Acumulación (AC), Efecto (EF), Periodicidad (PR), Recuperabilidad (Mc), e Importancia (I). El valor de

importancia o afectación ambiental se obtiene de acuerdo a los siguientes valores: Mínimo Valor: 17, Máximo Valor: 100, 17 – 40: Tipo C, 41 – 60: Tipo B y 61 – 100: Tipo A. En donde se le otorga mayor relevancia a la intensidad y a la extensión. La importancia se evalúa aplicando la ecuación 15.

$$I = \pm (3 IN + 2 EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + Mc) \quad (15)$$

De este modo, se evalúa cada una de las tres alternativas desde el punto de vista ambiental, utilizando como método una matriz que permite ver los impactos hacia factores ambientales de las posibles acciones a ejecutar en cada una de las alternativas, como resultado, se refleja la información en relaciones causa-efecto. Al final se obtiene la relevancia de cada alternativa y, de acuerdo a esta, se le asigna el tipo de afectación según el rango.

3.4. Selección de la mejor alternativa

De tal manera que, se pueda seleccionar la mejor alternativa, se utiliza la metodología de priorización de actividades denominada AHP (*The Analytic Hierarchy Process*), la cual fue desarrollada por Thomas L. Saaty [7], en los años 1971 a 1975 en Wharton School (Universidad de Pensilvania, Filadelfia, Estados Unidos), diseñado con el fin de resolver problemas complejos de criterios múltiples. Este método se basa en un sistema de comparación por pares donde se contrastan dos criterios bajo el esquema de medición. En la Tabla 5, se resume la valoración o intensidad de importancia que se le da en la comparación de criterios y alternativas.

Tabla 5. Importancia de escala.

Importancia Paritaria	Definición
1	Igual importancia entre las dos
3	Moderada importancia de uno sobre otro
5	Esencial o fuerte importancia
7	Muy fuerte importancia
9	Extrema importancia
2,4,6,8	Valores intermedios

El esquema de asociación de criterios y alternativas que utiliza la metodología AHP se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Esquema de comparación entre criterios y alternativas.

En este sentido, los criterios establecidos dentro del estudio, son determinados de acuerdo a las tres alternativas propuestas de tipo técnico (eficiencia del sistema), costos totales y afectación ambiental, los cuales permiten cumplir con el objetivo, el cual persigue la optimización de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR de la mina “Cuartas”. De esta manera, los criterios aquí expuestos tienen aspectos cuantitativos y cualitativos, elementos que validan la toma de decisiones, así como, la jerarquización de alternativas. En la Tabla 6, se reúnen los criterios establecidos para el estudio, de acuerdo con lo señalado anteriormente.

Tabla 6. Criterios utilizados para la priorización.

Criterio Evaluado	Tipo de Asociación	
	Cualitativo	Cuantitativo
Eficiencia del Sistema		X
Afectación Ambiental	X	
Costos Totales		X

En concordancia, y para determinar la eficiencia del sistema, el valor tomado corresponde al porcentaje calculado de la eficiencia de remoción de turbidez para cada una de las alternativas. En la afectación ambiental, el valor tomado corresponde a la posible afectación negativa ejercida sobre el medio ambiente al ejecutar la actividad, esta es del tipo A Alta, tipo B Medio y tipo C Bajo. En el costo total el valor tomado corresponde al

costo de la inversión, operación y mantenimiento que es requerida para llevar a cabo la puesta en marcha de cada actividad. La matriz construida se simula utilizando el Software SuperDecisions® V.3.2., y se presenta al final en los resultados, comparando las tres alternativas efectuadas, según el grado de importancia en concordancia con los resultados obtenidos en cada una de las alternativas. Enseguida, gracias a los valores obtenidos en la comparación de criterios, se hace la priorización de alternativas. Como consecuencia, la aplicación del método AHP para priorización de proyectos, al final brinda un resultado o ranking que permite establecer el orden de la prioridad de cada alternativa, de esta manera, es posible seleccionar la mejor alternativa a ejecutar.

4. RESULTADOS

En la Tabla 7, se presenta los resultados del análisis de aguas inicial, comparado con la Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015, [8].

Tabla 7. Comparación parámetros fisicoquímicos versus norma.

Parámetro	Unidades	Extracción de carbón de piedra	Resultados Análisis
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	8,10
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00	26,00
Sólidos Sedimentables (SED)	mL/L	2,00	4,30
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	295,00

Cuando se realiza el análisis de la comparación con respecto a la calidad de agua, se observa que el único parámetro que no cumple con la norma es el de Sólidos Sedimentables (SED), con un valor resultante de 4,3 mL/L

y en donde la norma exige un total de 2 mL/L, para su cumplimiento.

4.1. Comprobación del diseño hidráulico del sistema actual

En la Tabla 8, se reúnen las dimensiones calculadas para el sedimentador y se compara con las dimensiones del actual sistema, para evaluar su capacidad y correcto diseño.

Tabla 8. Dimensiones actuales y calculadas del sedimentador.

Dimensiones	Sedimentador Actual	Sedimentador Calculado	Ecuación utilizada
Área (m ²)	14,5	11,6	(2)
Ancho (m)	2,4	2,4	(7)
Longitud (m)	6,12	5,2	(8)
Altura (m)	1,2	2	(2)

4.2. Parámetros fisicoquímicos del vertimiento

Se realiza un análisis en laboratorio de sólidos sedimentables, pH, temperatura y turbiedad, teniendo en cuenta sus resultados, de tal manera que, más adelante, se puedan contrastar las eficiencias técnicas de las alternativas. El resultado de los parámetros iniciales se resume en la Tabla 9, en donde se observa que el parámetro de los sólidos sedimentables da un valor de 5 mL/L incumpliendo con la norma.

Tabla 9. Resultados parámetros fisicoquímicos del vertimiento sistema actual.

Parámetro	Valor Obtenido
pH	8,36
Temperatura (°C)	18,9
Turbiedad (NTU)	65
Sólidos Sedimentados (mL/L)	5

4.3. Evaluación técnica de alternativas de eficiencia del tratamiento

Alternativa 1. Coagulación – Floculación. El coagulante que presenta un mejor arrastre es el Cloruro Férrico 4000 partes por millón (PPM) en volumen de solución de 5 mL; es decir, una concentración de 4000 mg/L. Los resultados obtenidos en laboratorio del test de jarras se ilustran en la Tabla 10.

Tabla 10. Índice Wilcomb obtenido para los coagulantes adicionados.

Coagulante	Volumen de la Solución a aplicar (mL)	Dosis de coagulante a aplicar (mg/L)	Índice Observado
Alumbre (4000 PPM)	1	4	2
	3	12	4
	5	20	4
Cloruro Férrico (4000 PPM)	1	4	6
	3	12	6
	5	20	8

Evaluación de la dosis óptima de coagulante. Una vez se analiza y se elige el coagulante Cloruro Férrico en volumen de solución a aplicar de 5 mL, dosis de coagulante de 20 mg/L, se calcula la dosis óptima tomando un volumen o cantidad de un (1) mL por encima y un (1) mL por debajo, los valores se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11. Dosis óptima de coagulante Cloruro Férrico.

Coagulante	Volumen de la Solución a aplicar (mL)	Dosis de coagulante a aplicar (mg/L)	Índice Observado
Cloruro	5	20	8
Férrico (4000 PPM)	4	16	6
	6	24	4

Según los resultados obtenidos, el coagulante eficiente es el Cloruro Férrico con una dosis óptima de 20 mg/L y un índice Wilcomb de 8.

Alternativa 2. Mantenimiento del sistema actual. Después del mantenimiento del sistema actual de tratamiento de aguas, se llena nuevamente para posteriormente realizar al agua un análisis de parámetros fisicoquímicos, generando los resultados resumidos en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados finales mantenimiento sistema actual.

Parámetro	Valor Obtenido
pH	7,71
Temperatura (°C)	20,6
Turbiedad (NTU)	26,91
Alcalinidad (PPM)	9,5

Alternativa 3. Prueba de filtro de carbón activado. En la Tabla 13, se resumen los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos una vez se pasa la muestra de agua por el diseño experimental del filtro de carbón activado.

Tabla 13. Resultados muestra filtro carbón activado.

Parámetro	Valor Obtenido
pH	5,0
Temperatura (°C)	20,0
Turbiedad (NTU)	3
Alcalinidad (PPM)	3,2

4.3.1. Resumen de resultados de las alternativas. En la Tabla 14, se exponen los resultados obtenidos en laboratorio de los parámetros fisicoquímicos de las alternativas propuestas.

Tabla 14. Resumen de resultados pruebas de laboratorio para las alternativas.

Alternativa	PH (Unidades de PH)	Tempe- ratura (°C)	Turbie- dad (UTN)	Alcalinidad (mg/L de CaCO ₃)	Eficiencia del Sistema (%)
Parámetros					
Estado Inicial	8,36	18,9	65	10,5	-
Coagulación					
-	7,67	19,9	0,57	9,2	99,12
Floculación					
Limpieza					
Sistema Actual	7,71	20,6	26,91	9,5	58,60
Filtro					
Carbón Activado	5,00	20,0	3	3,2	95,38

4.4. Evaluación de costos para las alternativas

En la Tabla 15, se resume los resultados de los costos totales que se calculó para cada uno de los sistemas de tratamiento evaluados.

Tabla 15. Resumen de costos totales para alternativas.

Alternativas	Costos de Inversión (\$)	Costos de Operación (\$)	Costos Totales (\$)
Coagulación – Floculación	\$ 13'893.750	\$ 3'470.228	\$ 17'363.978
Mantenimiento Sistema Actual	\$ 0,00	\$ 3'413.256	\$ 3'413.256
Filtro de Carbón Activado	\$ 4'540.500	\$ 8'455.192	\$ 12'995.692

4.5. Evaluación de la afectación ambiental de las alternativas

En la Tabla 16, se realiza la comparación de los resultados de la valoración de la afectación ambiental y el valor de importancia para cada uno de los sistemas de tratamiento evaluados.

Tabla 16. Resumen de valoración ambiental para las alternativas

Alternativas	Valoración Ambiental	Valor de Importancia
Coagulación – Floculación	-29	BAJO
Limpieza Sistema Actual	-32	BAJO
Filtro Carbón Activado	-30	BAJO

4.6. Selección de la mejor alternativa

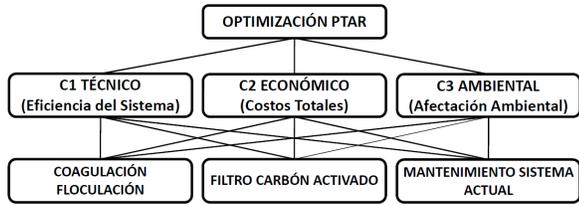
En la Tabla 17, se resumen los resultados finales obtenidos en los tres criterios analizados (eficiencia del sistema, costos totales y afectación ambiental), para las alternativas propuestas; valores de tipo cualitativos y cuantitativos, base para realizar la comparación paritaria según la metodología AHP.

Tabla 17. Valoración cualitativa y cuantitativa según cada alternativa

Criterios	Técnico	Ambiental	Económico
Alternativas	Eficiencia del sistema	Afectación Ambiental	Costos Totales
Coagulación – Floculación	99,12 %	BAJA	\$ 17'363.978
Limpieza Sistema Actual	58,60 %	BAJA	\$ 3'413.256
Filtro de Carbón Activado	95,38 %	BAJA	\$ 12'995.692

Para hacer el estudio de priorización de actividades se realiza un árbol de jerarquías para replicarlo en el software SuperDecisions® V.3.2.0 (Ver Figura 11).

Figura 11. Árbol de jerarquías replicado en el software SuperDecisions®.



Los resultados de la comparación paritaria son presentados en la Tabla 18.

Tabla 18. Valores obtenidos de la comparación paritaria.

Criterio	Afectación Ambiental	Costo Total	Eficiencia del Sistema	Comparación paritaria
Afectación Ambiental	1,0	7,0	9,0	0,048
Costo Total	7,0	1,0	7,0	0,191
Eficiencia del Sistema	9,0	7,0	1,0	0,761

Los resultados de la priorización de alternativas se presentan en la Tabla 19 y Figura 12.

Tabla 19. Priorización de las alternativas.

Alternativa	Eficiencia del sistema	Afectación Ambiental	Costos totales	Ranking
Coagulación-Floculación	0,642	0,637	0,052	1
Mantenimiento del Sistema	0,049	0,105	0,797	3
Carbón Activado	0,309	0,258	0,151	2

Figura 12. Resultados finales obtenidos del software SuperDecisions®.

Graphic	Alternatives	Total	Normal	Ideal	Ranking
	Coagulation Floculation	0.2644	0.5289	1.0000	1
	Filtro Carbon Activado	0.1381	0.2761	0.5221	2
	Mantenimiento Sistema Actual	0.0975	0.1950	0.3687	3

Al exponer la muestra a los procesos de Coagulación – Floculación (Alternativa 1) y Filtro de Carbón Activado (Alternativa 3), se precipitan los sólidos optimizando la eficiencia, la alcalinidad disminuye al igual que el pH, la temperatura aumenta de manera insignificante.

La alternativa más económica de acuerdo a los costos de inversión y operación es la alternativa 2, la alternativa 1 es la de mayor valor, debido a los costos de inversión en la construcción de las estructuras y en los insumos químicos utilizados. Por otro lado, la alternativa 3 es la que tiene el costo intermedio, no obstante, el costo con respecto a la alternativa 1 está casi a la par debido a las materias primas para la construcción del filtro de carbón activado.

A partir de la investigación, es posible afirmar que, todas las alternativas evaluadas ambientalmente tienen un valor de importancia tipo C (Bajo), en donde la alternativa 1 es la de mejor beneficio ambiental por tener el valor más bajo, seguida por la alternativa 3 y, la 2 consecutivamente en valores, según su grado de importancia.

El criterio de la eficiencia del sistema tiene una importancia del 0,761 o 76,1 % por ciento, los costos totales tienen 0,191 o un 19,1% de importancia y la afectación ambiental con 0,048 o un 4,8% por ciento de importancia, siendo el criterio de la eficiencia del sistema el factor determinante a la hora de tomar la decisión en la optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales de la mina.

En la aplicación del método de decisión multicriterio AHP para la selección de la mejor alternativa para el estudio, da como resultado final un ranking que establece el orden de prioridad de las mismas. Lo cual da como resultado, según la simulación para este proyecto, que la Alternativa 1 Coagulación-Floculación tiene el ranking número 1, seguido de la alternativa Carbón Activado con ranking número 2 y, por último, el mantenimiento del sistema con ranking número 3. Con base en lo anterior, se debe implementar al sistema actual de tratamiento de aguas residuales de mina, la Alternativa 1 Coagulación-Floculación, de tal manera que, se optimice el proceso

actual y, una vez puesto en funcionamiento, la calidad de agua tratada de vertimiento cumpla con las normas y reglamentos vigentes ambientalmente en Colombia.

REFERENCIAS

- [1] Columbia Coal Company S.A., “Modificación del Programa de Trabajos y Obras (PTO) dentro del Contrato de Concesión No 1967T”, Guachetá, 2019.
- [2] Metcalf & Eddy, Inc., “Wastewater Engineering, Treatment and Reuse”, Ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [3] J. Arboleda, “Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades”. Medellín, 2008.
- [4] OPS/CEPIS. “Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas”, Organización Panamericana de la Salud, 2005. Disponible en: http://www.bvsde.opsoms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d23/030_Construcci%C3%B3n_tratamiento_Filtraci%C3%B3n_ME/Construcci%C3%B3n_tratamiento_Filtraci%C3%B3n_ME.pdf
- [5] ICONTEC. “Norma Técnica Colombiana 1522. Suelos ensayo para determinar la granulometría por tamizado”, 1979.
- [6] V. Conesa, “Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental”, Ed. Mundi-Prensa, 2010.
- [7] R.W. Saaty, “The Analytic hierarchy process – What it is and how it is used”, Mathematical Modelling, pp. 161, 1987.
- [8] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible “Resolución No. 0631 del 17 de marzo del 2015”, pp. 10-12, 2015.

ZONIFICACIÓN POR RIESGO DE EXPLOSIONES DE GAS METANO EN LA MINERÍA DEL CARBÓN EN BOYACÁ, COLOMBIA

Zoning for risk of methane gas explosions in coal mining in Boyacá, Colombia

Juan Sebastián Arteaga Hernández

Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sede Sogamoso

Email: juan.arteaga@uptc.edu.co

(Recibido el 06 de febrero de 2021 – Aceptado el 09 de junio de 2021)

Resumen

En Boyacá el número de muertes por explosiones de metano en minas de carbón constituye el mayor riesgo minero, y las víctimas pueden estar alrededor de 10 muertos por año. Por lo tanto, se hizo zonificación del departamento para determinar las zonas mineras con mayor riesgo a partir de las mediciones de las concentraciones de metano en los frentes mineros. De la base de datos de la Agencia Nacional de Minería, se revisaron los contenidos de gas metano reportados en porcentaje durante las visitas de fiscalización. Dicha información se organizó y tabuló en una plataforma SIG, luego se filtró para utilizar los datos de mayor utilidad. Este rastreo arrojó que la zona de mayor riesgo está entre Tasco y Socotá, donde también se han reportado los mayores contenidos de gas en los ensayos de desorción; por lo tanto, este sector requiere mayor atención y cuidado durante las visitas de seguimiento a fin de evitar accidentes.

Palabras claves: Colombia, carbón, minería, metano, explosiones, SIG.

Abstract

In Boyacá, the number of deaths from methane explosions in coalmines constitutes the greatest mining risk, and the victims can be around 10 deaths per year. Therefore, the province was zoning to determine the mining areas with the highest risk from the measurements of methane concentrations on the mining fronts. From the database of the National Mining Office, the methane gas contents reported in percentage during the inspection visits were reviewed. This information was organized and tabulated in a GIS platform, then filtered to use the most useful data. This review shows that the area of greatest risk is between Tasco and Socotá, where the highest gas contents have also been reported in desorption tests; based on that, this area requires more attention and care during follow-up visits in order to avoid accidents.

Keywords: Colombia, coal, mining, methane, explosions, GIS.

1. INTRODUCCIÓN

En el departamento de Boyacá, el número de muertes por explosiones de metano en minas de carbón constituye el mayor riesgo minero, y las víctimas pueden estar alrededor de 10 muertos por año. Este reporte es alarmante ya que

las cifras no disminuyen con el tiempo, a pesar de que el reglamento de seguridad en labores subterráneas establece que los porcentajes máximos permisibles de metano en los frentes de explotación de carbón son de 1 % (Decreto 1886 de 1915 del Ministerio de Minas y Energía) [1]. Además de la presencia del metano en

porcentajes mayor al 1 %, también se requiere un agente de ignición; porque las explosiones pueden iniciarse por distintas fuentes como lo son: las llamas abiertas, cortos circuitos, circuitos eléctricos no sellados intrínsecamente, descargas eléctricas y electricidad estática.

Algunos investigadores han reconocido el problema y han investigado al respecto. Mariño et al. [2] encontraron que, aunque las compañías mineras hacen un seguimiento continuo de los contenidos de gases con ayuda de multidetectores, desconocen los contenidos reales del gas en el carbón *in situ*; por lo tanto, el planeamiento minero y demás medidas de prevención se estarían haciendo sobre valores relativos de contenido de gas.

La UPME [3] indica que las cifras por accidentes son altas y que el drenaje o utilización previa del gas metano en las minas de carbón ayudaría a disminuir los accidentes. El grupo de investigación en minería de la Universidad Nacional - Sede Medellín realizó mediciones de concentraciones de metano durante el arranque en minas a lo largo de la cuenca del Sinifaná, a partir de las cuales se elaboraron perfiles y correlaciones para determinar los factores más influyentes para las acumulaciones de gas y por ende explosiones [4]. Finalmente, Mariño y Bedoya determinaron los contenidos de gas en las minas de carbón a diferentes profundidades a partir de los ensayos de desorción cánisters de muestras obtenidas en perforaciones [5].

Aunque se tiene una idea de los contenidos de gas a partir de perforaciones utilizando ensayos de desorción, y se conocen algunas generalidades sobre los riesgos de explosión en la minería del carbón, no se tiene un análisis sistemático de las mediciones con metanómetros en la atmósfera de los frentes de las minas que establezca cuáles son las zonas con más riesgo; por lo tanto, el propósito de esta investigación es zonificar el departamento de Boyacá, mediante un polígono, donde se presenten las áreas y zonas mineras con mayor riesgo a partir de las concentraciones de metano en los frentes, y así generar un planteamiento nuevo para el análisis del problema, de tal manera que, se enfoque y mejore la efectividad de las

visitas de fiscalización (Figura 1).

Los objetivos que enmarcan esta ruta investigativa son: organizar y tabular los datos que se tienen para el análisis, filtrar los datos más representativos, procesar los datos y, mediante interpolación, presentar las zonas más representativas en cuanto a riesgo por explosión. Finalmente, delimitar las zonas vulnerables por explosión de gas metano.

Las limitaciones de este estudio están dadas por la información disponible, pues esta es limitada, de acuerdo al contenido de metano en los frentes de las minas; en contraste, a la reportada durante las visitas de fiscalización.

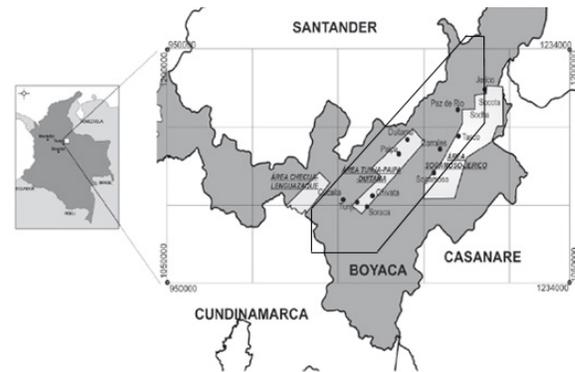


Figura 1. Ubicación de dos áreas carboníferas estudiadas en Boyacá, y del polígono de la zona de estudio.

2. MARCO TEÓRICO SOBRE EL GAS EN EL CARBÓN

El gas asociado al carbón (CBM) está compuesto aproximadamente en un 80 % o más de metano; el resto, por lo general, suele ser dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N_2) y etano. El gas asociado al carbón también conocido como gas de los mantos de carbón, CBM o CBG por sus siglas en inglés (GMAC, CBG o GAC en español), es una fuente de gas no convencional, que se obtiene a partir de la extracción del metano contenido en las capas de carbón. El CBM se genera en el carbón durante el proceso de carbonización de la materia orgánica por incrementos de presión y temperatura producto de los procesos geológicos. También incluye el gas que se

origina en el carbón por procesos bioquímicos, debido a la intervención de bacterias [2].

Las altas presiones debajo de la superficie conservan el gas metano en la matriz del carbón en un estado de adsorción y absorción. Estas altas presiones son creadas tanto por la profundidad, como por el agua que está contenida en la matriz del carbón. Para liberar el metano, los pozos productores de los mantos de carbón o los túneles mineros permiten que el agua sea bombeada para bajar la presión, lo que ayuda a desorber el gas del carbón. El metano migra dentro y fuera de los mantos de carbón hasta encontrar una barrera que lo atrape; de lo contrario, continúa migrando hasta alcanzar la superficie terrestre y, finalmente, se incorpora a la atmósfera como gas de efecto invernadero (GEI).

Los mantos de carbón más profundos son extraídos a través de túneles y labores subterráneas, mejor conocidas como “minería subterránea” como la que se trabaja en el Altiplano Cundiboyacense, Norte de Santander y Antioquia. Por la profundidad a la que se realizan las actividades mineras subterráneas, estas tienden a emitir más metano que las minas a cielo abierto. Además de la profundidad, el contenido de gas en el carbón se determina por 4 variables adicionales: 1) rango del carbón (grado de maduración termal), 2) tipo de carbón (composición maceral), 3) Contenido de materia mineral, y 4) espesor de la cobertera e historia del enterramiento y subsidencia.

El contenido del gas en el carbón se puede determinar a partir de métodos indirectos y directos. Los métodos indirectos no miden el gas en la capa de carbón, sino que se infiere a partir de alguna variable como la calidad del carbón, la profundidad, la reflectancia de la vitrinita o las isothermas de adsorción. Dichos métodos suponen la presencia del gas, pero no lo demuestran directamente. Los métodos directos se dividen en dos grandes grupos:

1) la *medición relativa* del contenido en la atmósfera de la mina utilizando metanómetros que miden el porcentaje de metano en la ventilación de la mina, tal como se

midieron los resultados de la presente investigación, y 2) *medición absoluta* del contenido de metano en los mantos de carbón sobre corazones de perforación que se introducen en contenedores herméticos llamados cánister, el contenido del gas se mide por desplazamiento de una columna de agua y se conocen como ensayos de desorción. En este caso los contenidos se reportan en m³/ton o pies³ de gas por tonelada de carbón [2].

Como el gas metano es explosivo, se deben medir y conocer muy bien los contenidos de metano en cada macizo rocoso a fin de diseñar el planeamiento minero sobre esos valores y evitar accidentes; por ejemplo, en Boyacá, a partir de ensayos de desorción se determinó que entre 0 y 200 m de profundidad el contenido de gas estaría entre 10 y 50 pies³/ton, y que entre 200 y 400 m de profundidad el contenido de gas estaría entre 50 y 130 pies³/ton que equivalen a 1,41 y 3,68 m³/ton [5].

La búsqueda de la información y el análisis se hizo en 2 de las 10 áreas carboníferas existentes en Boyacá: área carbonífera Tunja-Paipa-Duitama (802), y área carbonífera Sogamoso- Jericó (803) [6]. A continuación, se presentan los aspectos más relevantes por área carbonífera.

Área carbonífera Tunja-Paipa-Duitama (802)

La estructura principal del área es el Sinclinal Tunja-Paipa, con dirección suroeste-noreste. En donde, asociados a esta estructura, se desarrollan pliegues anticlinales y sinclinales con dirección similar. En el área 802 la formación Guaduas se ha dividido en tres miembros que de base a techo se conocen como miembros Inferior (110 m), Medio (210 m) y Superior (210 m). El miembro medio contiene los carbones y está comprendido desde el manto pequeño hasta un banco de arenisca de grano medio, con un espesor de 30 m, que aflora en la mayor parte del área y que sirve como nivel guía. Esta unidad está compuesta por arcillolitas grises, intercaladas con areniscas de grano fino y hasta nueve mantos de carbón [7] [8].

Los contenidos de gas encontrados en las perforaciones adelantadas en Chivatá, Tunja, Cucaita, Soracá y Paipa son muy bajos y fluctúan entre 0 y 65 pie³/ton a profundidades

entre 35 y 350 m; los pozos con mayores contenidos se encontraron en Chivatá y Cucaita con 33 y 65 pie³/ton, respectivamente, en las mejores muestras [9]. Los bajos contenidos de gas se pueden explicar a partir de la cercanía de los carbones a la superficie y al intenso fracturamiento en la zona, producto de la prolongación de la Falla de Boyacá, que ha impedido el desarrollo de una industria extractiva de carbón en las cercanías a Tunja [10] [8].

Área carbonífera Sogamoso - Jericó (803)

El área se extiende sobre la parte centro - nororiental del departamento de Boyacá, entre Cúitiva en el sur y Jericó en el norte (Figura 1). El espesor de la Formación Guaduas disminuye de 480 m en Sogamoso a 350 m en Socotá. En el área la formación ha sido dividida en dos conjuntos: Superior, constituido por una serie continua de intercalaciones de limonitas, lutitas grises, arenitas de cuarzo y, entre seis y ocho mantos de carbón explotables, con un espesor de 300 m; en el Inferior, no se encuentran mantos de carbón de suficiente espesor para desarrollar minería y consta de lodolitas y arcillolitas grises oscuras a negras prevaecientes sobre intercalaciones de arenitas [8].

Los valores encontrados en los frentes de minas de carbón del municipio de Sogamoso son bajos (0-2 pie³/ton) debido al muestreo en frentes de minas relativamente superficiales. Los mayores contenidos de gas en Sogamoso se encontraron en los Bloques Chiguatá y Morcá con valores que están entre 1,9 y 1,6 pie³/ton y esto se explica porque estos bloques hacen parte de un sinclinal y están menos fallados [11] [12] [8].

En una perforación hacia el sur de Sogamoso, que alcanzó los 150 m, se encontraron valores entre 1 y 6 pie³/ton, lo que se considera bajo para dichas profundidades, como consecuencia del intenso fallamiento, ya que se encontraron repeticiones en los mantos; pero también por errores de procedimiento. En general, los valores de gas encontrados en Sogamoso están entre 0,2 y 6 pie³/ton, y son bajos si se comparan con carbones del mismo rango (bituminosos alto volátiles) y profundidades de

alrededor de 50 m o más, medidos en Cesar-Ranchería en el caribe colombiano y en otras partes del mundo, donde se obtuvieron valores cercanos a 100 pie³/ton [13][14][8].

En Corrales, los contenidos de gas están entre 5 y 69 pie³/ton, a profundidades entre 250 y 350 m con el gas desorbido representando más del 90%. Estos valores también se consideran bajos para las profundidades alcanzadas. Para el municipio de Tasco, los valores encontrados están entre 50-100 pie³/ton a profundidades que alcanzaron los 600 m, lo que muestra un incremento significativo con respecto a los bloques ubicados en Sogamoso. En estas muestras no se midió gas residual y los valores de gas perdido están muy bajos, por lo que los valores reales podrían objetivamente estar cerca a los 150 pies³/ton. En Tasco-Paz de Río se encontraron valores totales entre 0-165 pies³/ton; los valores de gas residual se consideran bajos y en general los valores de todas las muestras deberían estar por encima de 100 pies³/ton porque el rango de los carbones es bituminoso medio volátil. En Socha se encontraron valores de contenido gas que están entre 0-275 pie³/ton a profundidades entre 100 y 300 m. En Socotá se encontraron valores de gas que están entre 2-50 pie³/ton a profundidades entre 400 y 600 m. Los contenidos de gas superiores a 200 pie³/ton se consideran aceptables para las condiciones de la zona debido a la profundidad y al incremento del rango hacia el norte en que el rango de los mantos más inferiores es bituminoso medio volátil [8].

En general, los contenidos de gas en el área de Sogamoso-Socotá evidencian un aumento de sur a norte, lo que concuerda con el aumento del rango del carbón hacia el norte, donde se encuentran carbones de rango medio a bajo volátiles, que son coquizables. Generalmente, el aumento del rango del carbón se relaciona directamente con el incremento en el contenido de gas. En esta área, el rango del carbón y la reflectancia de la vitrinita se relacionan así: en la zona de Sogamoso, el rango del carbón es bituminoso alto volátil con valores de reflectancia de la vitrinita de 0,45-0,65%, mientras que, en la parte norte, cerca a Socotá, el rango del carbón es bituminoso medio volátil, con valores de reflectancia de

la vitrinita de 1-1,2%, y con propiedades coquizables [6]. Estos valores de vitrinita están sobre los valores mínimos (0,6-0,8%), a partir de los cuales se pueden generar grandes volúmenes de gas termogénico [15]. El aumento del rango de los carbones hacia el norte coincide no solamente con el aumento en el contenido de gas, sino también con la mayor subsidencia de la cuenca hacia el norte donde se encuentra el depocentro de la Cuenca del Cocuy [16][8].

3. METODOLOGÍA

De la base de datos de la Agencia Nacional de Minería se revisaron los contenidos de gas metano en porcentaje reportados durante las visitas de fiscalización desde el año 2017 hasta la fecha [17]. De acuerdo con la información disponible se decidió analizar la información de dos áreas carboníferas: 802 - Tunja - Paipa - Duitama, y 803 - Sogamoso - Jericó. En total se analizaron y graficaron las mediciones adelantadas en 107 títulos mineros. Aunque en Boyacá se ha determinado 10 áreas carboníferas, solo se analizaron dos por la disponibilidad de datos y por la actividad minera [6]. Es evidente que la información existente puede mejorar y, que esta debe ser actualizada a medida que se generan las visitas.

Dicha información se organizó y tabuló en Excel. Posteriormente, se filtró la información para utilizar los datos de mayor utilidad. Los contenidos de gas con sus respectivas coordenadas se graficaron en el sistema de información geográfica (SIG). Se procesaron los datos mediante interpolación para resaltar las zonas más representativas en cuanto a riesgo de explosión. El software permite cargar cada punto correspondiente al título minero con su determinada información, y así implementar cada procesamiento y uso de las herramientas que este ofrece de cada punto de manera individual para obtener un resultado que, en conjunto, presente patrones sobre los cuales se pueda llegar a dar una interpretación concreta y fundamentada.

Durante el desarrollo de este estudio, se empleó el método *Inverse Distance Weighted* (IDW) con el fin de

interpolarse los valores más altos y más bajos, y así enfatizar en los puntos más cercanos; como resultado, los datos cercanos tendrán mayor influencia, y la superficie tendrá más detalles, a medida que aumenta la potencia, y los valores interpolados comienzan a ser cercanos al valor del punto de muestra. Lo que significa que, al especificar un valor más bajo de potencia, los puntos circundantes adquirirán más influencia que los que están más lejos, como resultado se obtiene una superficie más suave. Finalmente, se delimitaron las zonas más vulnerables por riesgo de explosión de gas metano.

A continuación, se genera una reclasificación sobre los rangos dados, donde se le asigna 1 y 2 para los rangos de 0 a 5%, 3 y 4 para los rangos de 5 a 10.4 %, y 5 para los rangos mayores a 10 %; lo anterior, con el fin de dejar clases e intervalos definidos, y así lograr agrupar la mayor cantidad de datos en 5 tipos diferentes. En este caso, los valores que se encuentran dentro del grupo 1, son de muy bajo riesgo; los del 2 son de bajo riesgo; los del 3, de mediano riesgo; del 4, de alto riesgo y; los de grupo 5 de muy alto riesgo.

Luego de tener los datos reclasificados, se empleó la herramienta de *dissolve* con el fin de simplificar los datos, teniendo en cuenta los que ya se tenían, esto para generar una nueva cobertura mediante la fusión de polígonos adyacentes con el mismo valor para un elemento especificado, y así obtener un solo polígono dependiendo el rango. A partir de lo anterior, se puede modificar el símbolo de los puntos de gas metano en cada título y asignarles un tamaño que incremente o disminuya proporcionalmente al porcentaje presentado, de tal manera que, se evidencie las zonas con mayor amenaza y se haga un *close up* sobre cada una e interpretarla de la mejor manera.

4. RESULTADOS

Las dos áreas relacionadas en el marco teórico se analizaron conjuntamente y se reportaron en un gran polígono que comprende las áreas 802 y 803 (Figura 2).

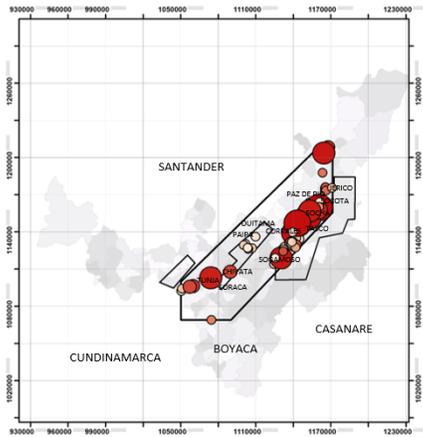


Figura 2. Ubicación del polígono del área de estudio.

En cada caso se introdujeron los datos de porcentaje de contenido de gas metano reportados durante las visitas. De la misma manera, se establecieron intervalos de porcentaje de 0 a 5 de 5 a 20 y mayores de 20 basados en las tres fases del gas metano; deflagrante, explosivo y asfixiante, respectivamente, donde las zonas más altas presentan tonalidades rojizas y anaranjadas para mostrar las zonas de mayor riesgo, tonalidad de amarillo para las zonas de mediano riesgo, y tonalidades verdes para las zonas de bajo riesgo; gracias a estas convenciones, se puede determinar sobre qué zonas se implementarán medidas de mayor importancia a fin de prevenir accidentes, dependiendo del nivel de riesgo (Figura 3).

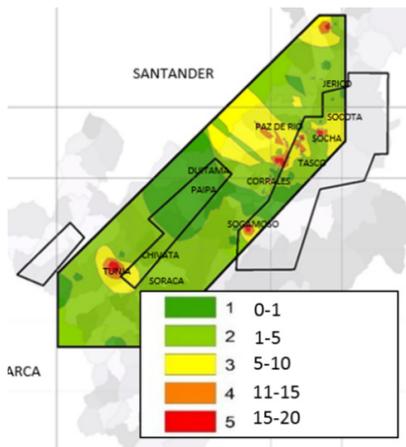


Figura 3. Mapa IDW de intervalos de contenido de gas del polígono de estudio.

Finalmente, los datos de contenido de gas se agruparon no por contenido de gas sino por el grado de riesgo dependiendo del contenido; donde grupo 1 son de muy bajo riesgo, los del grupo 2 son de bajo riesgo, los del grupo 3 de mediano riesgo, grupo 4 de alto riesgo y los de grupo 5 de muy alto riesgo. Como se fusionaron los de polígonos adyacentes con el mismo valor para poder evidenciar las zonas con mayor amenaza y facilitar la interpretación, se presentan las tres áreas carboníferas conjuntamente (Figura 4).

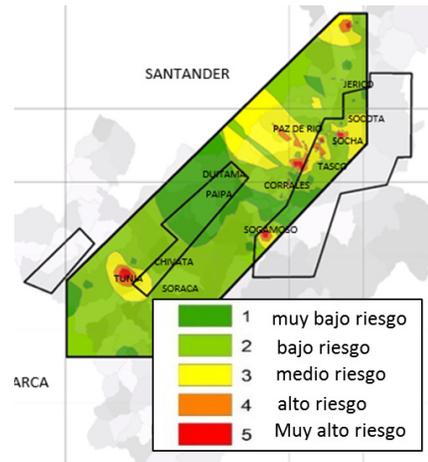


Figura 4. Mapa de reclasificación por riesgo de explosividad. Fuente: Los autores.

Después de tener los datos reclasificados se usó la herramienta de *dissolve* con el fin de simplificar los datos a partir de los que ya se tenían, esto para generar una nueva cobertura mediante la fusión de polígonos adyacentes con el mismo valor para un elemento especificado, y así obtener un solo polígono dependiendo el rango; con esta información se puede modificar símbolo de los puntos de gas metano en cada título y asignarles un tamaño que incremente o disminuya proporcionalmente al porcentaje presentado, esto para poder evidenciar las zonas con mayor amenaza y hacer un *close up* sobre cada una y llegar a interpretarla de la mejor manera. Como resultado se obtuvieron 3 zonas de amenaza (Figura 5)

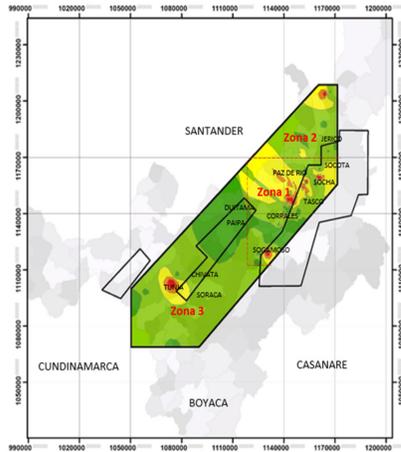


Figura 5. Mapa de Disolución de las tres zonas de amenaza.

5. ANÁLISIS

Con el mapa de dilución que permite resaltar mejor las zonas con mayor potencial o probabilidad que ocurra un accidente, se superpusieron dichas zonas con las áreas carboníferas mencionadas en el marco teórico (Figura 1). Finalmente, resultaron tres zonas las cuales se clasifican en orden dependiendo el riesgo, donde la zona 1 es la de mayor riesgo y la zona 3 la de menor riesgo.

Zona de Amenaza 1. Para la zona 1 o zona de mayor riesgo, los mayores porcentajes de metano están entre 20.9, 20.8, 20.4, 18, 16, 12, 2.5, y 2.2 %; que corresponden con la parte central del área carbonífera 804- Sogamoso-Jericó; específicamente, coincide con las explotaciones carboníferas de los municipios de tasco, Socha y Socotá (Figura 5). Los estudios de gas asociado al carbón en los que se mide el contenido de gas sobre corazonces de perforación, y utilizando sistemas de desorción cánisters, han concluido que la zona de Socha-Socotá presenta altos contenidos de gas de hasta 250 pies³/ton a profundidades cercanas a 400 m de profundidad [5]. En esta zona son frecuentes los accidentes relacionados con la presencia de metano posiblemente originado por el incremento del rango del carbón en Boyacá hacia el norte, al punto que en esta zona los carbones son coquizables.

Zona de amenaza 2. Intermedio, los mayores porcentajes de metano reportados fluctúan entre 20.8 y 3.38 %, que corresponden con la parte norte del área carbonífera 804-Sogamoso-Jericó, en los alrededores del municipio de San Mateo en el norte de Boyacá (Figura 5). No se conocen resultados de los ensayos de desorción, pero como el rango del carbón mejora hacia el norte, se esperaría que el contenido del gas mejore proporcionalmente.

Zona de amenaza 3. Para la zona 3 o zona de riesgo menor, el mayor porcentaje de gas metano es del 19.4 % y corresponde con el área 803 - Tunja-Paipa-Duitama (Figura 5). Los estudios de desorción realizados en la zona por el SGC, UPTC y la ANH muestran que los contenidos son bajos. Lo anterior podría estar relacionado con el fracturamiento de la zona y el alto buzamiento de los carbones, lo que facilitaría el escape del gas [9] [18].

A pesar de la frecuencia de los accidentes mineros relacionados con la presencia del gas metano, los estudios de desorción indican que los contenidos de gas en Boyacá no son altos porque no sobrepasan los 350 pies³/ton (10 m³/ton) establecido por Naciones Unidas [19]; y que por lo tanto, no habría necesidad de drenar los macizos carboníferos antes de la explotación minera; por lo esta razón, los altos porcentajes de metano reportados y la frecuencia de los accidentes se relacionarían más con deficiencias en el diseño de la ventilación, condiciones mecánicas y circuitos eléctricos.

Se sugiere que, a ANNA, la plataforma digital que utiliza la Agencia Nacional de Minería (ANM) y que integra la información minero ambiental, se le pueda adicionar una sección que permita la actualización de la información en cada visita y, con el visor geográfico, tener la posibilidad de percibir estos patrones de riesgo, los cuales podrían servir de soporte al momento de crear las rutas de fiscalización.

6. CONCLUSIONES

El propósito principal de la investigación es zonificar el departamento de Boyacá por riesgo de explosión de gas metano en la minería del carbón, a partir de las

mediciones en los frentes mineros con multidetectores durante las visitas de seguimiento y fiscalización.

Se confirmó la hipótesis de que el riesgo de accidente por presencia de gas metano es proporcional a los contenidos de gas reportados durante las visitas de fiscalización.

La zona de mayor riesgo de explosión por presencia de metano corresponde a la zona 3 o parte central de la zona carbonífera 801-Sogamoso-Jericó, entre los municipios de Tasco y Socotá, donde se ha reportado porcentajes entre 2 y 20,4 % de metano.

El riesgo de la zona 3 se confirma por los relativamente altos contenidos de metano (pies^3/ton) encontrados en los estudios de desorción, y por los frecuentes accidentes reportados en la zona.

Se concluye que los mayores porcentajes de metano encontrados entre Tasco y Socotá indican que el seguimiento por parte del estado y las nuevas rutas de fiscalización deberán dar prioridad a la parte central del área carbonífera 801.

Después de obtener los resultados se evidencia que el alto porcentaje de gas metano de algunos títulos puede presentar una influencia indirecta en los títulos circundantes, generando un efecto domino negativo; cabe aclarar que para estos estudios se necesitan de otro tipo de datos y un mayor número de muestras, ya sea para evidenciar la afectación a nivel del subsuelo, o para observar cómo se podría ver afectada la continuidad del yacimiento.

Como resultado de este proyecto se determinó que la información deberá ser ampliada y actualizada a medida que se generan las visitas, y así se podrá actuar con anticipación a los hechos. Igualmente, que la fiscalización debe dar prioridad a las zonas con mayor riesgo.

Así también, se concluye que la herramienta ANNA usada para la extracción minera, se puede actualizar para poder sistematizar la información en cada visita y, gracias al visor

geográfico, tener la posibilidad de percibir estos patrones de riesgo, los cuales podrían servir de soporte en el momento de crear las rutas de fiscalización.

Por último, se afirma que si estas medidas llegan a implementarse, se podría evitar y mitigar los accidentes producto de explosiones por gas metano en el departamento de Boyacá; por lo tanto, se reduciría el número de fallecidos y las pérdidas económicas.

REFERENCIAS

- [1] Decreto 1886 (2015). Disponible en: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180//23517//36743-Decreto-1886-21Sep2015>.
- [2] J. Mariño, A. Castro, L. Mojica, A. Botero, D. Granados y C. Acuña (2015) "Desarrollo del CBM en Colombia," in Gas asociado al carbón (CBM o GMAC). *Geología, contenidos, reservas, minería y posibilidades en Colombia*, pp. 110-130, Tunja, Colombia:<https://www.libreriadelau.com/gas-asociado-al-carbon-cbm-o-gmac-geologia-contenidos-reservas-mineria-y-posibilidades-en-colombia-universidad-pedagogica-y-tecnologica-de-colombia-uptc-geologia/p>
- [3] UPME - Consorcio GEOIL- SERGEING- METANO CO. "Construcción de un modelo para Colombia de aprovechamiento u oxidación de gas metano de los ductos de ventilación (vam) de las minas subterráneas de carbón". 2017.
- [4] C. Ortega-Ramos, F.-B.-M.-E. (2018). *Boletín de Geología*. "Evaluación del riesgo de explosividad del gas metano en minería subterránea de carbón, caso de la cuenca del Sinifaná, Colombia". Obtenido de: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/7961/829> 2018.
- [5] J. E. Mariño Martínez & R. Chanci Bedoya, *Gases de efecto invernadero: propuesta de cálculo del factor de emisiones de gas metano procedente de la extracción del carbón colombiano*. Tunja: UPTC. 2019.
- [6] G. Renzoni, 2006. Tareas para el desarrollo

- del carbón en Colombia. Obtenido de: <http://aplicaciones1.ingeo Minas.gov.co/sicat/html/ConsultaBasica.aspx> 2006.
- [7] E. Arias, C. Beltrán, V. Gómez, N. Hernández, A. Rosas, y G. Tibaduiza, G. 1997. "Programa Normalización de Recursos y Reservas de carbón (Departamento de Boyacá)". ECOCARBÓN. 1997.
- [8] J. Mariño & L. Mojica, "Estados de la exploración y posibilidades de gas asociado al carbón (GAC) en Boyacá (COLOMBIA)". *Revistas UIS*. Obtenido de: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/3733/4160>. 2012
- [9] ANH – EAFIT. "Valoración del potencial exploratorio CBM en la cuenca carbonífera de Amagá y Boyacá-Cundinamarca (Formación Guaduas)". Convenio 014 de 2010. Bogotá. 2011.
- [10] E. Carlier, y R. Camargo, *Descripción litoestratigráfica y medición de volumen de gas metano asociado al carbón (GMAC) en núcleos de perforación en el pozo Chivatá-1 municipio de Chivatá, departamento de Boyacá*. Trabajo de grado. UPTC Sogamoso, Ingeniería Geológica. Biblioteca UPTC, 2012.
- [11] J. Fonseca y L. López, (2003) Determinación del bloque con mejores de posibilidades del gas asociado al carbón en la zona carbonífera ubicada al nororiente del municipio de Sogamoso. UPTC Sogamoso, Ingeniería Geológica.
- [12] D. Pitre y H. Noppe, (2003) *Determinación del bloque con mejores posibilidades del gas asociado al carbón en el sector SE de Sogamoso*. Trabajo de grado. Sogamoso-Ingeniería Geológica. Biblioteca UPTC.
- [13] Geomet, INC.1993. *Proposal for Association Contract Coal Seam Methane Project Cesar-Rancheria area Colombia*. ECOPETROL. Bogotá. 1993.
- [14] B.E. Law and D.D. Rice, 1993. "Hydrocarbons from Coal. Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, AAPG Studies in Geology" 38: 159-184. 1993.
- [15] T. Moore, "General introduction to coal bed methane. In First annual Illinois Basin coalbed symposium", The Midwest PTTC Center. Evansville, Indiana, USA. 2004.
- [16] A. Fabre, "La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental Colombiana) durante el Cretáceo y el Terciario Inferior". *Geología Norandina* No. 8, Bogotá 1983.
- [17] ANM. Obtenido de: <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/estudio-caso-explosion-metano-y-polvo-carbon.pdf> 2020.
- [18] SGC. "Exploración de recursos energéticos, la exploración de gas metano asociado al carbón (GMAC o CBM) en un polígono de 200 km², en los municipios de Guachetá, Ráquira". Obtenido de: <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=49123>. 2012.
- [19] Naciones Unidas "Guía de mejores prácticas para un drenaje y uso eficaz del metano en las minas de carbón". Ginebra (Suiza) 2016. Obtenido de: <https://www.google.com/search?q=Naciones+UnidasGuia+de+mejores+practicas+para+un+drenaje+y+uso+eficaz+del+metano+en+las+minas+de+carbon.+Ginebra&aq=chrome..69i57.1676j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

MEJORA EN EL APROVECHAMIENTO DEL ESPACIO CÚBICO DE CONTENEDORES DE EXPORTACIÓN DE MANGUERAS EN UNA EMPRESA AGRO INDUSTRIAL EN EL PERÚ

Enhancing use of the cubic space of hose export containers in an agro-industrial company in Perú

Cristhian Giancarlo Aradiel Abad¹, Diego Ángel Dávila Vilchez², Tania Sthefany Gamboa Rojas³,
Gabriela Paola Veliz Ponce⁴

¹⁻⁴Pontificia Universidad Católica Del Perú, Escuela de Ingeniería Industrial, Grupo de Investigación IISE PUCP, Perú. Email: ¹cristhian.aradiel@pucp.pe, ²diego.davila@pucp.edu.pe, ³tania.gamboa@pucp.edu.pe, ⁴gabriela.veliz@pucp.edu.pe

(Recibido febrero 06 de 2021 y Aceptado junio 15 de 2021)

Resumen

El presente artículo describe la situación actual de la exportación de mangueras hidráulicas en el Perú, analiza los principales factores que incrementan el costo de exportación y propone un modelo de programación lineal para determinar el tipo de container que debe ser usado según variables expuestas.

Palabras clave: optimización, programación lineal, espacio cúbico.

Abstract

This article describes the current situation of the export of hydraulic hoses in Peru, analyzes the main factors that increase the export cost and proposes a linear programming model to determine the type of container to use according to the exposed variables.

Key words: optimization, linear programming, cubic space.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen diversas empresas exportadoras que planifican la consolidación de sus despachos y la distribución de sus productos, de manera empírica desde su planta principal hacia distintos puntos de venta a nivel internacional. El caso de estudio de la presente investigación es de una empresa exportadora peruana, que cuenta con diversos productos (línea de goteros, aspersores, emisores, tuberías, conectores y accesorios) para el riego de cultivos. El flujo de contenedores es la principal motivación que moviliza la cadena de suministro, de tal manera que, se pueda satisfacer la exigente demanda de los mercados de diferentes regiones, desde el requerimiento de una logística internacional relevante.

En ese sentido, la principal desventaja de la consolidación de los productos es la necesidad de movilizarlos en paletas y contenedores, proceso que se gestiona acorde a la experiencia del operador logístico de la empresa. Esta práctica incurre en altos costos logísticos puesto que no se aprovecha la capacidad total de los contenedores y no existe un estándar de paletizado. Por esta razón, no se usa de manera óptima el espacio ni la asignación de la carga de acuerdo con el tipo de contenedor 40 ST (FCL o LCL). La estrategia inicial es optimizar el paletizado y consolidación de la carga, es así que se propone la creación de un modelo matemático a través de la programación lineal, que optimice la consolidación de los productos en los contenedores y reduzca los costos de operaciones logísticas del envío marítimo hasta su destino final.

2. ANTECEDENTES

En Perú, el sector agroexportador refleja una participación de 14.3% en promedio con US \$10,000 millones para el 2021, el cual ilustra una expectativa suficiente de oportunidad para invertir (Ministerio de Agricultura y Riego, 2020) [2]. El presente caso de estudio es sobre una empresa agroexportadora peruana, la cual posee cinco grupos de negocios que ofrecen soluciones innovadoras en diversas industrias. Estas incluyen sectores como construcción e infraestructura, comunicaciones de datos, productos químicos y más. La cual ocupa el primer lugar en ventas de la industria de riego por goteo y tiene como principales competidores a Naan Dan Jain y Jhon Deer Water.

La principal actividad de la empresa se centra en ofrecer productos y soluciones de riego tecnificado; monitoreo, control digital de campo abierto, huertos y cultivos protegidos. Cabe resaltar que está enfocada en abordar uno de los mayores desafíos del mundo: escasez de agua y alimentos. Otras actividades en las que incursiona son el soporte técnico y agronómico para proyectos de cliente, además de impulsar iniciativas para mejorar la calidad de cultivos y el incremento del rendimiento y uso eficiente del agua. [3]

3. METODOLOGÍA

La metodología propuesta se detalla en las siguientes actividades:

3.1. Mapeo de procesos

Esta actividad permitió conocer el proceso de exportación de mangueras, accesorios, aspersores, etc. involucrando diversas áreas desde la solicitud de la orden y servicio al cliente, pasando por áreas de producción, planeamiento, comercio exterior almacenes y distribución hasta el despacho y envío de la documentación al cliente. Además, el flujo de las mangueras de exportación proviene de una planificación pronosticada del abastecimiento de los países destino con la finalidad de minimizar el impacto de las roturas de stock. Cabe resaltar que la presente

investigación y mejora se enfocará en las actividades del operador logístico (*in house*) relacionadas a la consolidación de carga paletizada en *containers*.

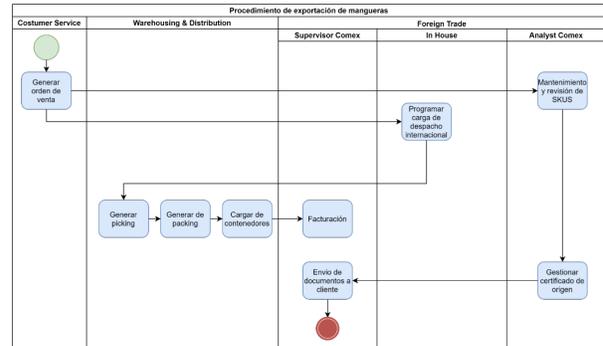


Figura 1. Hose Export Process

3.2. Recolección y análisis de información

Se recolectó información relacionada con los pesos (kg), volumen (m3) y venta de los SKUs en los distintos canales a través de la demanda. Para ello se identificó la estructura de la red logística con respecto a los tiempos relacionados al envío de los productos por destino y por SKU por cuestiones prácticas de la empresa agroindustrial. En resumen, se consolidó la información y un análisis de la demanda para determinar en qué SKU's generar mayor valor a la compañía. En ese sentido, se estableció que, de 38 productos, solo 20 tipos de mangueras generan mayor ganancia de acuerdo con el Pareto mostrado.



Figura 2. Pareto of hose sales.

3.3. Construcción del modelo de optimización

Se debe tener en cuenta que para la determinación del conjunto de SKU's y paletas, estas son asignadas al tipo

de contenedor, no obstante, cabe resaltar que el objetivo de este modelo es el aprovechamiento del espaciamiento cúbico de los contenedores a través de carga paletizada, reduciendo así los costos del flujo de contenedores que serán exportados. La principal variable de decisión es la cantidad pronosticada de SKU's propuestos para exportación a destinos como Chile, Ecuador, Colombia, Argentina, México, Centro América y Brasil; por otro lado, las restricciones están vinculadas a la demanda de los clientes, modalidad de transporte y costos de depósito temporal, flete local, asociados al contenedor, y uso de patio en puerto, etc. (costos de logística internacional).

3.4. Análisis de resultados y de escenarios

Se presentarán los resultados del escenario actual, es decir de la situación actual empírica en la que el operador logístico consolida la carga y se comparara los resultados del modelo matemático propuesto.

A continuación, se presenta la estructura de costos relacionados a la exportación de contenedores (logística internacional en la cadena de suministro). La Figura 3, representa los costos fijos en la exportación de la mercadería e independiente del flujo de contenedores:

Costo variable			
AGENCIAMIENTO DE CARGA	DEPÓSITO TEMPORAL DE TRÁNSITO MARÍTIMO	FLETE O TRANSPORTE LOCAL	ASOCIADOS AL USO DEL CONTENEDOR
ESTIBA	GATE OUT	MEDIO FLETE	APERTURA DE CONTENEDOR
	MANIPULEO ENTREGA	STAND BY	CONTAINER CONTROL
	REPROGRAMACIÓN DE CITA	TRANSPORTE	CONTAINER COVERAGE FEE
	SERVICIO DE ENTREGA		CONTAINER DELIVERY FEE
	SERVICIO EXTRAORDINARIO		EMBARQUE DE CONTENEDOR
	SERVICIO INTEGRADO DE DT		ENTREGA DE VACIOS
	SERVICIO INTEGRAL DE ENTREGA DE VACIOS		GESTION DESPACHO DE CONTENEDOR
	USO DE PLATAFORMA WEB		SERVICIO ADMINISTRACION CONTENEDOR
			SERVICIO DE RETIRO DE CONTENEDOR

Figura 3. Costos variables asociados a la exportación de mangueras.

COSTO FIJO		
AGENCIAMIENTO DE ADUANA	AGENCIAMIENTO PORTUARIO MARÍTIMO	TRÁMITES DE DOCUMENTOS Y ADMINISTRATIVOS
COMISION AGENCIA	AUXILIO MECÁNICO A CAMIONES EXTERNOS INOPERATIVOS	GASTO ADMINISTRATIVO
GASTOS DE DESPACHO	CARGO POR CITA NO UTILIZADA	GASTOS ADMINISTRATIVOS
PRECINTO	CONTENEDOR ALTO CUBICAJE 40HQ	TRAMITE DOCUMENTARIO EXPO
	ENTREGA TARDIA DE DOCUMENTOS	VISTO BUENO
	MANIPULEO GRUA	
	MOVILIZACION PARA BOE	
	MOVIMIENTOS EXTRAS EN EL PATIO	
	SCAC EXPO	
	SERVICIO ESPECIAL DEPOSITO TEMPORAL	

Figura 4. Costos fijos asociados a la exportación de mangueras.

Además, se tomará en cuenta el volumen de cada producto con el objetivo de aprovechar el espaciamiento cúbico de los contenedores:

	Volumen (m3)
Manguera tipo 1	0,068
Manguera tipo 2	0,064
Manguera tipo 3	0,067
Manguera tipo 4	0,073
Manguera tipo 5	0,064
Manguera tipo 6	0,066
Manguera tipo 7	0,073
Manguera tipo 8	0,064
Manguera tipo 9	0,071
Manguera tipo 10	0,070
Manguera tipo 11	0,063
Manguera tipo 12	0,070
Manguera tipo 13	0,037
Manguera tipo 14	0,065
Manguera tipo 15	0,070
Manguera tipo 16	0,065
Manguera tipo 17	0,075
Manguera tipo 18	0,066
Manguera tipo 19	0,057
Manguera tipo 20	0,068

Figura 5. Volumen según tipo de mangueras.

De acuerdo con la demanda histórica de los 20 tipos de manguera, se pronosticó de acuerdo con el método de promedio móvil con tendencia móvil. De acuerdo con lo anterior, se presenta el cuadro pronóstico para la demanda mensual de los 7 países que deben ser cubiertos.

Enseguida, se explicará los sets, parámetros, variables de decisión, función objetivo, restricciones para determinar los costos totales mínimos de las exportaciones de los contenedores a distribuir al mercado internacional.

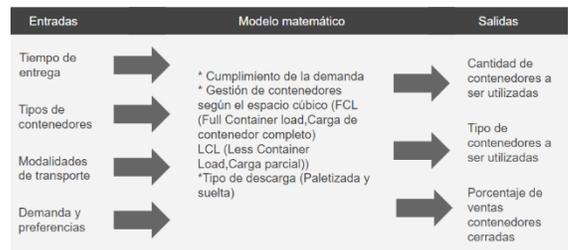


Figura 6. Variables de entrada y salida para el modelo matemático.

El modelo de optimización se presenta en las siguientes líneas:

Sets

- I Set of SKUs
- J Set of countries
- K Set of container types

Parámetros

- d_i Demand SKU i
- v_i Volume SKU i
- $pLCL$ Maximum volume allowed for an LCL container
- $pFCL_{min}$ Minimum volume allowed for a FCL container
- $pFCL_{max}$ Maximum volume allowed for a FCL container
- cag Cargo agency cost
- cf Freight cost
- cdt Temporary deposit cost
- cac Costs associated with the use of containers
- caa Customs clearance costs and commissions
- cap Costs and commissions of the port of shipment
- cta Administrative costs

Variables

- X_{ijk} Quantity of SKU i exported to country j in a container type k
- W_{jk} Quantity of type k containers exporting to country j

Descripción:

$$\text{Min} (caa + cap + cta) + \sum_{j \in J, k \in K} (W_{jk} * (cac + cf + cdt + cac))$$

La función objetivo busca minimizar el costo total de exportación de *containers* a ser distribuidos en el Mercado internacional.

Demanda de Producción

$$\sum_{k \in K} X_{ijk} = d_i \quad \forall i \in I, j \in J$$

La cantidad de SKUs a ser exportados a cada país en su respectivo tipo de *container*, debe ser igual a la demanda de producción mensual de SKU en general.

Límite máximo de capacidad de containers LCL (k=1)

$$\sum_{i \in I} X_{ij1} * v_i \leq pLCL * W_{j1} \quad \forall j \in J$$

El volumen total de productos que se enviarán en contenedores *Less Container Load* (LCL) debe ser menor o igual a la política de volumen máximo de los contenedores LCL utilizados.

Límite mínimo de capacidad de containers FCL (k=2)

$$\sum_{i \in I} X_{ij2} * v_i \leq pFCL_{min} * W_{j2} \quad \forall j \in J$$

El volumen total de productos que se enviarán en contenedores *Full Container Load* (FCL) debe ser mayor o igual a la política de volumen mínimo de los contenedores FCL utilizados.

Límite máximo de capacidad de containers FCL (k=2)

$$\sum_{i \in I} X_{ij2} * v_i \leq pFCL_{max} * W_{j2} \quad \forall j \in J$$

El volumen total de productos que se enviarán en contenedores *Full Container Load* (FCL) debe ser menor o igual a la política de volumen máximo de los contenedores FCL utilizados.

4. RESULTADOS

La minimización de contenedores que son consolidados para exportar pedidos de clientes (países), de acuerdo con la demanda de los 7 países y el desarrollo del modelo, deben realizarse de la siguiente manera: Todo el pedido desde Chile debe ser exportado en 30 contenedores *Full Container Load*, todo el pedido desde Ecuador en 2 Full Contenedores de carga; todo el pedido desde Colombia,

en 5 contenedores Carga completa de contenedores; todo el pedido desde Argentina en 2 contenedores, Carga completa de contenedores; todo el pedido de México, en 1 contenedor *Less Container Load*; todo el pedido de Centroamérica en 30 contenedores *Full Container Load*; todo el pedido de Brasil, en 2 contenedores *Full Container Load*.

La reducción de costos de oferta internacional de productos se origina de acuerdo a la demanda del mercado latinoamericano (\$). En concordancia, los principales costos logísticos que se reducirían son los de agencia de carga, flete, almacenamiento temporal y los asociados al uso de contenedores. En el caso de la empresa exportadora, desee implementar este modelo de programación lineal, sus costos logísticos totales serían de 231.273,21 dólares, muy inferiores a sus costos actuales, que ascienden a 337.921,11 dólares.

derecha:

$$X_{1-2} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4a}}{2a} \quad (1)$$

$$x \leq \sum_{i=t}^T D_i \quad (2)$$

5. CONCLUSIONES

El criterio empírico del operador logístico no implica necesariamente la consolidación eficiente de la carga paletizada, por lo que el uso de contenedores se puede reducir en un 31,56%. Adicionalmente, se incrementó el cambio de contenedores LCL a FCL ya que las cantidades y dimensiones de cada tipo de manguera fueron fundamentales para la mejora en el espaciamiento cúbico del 70,26%. Esta investigación y mejora determinan una relevante disminución de costos como punto de partida y planificación para la exportación y negociación de contenedores. El modelo matemático sugiere la integración de los pronósticos de ventas de acuerdo con la metodología de Operaciones de Planificación y Ventas

(S&OP), ya que la información compartida entre las áreas involucradas considera las características de los mercados internacionales.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística e Informática (2021). Tabla de actividades económicas de Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU). Revisado el 25 de abril de 2021. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1348266/Tabla_Oficial_CIIU_Rev4.pdf
- [2] Comexperú (2019). Principales Preocupaciones de los Agropecuarios. Revisado el 25 de abril de 2021. Disponible en: <https://www.comexperu.org.pe/articulo/principales-preocupaciones-de-los-agroexportadores>
- [3] Agroexportadora (2021). Agroexportadora, el riego de precisión cambia el panorama económico de la agricultura. Revisado el 25 de abril de 2021. Disponible en: <https://www.agroexportadora.com/es-pe/>

APLICACIÓN INDUSTRIA 4.0 EN LOGÍSTICA DE RAPPI "ZONA T", DE BOGOTÁ D.C., COLOMBIA

Industry 4.0 application on RAPPI logistics in "Zona T", in Bogotá D.C., Colombia

Martha Lucia Belmonte Rodríguez¹, Rodrigo Eduardo Pardo Calderón², Luis Felipe Mogollón Loaiza³

¹⁻³Corporación Universitaria UNITEC, Escuela de Ingeniería, capítulo IISE 617, Colombia.

Email: ¹72181524@unitec.edu.co, ²72171501@unitec.edu.co, ³72201506@unitec.edu.co

(Recibido marzo 09 y aceptado junio 02 de 2021)

Resumen

El presente manuscrito documenta la investigación realizada a la empresa de paquetería y mensajería RAPPI de la ciudad Bogotá y, cómo esta aplica la Industria 4.0 en su modelo logístico. En la cual se usan los conocimientos adquiridos en áreas de ingeniería, métodos y logística para el planteamiento de posibles mejoras al proceso de entregas Delivery. El área de estudio fue la Zona T de la ciudad de Bogotá ubicada entre las calles 79 a 85 y las carreras 11 a 15, debido a que es una de las zonas de mayor importancia gastronómica y comercial, con un alto flujo de "Rappitenderos". Para el análisis logístico, se realizó estudio de campo y la utilización de fuentes bibliográficas como artículos emitidos por periódicos y revistas locales, así como, estudios de Universidades Nacionales sobre el impacto de la industria 4.0 en el empleo y plataformas virtuales SoyRappi-App para repartidores, Waze y Google Maps. Con esta investigación, se busca analizar el impacto de las tecnologías 4.0 en este tipo empresas de economía colaborativa, promoviendo la eficiencia en el proceso de entregas y servicio al cliente.

Palabras clave: entrega, industria 4.0, logística, plataforma digital.

Abstract

This document corresponds to the research carried out at the RAPPI enterprise based on parcel and courier company located in Bogotá city and, how Industry 4.0 applies in its logistics model. The knowledge acquired in the engineering, methods and logistics areas is used to propose possible improvements to the delivery process. The study area was Zone T of the Bogotá city located between streets 79 to 85 and Avenues 11 to 15, because it is one of the areas of greatest gastronomic and commercial relevance, with a high flow of "SoyRappi" in much more of this. For the logistic analysis, a field study was carried out and the use of bibliographic sources such as local articles issued by newspapers and magazines, studies from National Universities based on the impact of Industry 4.0 on employment and virtual platforms like SoyRappi-App for deliverymen, Waze and Google Maps. This research seeks to analyze the impact of 4.0 technologies in this kind of collaborative economy companies promoting efficiency in the delivery process and customer service.

Key words: delivery, industry 4.0, logistics, digital platform.

1. INTRODUCCIÓN

En el Foro Económico Mundial realizado del 25 al 29 de enero de 2021, líderes del mundo, ONGs, académicos y científicos concluyeron que la "COVID-19 aceleró el

despliegue de las nuevas tecnologías hacia la Cuarta Revolución Industrial" y que el uso de la tecnología será un aspecto fundamental para la recuperación económica, ya que se ha logrado que muchas de las actividades que se realizaban de manera presencial ahora se efectúen

de forma eficiente en la virtualidad [1]. Este tipo de tecnologías como los sistemas logísticos interconectados, el Internet de las cosas, el Big Data y la realidad aumentada se han aplicado en diferentes sectores como el *Delivery*, el Retail, la moda y la industria hacia al control de procesos, calidad, eficiencia operativa y mejores experiencias al cliente. A continuación, se mencionan algunos de los considerados pilares de la tecnología 4.0:

- Computación en la nube: Servicios de gestión de recursos que se ofrecen a través de internet y que se cobran por lo que se consume [2].
- Internet de las cosas: Conjunto de tecnologías que permiten la comunicación entre objetos físicos y máquinas a través de la internet para generar nuevos modelos de negocios e ingresos, eficiencia operativa y mejores experiencias al cliente [3].
- Comunicación M2M: Cualquier tecnología que permita que dos dispositivos se comuniquen y envíen datos entre sí como el RFID, Bluetooth y la Wifi. Este tipo de conexión permite la optimización de los procesos de forma automática [4].
- Big Data y Analítica: Técnicas de analítica avanzada de grandes conjuntos de datos que facilita la toma de decisiones mediante el análisis de información que antes era inaccesible o inutilizable [5].

En Colombia, sectores como el cervecero y de logística, han sido algunos de los más destacados en la implementación de tecnologías para una operación más controlada; “Bavaria ha optado por la digitalización de sus plantas en el país para hacer más eficiente el proceso de producción de la cerveza” [6] y Servientrega “desarrolló una plataforma web autoservicio para agilizar procesos y proporcionar información en línea a los usuarios que les permita controlar la operación de su negocio” [7].

La logística en cualquier sector es fundamental ya que es un proceso sujeto a variabilidad en tiempos, calidad y precios que afecta, principalmente, la percepción del cliente final en cuanto al servicio recibido. Es así, que las empresas que se han reinventado y han logrado que sus procesos sean más flexibles y se acoplen a tecnologías

como la inteligencia artificial, la analítica de datos y las plataformas virtuales han logrado que las variabilidades antes mencionadas disminuyan en gran medida.

Empresas como Rappi, Domicilios.com y iFood que hacen parte de la actividad del Delivery, han reinventado esta operación a través del uso de las plataformas virtuales que permiten que el usuario final adquiera sus productos sin desplazarse y que tenga conocimiento sobre la hora de entrega. En este orden de ideas, Rappi, por ejemplo, llegó a ser muy flexible, porque pasó de prestar un servicio de solo pedidos de restaurantes y supermercados, a la gestión y entrega de electrodomésticos, cosmetología, floristería, deportes y compra de cualquier tipo de producto a través de sus servicios exclusivos [8].

Con base a la premisa anterior y la importancia de la tecnología 4.0 en la logística, el presente manuscrito tiene como finalidad, analizar la empresa Rappi y su modelo de trabajo en la zona T, sector de gran afluencia gastronómica, con el fin de identificar las tecnologías aplicadas a la entrega de pedidos y proponer alternativas de mejora en su operación.

2. ANTECEDENTES

Rappi es una multinacional fundada en Bogotá-Colombia, en el año 2015 por 3 jóvenes: Simón Borrero, fundador; Sebastián Mejía y Felipe Villamarín, cofundadores, quienes trabajaron en la creación de esta empresa tecnológica que funciona a través de una aplicación gratuita, descargable para los sistemas Android y iOS [9]. “Su objetivo es facilitar a las personas el acceso a diferentes formas de realizar sus compras o envíos locales sin necesidad de moverse del lugar donde se encuentran” [10] quienes expandieron esta iniciativa por diferentes países de América Latina como México, Brasil, Uruguay y Argentina a través de la App. A continuación, se menciona en la Tabla 1, los servicios disponibles en su plataforma para Colombia [11]:

Tabla 1. Servicios ofrecidos por Rappi para Colombia.

Tipo de servicio	Productos y servicios ofrecidos
Lo que quieras	Cajero automático a Domicilio, se puede retirar desde \$20.000 hasta \$400.000.
Lo que sea o Rappi favor	Comprar algo y entregarlo como un postre, ropa, calzado, accesorios o recoger algo y entregarlo.
Rappi travel	Servicios de vuelos (Avianca, Latam, Viva Air, Satena, Easy fly)
Vapeadores vype	Se enfoca en todos los insumos que se encuentran alrededor de los vapeadores.
Vida sana	Se encuentran los diferentes fruver, almacenes de cadena y tiendas especializadas en productos verdes.
Mercado solidario	Los usuarios/consumidores podrán donar menús de restaurantes aliados a la plataforma Rappi desde \$7.500 y serán entregados a las fundaciones inscritas.
Mi tienda	Las empresas pueden ofrecer sus productos de e-commerce, alimentos empaquetados o menús.
Life miles y Davipuntos	Tienen la opción de convertir millas o Davipuntos en rappicréditos para comprar en Rappi.
Servicios	El usuario podrá acceder a comprar cursos online de Excel, idiomas, lectura etc.
Shoping	Compra de tecnología, moda, belleza, hogar, regalos etc. También se pueden adquirir productos 100% colombianos.

3. MODELO DE TRABAJO

El modelo de trabajo y operación, se gestiona a través de su plataforma digital donde Rappi conecta empresas y clientes con el canal de distribución (Rappitendero) con el fin de que el usuario tenga la posibilidad de acceder a un sinnúmero de productos y servicios sin necesidad de desplazarse. De esta manera, las empresas tienen la posibilidad de ampliar su demanda a través de la modalidad de domicilio sin incurrir en costos de entrega. En este modelo, interactúan 3 actores: las empresas aliadas que ofrecen sus productos y servicios, los usuarios-clientes que acceden a ellos dependiendo su ubicación y cobertura y, los Rappitenderos quienes se encargan de llevar el pedido como forma de obtener ingresos complementarios a otras actividades, de forma flexible y no como una jornada laboral estricta.

Dentro del modelo, la aplicación informa cuando ocurren las siguientes etapas [12]:

- El Rappitendero toma el pedido.
- El restaurante empieza a preparar.
- Se despacha el pedido, es decir se entrega.

- Rappitendero.
- Cuando ocurren novedades en la entrega.
- Ruta del Rappitendero hasta la casa.

Los elementos involucrados dentro de este modelo son:

- Plataformas digitales: Son el medio a través del cual interactúan las empresas, usuarios-clientes y Rappitenderos para la compra, venta y aceptación del pedido de productos y servicios, basada en la economía de mercados.
- Empresas aliadas: Son las organizaciones que se inscriben para ofrecer sus productos y servicios a través de la plataforma digital y quienes a su vez monitorean la ubicación de los Rappitenderos y su situación a fin de informar cualquier detalle al usuario.
- Usuario-cliente: Persona que se registra como usuario para hacer uso de los servicios que ofrece la plataforma digital.
- Rappitendero: Persona encargada de entregar el producto o realizar el servicio solicitado por el usuario, quien no maneja contrato directo con la empresa que administra la aplicación. Para trabajar

en determinadas zonas deben contar con un número de puntos que se obtienen por la calificación del servicio y las entregas realizadas al día.

- Rappi Pit Stops: Son puntos físicos adaptados para cubrir ciertas necesidades de los Rappitenderos como parqueo de bicicletas, acceso a baños, espacio para descanso y espera de pedidos. Estas zonas tienen una capacidad de 30 a 50 personas y el horario de funcionamiento es de 6:00 am a 10:00 pm todos los días [13].

En cuanto a los horarios, aunque los colaboradores Rappi, no se encuentran sujetos a cumplir una jornada laboral, son libres de trabajar los días y en los horarios que prefieran; pueden ganar entre \$9.000 y \$14.000 pesos por hora, inclusive \$120.000 pesos en 12 horas. Sin embargo, para quienes utilizan esta modalidad como único trabajo, deben hacer mínimo 8 horas diarias para ganar al mes \$832.000 pesos, así también, deben tener cuidado al rechazar pedidos o estar mucho tiempo inactivos ya que pueden ser sancionados [14].

4. METODOLOGIA

Para el planteamiento de la propuesta se realizó lo siguiente:

- Investigación sobre la Industria 4.0, así como de las tecnologías que hacen parte y su aplicación en sectores industriales como el de *Delivery*.
- Selección y caracterización de la empresa de *Delivery* y su modelo de negocio.
- Identificación y delimitación de la zona de estudio (estado de vías, obras en curso).
- Caracterización comercial de la zona e identificación de los puntos Rappi en los establecimientos de comida.
- Caracterización del proceso logístico desde la solicitud del producto hasta la entrega al usuario final y análisis de las tecnologías aplicadas.
- Conclusiones y recomendaciones.

5. RESULTADOS

La zona T es una zona delimitada por dos calles peatonales que forman una T entre las calles 79 a 85 y las carreras 11 a 15 (Ver. Figura1) donde predominan los núcleos residenciales y de servicios que convierten al sector en uno de los epicentros comerciales y de servicios más importantes del norte de la ciudad [15].



Fuente: SDP Dirección de Norma Urbana, 2019

Figura 1. Mapa de la zona T [16].

Para el 2019, la localidad comenzó con la construcción y adecuación de 73 mil metros cuadrados de espacio público como adecuación de zonas verdes y nivelación de los pasos peatonales [17] por ser una zona de gran dificultad en movilidad especialmente en horas pico. Actualmente, estas obras se encuentran finalizadas. La zona T presenta en su mayoría, establecimientos dedicados al entretenimiento y la gastronomía. Se encuentran centros comerciales muy importantes como el Andino y el Jumbo de la 80 y restaurantes reconocidos de comida internacional y nacional.

En la visita realizada, se identificaron aproximadamente 110 establecimientos gastronómicos de los cuales 89 son aliados Rappi entre ellos Bogotá Beer Company, Presto, Macdonalds, WOK, Di Lucca, entre otros, donde la mayor parte de los Rappitenderos se ubican frente al establecimiento ocupando andenes y obstruyendo el paso. Para un domiciliario es más rentable hacer pedidos dentro de esta zona ya que el valor del domicilio es más alto.

A su vez, se identificó que el único Rappi Pit Stops ubicado en City parking Andino, cra 11 # 84, resulta insuficiente para todos los Rappitenderos, sumando la crisis sanitaria actual, se hace necesario que Rappi habilite al menos otro punto para su permanencia y así se disminuya la aglomeración en la zona. Por esta misma causa, muchos Rappitenderos han pensado en cambiar de empresa en búsqueda de mayores posibilidades de trabajo, porque este sector Rappi tiene mucha oferta de domiciliarios, lo cual dificulta el acceso a la prestación del servicio.

A continuación, se describen las tecnologías 4.0 utilizadas y, en la Figura 2, cómo funciona la aplicación:

- Computación en la nube e internet de las cosas: Rappi diseñó una plataforma web donde se administra y controla el proceso de pedidos, la cual puede ser usada ingresando a través de una URL o mediante la descarga de la aplicación para sistemas iOS y Android. Adicionalmente, esta empresa hace uso de redes sociales sobre los servicios ofrecidos como estrategia de marketing.
- Comunicación M2M: La empresa genera códigos ID que permiten la identificación de los Rappitenderos, así como hacer uso de la aplicación. Se usa la geolocalización para que los usuarios puedan ver el recorrido del Rappitendero y recibir notificaciones a través de un chat sobre el estado del pedido.
- Big Data y Analítica: A través de la aplicación, las empresas pueden monitorear cuantos pedidos han despachado, hacer seguimiento a las ventas e indicadores operativos. Rappi utiliza AppsFlyer la cual "permite a desarrolladores de apps, anunciantes y agencias medir y optimizar estrategias destinadas a la captación de clientes a través del uso de algoritmos y la integración con cientos de Ad Networks" 10 [18]; siendo pionera mundial en atribución móvil al encontrarse en el 98% de los aparatos inteligentes de todo el mundo [19].

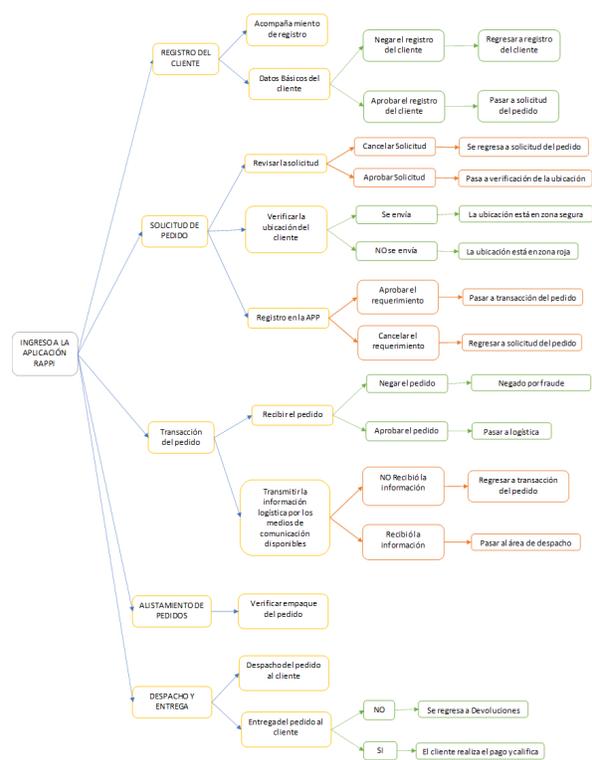


Figura 2. Proceso logístico Rappi.

6. CONCLUSIONES

- En la actualidad, Rappi se ha posicionado como una de las plataformas más importantes, ya que ha alcanzado altos niveles tecnológicos y de marketing; este negocio va más allá de gestionar pedidos de comidas, porque apunta a satisfacer todo tipo de necesidades de los usuarios.
- A partir del cambio al que tuvo que ajustarse todas las empresas con la crisis causada por la Covid-19, fue necesario la flexibilización de sus modelos de negocio, de tal manera que, sus estrategias de crecimiento se adaptaran e hicieran uso de las nuevas tecnologías para optimizar sus operaciones y manejar eficientemente la información de sus usuarios.
- Las empresas de *Delivery* como Rappi han demostrado que es posible desarrollar servicios que permitan un mejor control de la cadena de

distribución con la aplicación de las tecnologías 4.0, esta aplicación permite disminuir costos operativos para las empresas aliadas, al conectar a través de una aplicación a los clientes con una red de domiciliarios y a estos con los comercios.

7. RECOMENDACIONES

- Se sugiere para disminuir el número de Rappitenderos en la zona T, se ubique un Rappi Pit Stop en la torre de la 78- Cr 12 # 78-40, punto estratégico por la cercanía con los puntos de comidas y el espacio suficiente para su instalación.
- Uno de los retos de Rappi, es lograr diferenciarse más de los competidores como iFood, que han comenzado una etapa de mayor inversión en tecnología para mejorar la experiencia del usuario.
- La calidad de vida que se le puede brindar a una persona es vital dentro de las organizaciones, por lo anterior, se recomienda que Rappi mejore sus condiciones laborales, que velen por la seguridad del domiciliario y brinden algún tipo de seguro contra accidentes.

REFERENCIAS

- [1] B. Rohde, (8 de 02 de 2021). Tendencias de la Industria 4.0 en 2021. Obtenido de Cuatro Cero: <https://cuatro-cero.mx/noticias/tendencias-de-la-industria-4-0-en-2021/>
- [2] Hewlett Packard. (2021). Computación en la nube. Obtenido de <https://www.hpe.com/es/es/what-is/cloud-computing.html>
- [3] SAP. (2021). Internet de las cosas. Recuperado el 28 de 03 de 2021, de <https://www.sap.com/latinamerica/insights/internet-of-things.html>
- [4] Atria innovation. (19 de 11 de 2019). Comunicación M2M o Machine to Machine, en qué consiste. Recuperado el 28 de 03 de 2021, de Atria innovation: <https://www.atriainnovation.com/comunicacion-m2m-que-es/>
- [5] IBM. (2021). Analítica de Big Data. Recuperado el 28 de 03 de 2021, de <https://www.ibm.com/analytics/>
- [6] Furore. (11 de 06 de 2019). 3 Sectores de la industria en Colombia que están invirtiendo en tecnología 4.0. Obtenido de Furore: 3 Sectores de la industria en Colombia que están invirtiendo en tecnología 4.0
- [7] Revista Semana. (28 de 10 de 2020). Logística 4.0, un salto para el sector en Colombia. Obtenido de Semana: <https://www.semana.com/contenidos-editoriales/transporte/articulo/logistica-40-un-salto-para-el-sector-en-colombia/202000/>
- [8] Rappi. (22 de 04 de 2021). Rappi Página Oficial. Obtenido de <https://www.rappi.com/jobs/how-we-recruit>
- [9] Rappi. (13 de 01 de 2018). Cómo nació Rappi explicado por su fundador Simón Borrero. Obtenido de Rappi: <https://blog.rappi.com/como-nacio-rappi/>
- [10] L. O. Silva, Y. C. Blanco & J. Livingston, (s.f.). Comunicación, Capitalismo y Crítica en la Colombia Digital. Obtenido de Universidad de la Costa: <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/6149/Domicilios%2c%20Aplicaciones%20y%20Econom%c3%ada%20colaborativa.%20El%20caso%20de%20Rappi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [11] Rappi. (22 de 04 de 2021). Rappi Página Oficial. Obtenido de <https://www.rappi.com/jobs/how-we-recruit>
- [12] Rappi. (3 de 08 de 2016). Qué es Rappi y cómo funciona: conoce cómo mejoramos tu calidad de vida. Obtenido de Rappi: <https://blog.rappi.com/que-es-rappi/>
- [13] Rappi. (22 de 04 de 2021). Rappi Página Oficial. Obtenido de <https://blog.soyrappi.com/pit-stops/>
- [14] K. Patiño, (5 de 07 de 2019). Tras quema de maletas, ¿por qué se quejan los Rappitenderos? El Tiempo. Recuperado el 04 de 22 de 2021, de El Tiempo: <https://www.eltiempo.com/tecnosfera/apps/quejas-de-rappitenderos-y-respuestas-de-rappi-284776>
- [15-16] Alcaldía Mayor de Bogotá. (11 de 2020). Documento Técnico de Soporte del Plan de

Ordenamiento Territorial. Obtenido de http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/CONCEJO/4-DOCUMENTO_TECNICO_DE_SOPORTE_CONCEJO/DT11_Anexo01_Poligonos_de_alto_impacto.pdf

- [17] Canal Capital. (25 de 06 de 2020). Avanza obra de construcción en la Zona Rosa de Bogotá. Obtenido de: <https://conexioncapital.co/avanza-obra-de-construccion-en-la-zona-rosa-de-bogota/>
- [18] Merkle. (2 de 09 de 2020). AppsFlyer, saca el máximo rendimiento a tus campañas de Mobile. Obtenido de <https://www.merkleinc.com/es/es/blog/appsflyer-campanas-mobile>
- [19] I. Briceño, (23 de mayo de 2019). Radio Santa fe Bogotá. Obtenido de Radio Santa fe Bogotá: <http://www.radiosantafe.com/2019/05/23/tecnologia-appsflyer-de-rappi-ha-permitido-crecimiento-de-la-compania/>

APLICACIONES DE LA INDUSTRIA 4.0 EN LA ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LAS MERMELADAS

Applications of Industry 4.0 in the standardization of jams' production process

Ángel Isaac Burgos Naranjo¹, Daniel Sebastián Vásquez Játiva², Danny Orlando Navarrete Chávez³

¹⁻³Universidad San Francisco de Quito, Departamento de Ingeniería Industrial, Ecuador.

E-mail: ¹angelburgosnaranjo@gmail.com, ²dase266@gmail.com, ³dnavarrete@usfq.edu.ec

(Recibido febrero 10 de 2021 y aceptado junio 17 de 2021)

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo ilustrar una de las tantas aplicaciones de la Industria 4.0 mediante el uso de procedimientos analíticos multivariados y modelos de aprendizaje automático multirrespuesta, como un camino para analizar, modelar y estandarizar las relaciones entre las distintas variables de entrada y de salida que gobiernan la formulación de las mermeladas. Este trabajo de investigación es llevado a cabo en una compañía dedicada a la producción y comercialización de productos agropecuarios, describe la metodología de estudio utilizada que permitió hallar los rangos de valores para los niveles de azúcar (°Bx) y acidez (pH) que satisfacen matemática y estadísticamente los parámetros de liberación de producto terminado definidos por la misma compañía.

Palabras clave: consistencia, estándares, grados Brix, mermeladas, modelos, pH, variables.

Abstract

This article aims to illustrate one of the many applications of Industry 4.0 through the use of multivariate analytical procedures and multi-response machine learning models, as a way to analyze, model and standardize the relationships between the different input and output variables that drive jams' formulation. This research work is accomplished in a company dedicated to the production and commercialization of agricultural products, it describes the methodology study used that helped to find the ranges of values for the levels of sugar (°Bx) and acidity (pH) that satisfy mathematics and statistically the finished product release parameters defined by the own company.

Key words: consistency, standards, Brix degrees, jams, models, pH, variables.

1. INTRODUCCIÓN

Las confituras, jaleas y mermeladas son productos alimenticios de consistencia gelatinosa derivados de la cocción de frutas, azúcares, ácidos comestibles y pectinas [1]. Surgieron como un esfuerzo por conservar los alimentos para su consumo fuera de temporada gracias al incremento de su acidez y su contenido de sólidos solubles [2]. De hecho, estos dos últimos ingredientes son de gran importancia para la calidad de dichos alimentos.

Tal es así, que se afirma que la gelificación de las mermeladas con pectinas de alto metoxilo (AM) únicamente se logra trabajando con pequeños rangos de pH (2.8–3.5) y bajos contenidos de azúcar (~600–800 g/kg) [3]. Por ello, con el fin de minimizar el efecto de la variabilidad de la pectina natural presente en las frutas, es común añadir pectina comercial (entre 0 y ~10 g/kg del producto terminado) en la producción industrial de este tipo de conservas [3].

Los niveles mínimos y máximos permitidos de sólidos solubles y agentes gelificantes en las mermeladas dependen de la legislación y las entidades de regulación y control sanitario de cada país [1]. En el caso de Ecuador, por ejemplo, en [4] se indica que el límite mínimo de contenido de sólidos solubles en producto terminado se debe encontrar entre el 60% y el 65%.

Es por este tipo de requerimientos que la estandarización en la formulación de los alimentos es uno de los desafíos más retadores que comúnmente sufre el sector alimenticio, y esta industria no es la excepción [3]. La compañía ABC, firma dedicada a la producción y comercialización de productos agropecuarios, enfrenta ciertos retos para lograr niveles uniformes de consistencia, acidez y azúcares en sus cinco sabores de mermeladas: mora, frutilla, piña, guayaba y frutimora.

La variabilidad propia de la materia prima, así como la estacionalidad y el estado de madurez de las frutas, inciden directamente en la calidad de esta clase de conservas.

Por este hecho, el presente trabajo tiene como objetivo el utilizar procedimientos analíticos multivariados y modelos de aprendizaje automático multirrespuestas, como un camino para estudiar y modelar las relaciones entre las distintas variables de entrada y de salida que gobiernan la formulación de las mermeladas.

2. ANTECEDENTES

En lo que refiere a la literatura, distintos procedimientos estadísticos han sido comúnmente requeridos para describir y estudiar los factores que influyen las propiedades químicas, físicas, sensoriales y microbiológicas de los alimentos [5]. Entre algunas de las aplicaciones estadísticas más importantes en esta industria, se destacan el uso de métodos descriptivos e inferenciales, modelos de regresión y correlación, el control estadístico de la calidad y el diseño de experimentos [6].

Procedimientos analíticos menos comunes como el análisis multivariado y el aprendizaje automático, sin duda, también se han hecho presentes. Por ejemplo, en [7] se hizo uso del análisis múltiple de varianzas (MANOVA), el análisis de componentes principales (PCA) y el análisis canónico de discriminantes (CDA) con la finalidad de estimar los efectos de la variabilidad de los componentes químicos de los vinos en sus distintas respuestas sensoriales.

En [8] afirman que las publicaciones de modelos de aprendizaje automático en el estudio de los alimentos han registrado un crecimiento acelerado desde el año 2010. En [8] señalan, además, que existe un énfasis particular en la publicación de trabajos que utilizan modelos de ensamble o de conjunto, los cuales emplean múltiples algoritmos, simultáneamente, con el fin de lograr un mejor rendimiento predictivo. El bosque aleatorio, o *random forest* (RF) por su nombre en inglés, es uno de los más utilizados.

En [9] se hizo uso de *random forest*, en colaboración con PCA, para clasificar el tequila tradicional del mezcal. Más aún, en [10] se hizo uso del algoritmo de máquinas de vectores de soporte (SVM) y el de los k-vecinos más cercanos (kNN) para clasificar distintas muestras de cacao con base en su país de procedencia.

3. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una adaptación metodológica del proceso de modelado estadístico descrito en [11]. Esta contempla una serie genérica de actividades que comprenden desde la definición del problema y los objetivos del estudio (mismos que se detallaron en la Introducción de este trabajo), hasta el análisis y la interpretación de los resultados. El contar con una metodología de estudio garantiza que los modelos sean construidos sistemática y eficientemente [12].

3.1. Diseño del Plan de Recolección de Datos

Debido a la limitación de recursos disponibles para llevar a cabo el muestreo de la información, se hizo

uso de los datos históricos del proceso de producción de mermeladas. Estos fueron entregados por la misma compañía, ABC. El origen de los datos parte de fuentes secundarias, puesto que no fueron directamente diseñados para efectos del estudio [12].

El alcance de la información disponible comprende de enero a septiembre del año 2020, cubriendo así ocho meses de operación. Los datos disponibles reportaron una dimensionalidad de 574 filas y 22 columnas. Sin embargo, muchas de ellas cumplían únicamente con un rol informativo o referencial. Por este motivo las variables de entrada y salida de interés se resumen en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1. Variables de entrada.

No.	Variable	Notación
1	Sólidos solubles materia prima	bx_{mmp}
2	pH materia prima	pH_{mmp}

Tabla 2. Variables de salida.

No.	Variable	Notación
1	Sólidos solubles producto terminado	bx
2	pH producto terminado	pH
3	Consistencia producto terminado	$const$

Los grados Brix, o porcentaje de sólidos solubles, son útiles para cuantificar el contenido de azúcar tanto en las frutas como en las mermeladas, y son medidos con un refractómetro [13]. Por otro lado, el pH indica el grado de acidez o alcalinidad del producto, y se gradúa con un potenciómetro [14]. La consistencia, por su parte, es

una medida del grado de cohesión de las partículas que constituyen las mermeladas, y se la obtiene gracias a un consistómetro [15].

3.2. Análisis Exploratorio de Datos

En primer lugar, se normalizaron los datos disponibles con el fin de contar con una observación por registro, una variable por columna y una sola unidad de información por tabla [16]. Este proceso facilitó la generación de una base de datos independiente para cada uno de los cinco sabores de mermeladas. Los datos considerados por la compañía como atípicos y reprocesos fueron retirados, al igual que los registros duplicados.

Así también, los valores nulos o faltantes fueron rellenos con la mediana de sus respectivas variables, puesto que en [17] se argumenta que este criterio de imputación impacta mínimamente en la distribución original de los datos, y mantiene en gran medida sus propiedades tanto de tendencia central como de dispersión. Un resumen del análisis exploratorio de datos se muestra en la Tabla 3. Por su parte, la Tabla 4, muestra la cantidad total de datos iniciales y finales, discriminados por sabor de mermelada.

Tabla 3. Resumen del análisis exploratorio de datos.

Sabor	Duplicado	Reproceso	Atípico
Frutilla	31	10	2
Frutimora	15	0	3
Mora	6	1	8
Piña	26	8	9
Guayaba	13	4	4

Tabla 4. Cantidad de datos iniciales y finales por sabor de mermelada.

Sabor	Datos Iniciales	Datos Finales
Frutilla	166	123
Frutimora	95	77

Mora	111	96
Piña	104	61
Guayaba	91	70

Gracias a un análisis de dispersión realizado con diagramas de caja y bigote, se encontró que el producto terminado no es aprobado debido a la poca uniformidad en su consistencia. Esto concuerda con la revisión de la literatura y la motivación de este trabajo, y se aprecia en la Figura 1, para el caso del sabor de mermelada de frutilla.

Por otro lado, mediante la prueba de Shapiro-Wilk, se encontraron variables de respuesta no normales, las cuales se transformaron usando el método de potencias de Tukey. Sin embargo, no todas las distribuciones pudieron ser normalizadas por este ni por otros métodos, por lo que también se incorporaron técnicas no paramétricas para su estudio como se discutirá en los siguientes apartados.

3.3. Selección de Variables, Modelos o Algoritmos

En cuanto a los tipos de algoritmos utilizados, estos fueron clasificados en tres grandes categorías: modelos estadísticos multivariados, modelos lineales generalizados (GLM), y modelos de aprendizaje automático multirrespuesta. Los procedimientos multivariados fueron empleados debido a la presencia de correlaciones moderadas ($0.30 < r < 0.60$) entre las variables de respuesta, mismas que se observan en la Tabla 5, para el caso de la mermelada de frutilla [18].

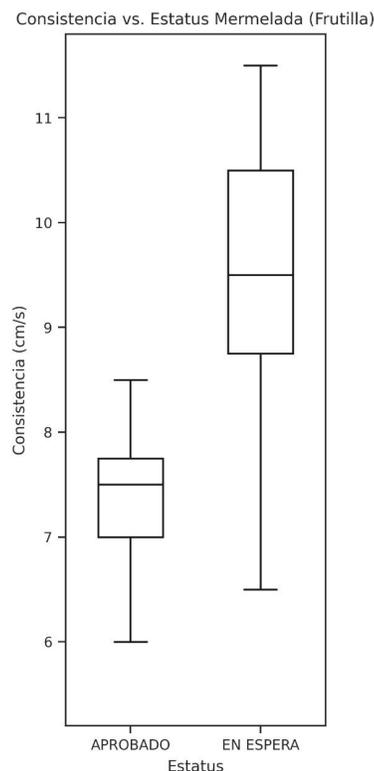


Figura 1. Diagrama de caja y bigote (mermelada de frutilla).

Tabla 5. Correlaciones entre las variables de salida para el caso del sabor de mermelada de frutilla.

Variable	const	bx	pH
const	1.00	-0.64	-0.35
bx	-0.64	1.00	0.42
pH	-0.35	0.42	1.00

Estos modelos evalúan las pruebas de hipótesis sobre la existencia de términos significativos en los algoritmos considerando dichas asociaciones. En este sentido, concretamente, se decidió hacer uso de modelos de regresión multivariada múltiple (MMR) debido a ciertas ventajas sobre otros procedimientos analíticos multivariados, como lo es su eficiencia computacional y facilidad de interpretación [18].

Para el caso de las variables de respuesta que no lograron ser transformadas a una distribución normal, se decidió emplear modelos lineales generalizados (GLM), los cuales son capaces de modelar distribuciones distintas a la normal, como las de Poisson, gamma, binomial, entre otras. Esto es algo que no es posible con las técnicas paramétricas convencionales [19].

Finalmente, se llevaron a cabo modelos de aprendizaje automático multirrespuesta como una poderosa herramienta predictiva y de gran utilidad para la compañía. Fueron dos los tipos de modelos seleccionados por su gran adaptabilidad a pequeños conjuntos de datos, tal y como lo señalan en [20]. El primero fue el modelo de árboles de decisión (Decision Tree o DT), mientras que el segundo fue el algoritmo k vecinos más cercanos (kNN).

3.4. Formulación, Evaluación y Validación de Modelos o Algoritmos

Previo a la implementación de los distintos tipos de modelos, se crearon predictores adicionales (ver Tabla 6) con la finalidad de capturar las relaciones no lineales entre las dos variables independientes disponibles. Lo anterior, cuidando que los términos añadidos no resulten en un posible sobreajuste de los modelos.

Tabla 6. Nuevas variables añadidas.

2° grado	3° grado	4° grado
pH_{mmp}^2	pH_{mmp}^{2*} bx_{mmp}	pH_{mmp}^{2*} bx_{mmp}^2
bx_{mmp}^2	pH_{mmp}^* bx_{mmp}^2	-
pH_{mmp}^* bx_{mmp}	-	-

En [21] se detalla que para modelos de regresión de mínimos cuadrados parciales (OLS) de efectos fijos, como lo es la regresión multivariada múltiple, no es necesario que los modelos sean lineales en las covariables; estos mantienen sus propiedades siempre y cuando sean

lineales en los parámetros.

4. RESULTADOS

Se utilizó MMR para estudiar cada variable de respuesta normal, considerando todos los sabores de mermeladas. Con la ayuda de MANOVA se identificaron los términos estadísticamente significativos en cada modelo, así como sus efectos expresados en términos de coeficientes. El rendimiento de los modelos fue evaluado con el estadístico R^2 , y su validez se corroboró con un análisis de residuales. Los resultados obtenidos se observan en las ecuaciones (1) a (6).

4.1. Frutilla

$$pH = 0.59ph_{mmp} + 1.40 \times (R^2=0.25) \quad (1)$$

4.2. Frutimora

$$pH = -0.25bx_{mora} + 0.015bx_{mora}^2 + 4.11 \times (R^2 = 0.08) \quad (2)$$

4.3. Piña

$$pH = -5.44ph_{mmp} + 0.87ph_{mmp}^2 + 10.89 \times (R^2 = 0.28) \quad (3)$$

$$const = 65.76ph_{mmp} - 9.54ph_{mmp}^2 - 98.47 \times (R^2 = 0.29) \quad (4)$$

4.4. Guayaba

$$pH = 0.35ph_{mmp} - 0.012bx_{mmp} + 2.27 \times (R^2 = 0.39) \quad (5)$$

$$brix = 1.37ph_{mmp} - 0.25bx_{mmp} + 66.14 \times (R^2 = 0.33) \quad (6)$$

Para las variables de respuesta con distribuciones distintas a la normal, aún después de haber sido transformadas, se hizo uso de GLM. Para estimar su rendimiento se utilizó el Criterio de Información de Akaike (AIC) y la Regla de Bondad de Ajuste (GF) propuesta en [22]. Los resultados obtenidos se observan en las ecuaciones (7) a (8).

4.5. Frutilla

$$brix = 478ph_{mmp} + 49 \times (AIC = 444.96, GF = 2.11) \quad (7)$$

4.6. Guayaba

$$const = 0.57bx_{mmp} - 2.25 \times (AIC = 221.09, GF = 1.43) \quad (8)$$

Como una de las aplicaciones de la Industria 4.0, se corrieron modelos de aprendizaje automático multirrespuesta. Los algoritmos de árboles de decisión y kNN fueron elegidos como una herramienta útil para poder predecir los resultados de nuevas o futuras observaciones en cada uno de los cinco (05) sabores de mermeladas. Su rendimiento se aprecia en la Tabla 7, en términos del error absoluto medio (MAE).

Tabla 7. Error absoluto medio por cada sabor de mermelada.

Sabor	MAE (DT)	MAE (kNN)
Frutilla	0.91	0.77
Frutimora	0.71	0.58
Mora	0.63	0.55
Piña	0.47	0.59
Guayaba	0.53	0.51

Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad con los modelos MMR y GLM resultantes. Con el objetivo de identificar qué rangos de las variables de entrada satisfacen los parámetros de liberación de producto terminado, entregados por la compañía. Los rangos encontrados para el pH y los grados Brix de materia prima por cada sabor de mermelada se ilustran en la Tabla 8.

Tabla 8. Correlaciones entre las variables de salida para el caso del sabor de mermelada de frutilla.

Sabor	Variable de salida	Rango pH _{mmpp}	Rango bx _{mmpp}
Frutilla	pH	[3.22-3.90]	-
	bx	[3.32-4.16]	-
Frutimora	pH	-	[8.34-12.26]
Guayaba	pH	[2.36-4.65]	-
	const	-	[4.82-10.09]
Piña	pH	[3.46-3.91]	-

5. CONCLUSIONES

Gracias al trabajo realizado se logró modelar la formulación de cuatro de los cinco sabores de mermeladas. Lo que significó, encontrar los factores significativos en cada uno de los modelos; así también, se estimó su efecto o importancia relativa en términos de coeficientes o parámetros. Para las tres grandes categorías de algoritmos, adicionalmente, se evaluó su rendimiento mediante el cálculo de distintas métricas.

Mediante un análisis de sensibilidad, estos modelos fueron de gran utilidad para encontrar rangos de las variables de materia prima que satisfacen los parámetros de liberación de producto terminado establecidos por la compañía. Dichos rangos obedecen a las relaciones que las regresiones obtenidas lograron capturar, y deben ser validados a nivel de planta. Por ello se sugiere realizar corridas piloto entre dichos valores, y monitorear sus respuestas en la línea del proceso.

Los modelos multivariados correspondientes a los sabores de frutilla, piña y guayaba, así como los modelos lineales generalizados, revelan un ajuste relativamente bueno a las distintas variables de respuesta bajo estudio. Esto se concluye gracias a los resultados de los coeficientes de determinación y la regla de bondad de ajuste propuesta en [22].

En [23] y [24] definen que los valores recomendados de R² deben ser iguales o superiores a 0.13 y 0.33, respectivamente, para poder argumentar que la varianza total de una variable de respuesta explicada por un modelo de regresión es la adecuada. En este sentido, se concluye que los coeficientes obtenidos se encuentran en estos límites. Más aún, las pruebas de bondad de ajuste realizadas (GF) no superan considerablemente la unidad, tal y como lo sugieren en [22].

Finalmente, como seguimiento a este trabajo, se propone a la compañía implementar un estudio a mediano plazo relacionado con una metodología estadística experimental conocida como operación evolucionaria

[25]. Esta consiste en un método de mejora continua y monitoreo para operaciones a larga escala, por lo que se ajusta de manera oportuna a las necesidades de ABC.

Cabe resaltar que este método busca garantizar la integridad y la calidad de los productos fabricados en planta, al no realizar cambios, suficientemente, drásticos en los distintos niveles de las variables de entrada del proceso. Este tipo de diseño quiere obtener relaciones causa-efecto en el estudio de la consistencia de las mermeladas, sin afectar negativamente los productos ni incurrir en grandes costos para las empresas

REFERENCIAS

- [1] V. Fuster, (2004). Mermeladas y confituras. En P. López, J. Boatella, y R. Codony, Química y bioquímica de los alimentos II (pág. 105). Barcelona: Edicions Universitat Barcelona.
- [2] R. Baker, D. Barrett, N. Berry y Y. Hui, (2005). Fruit preserves and jams. En D. Barrett, L. Somogyi, y H. Ramaswamy, Processing fruits: science and technology (p. 113). Boca Raton: CRC Press LLC.
- [3] J. Garrido, D. Genovese y J. Lozano, (2015). Effect of formulation variables on rheology, texture, color, and acceptability of apple jelly: Modelling and optimization. *Food Science and Technology*, 325-332.
- [4] Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. (2013). Norma para las confituras, jaleas y mermeladas. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/n-te-inen-2825.pdf>
- [5] V. De Araújo Calado, D. Granato y B. Jarvis, (2014). Observations on the use of statistical methods in food science and technology. *Food Research International*, 137-149.
- [6] J. Bower, (2013). Statistical methods for food science: Introductory procedures for the food practitioner. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [7] I. Arvanitoyannis, S. Kallithraka, M. Katsota, E. Psarra y E. Soufleros, (1999). Application of quality control methods for assessing wine authenticity: Use of multivariate analysis (chemometrics). *Trends in Food Science & Technology*, 321-336.
- [8] G. Bagur, L. Cuadros, A. González y A. Jiménez, (2019). Alternative data mining/machine learning methods for the analytical evaluation of food quality and authenticity – A review. *Food Research International*, 25-39.
- [9] S. Martinez, A. Moreno, D. Cazares & R. Winkler, (2017). Automated chemical fingerprinting of Mexican spirits derived from agave (tequila and mezcal) using direct-injection electrospray ionization (DIESI) and low-temperature plasma (LTP) mass spectrometry. *Analytical Methods*.
- [10] F. Botchway, F. Han, X. Huang y E. Teye, (2014). Discrimination of cocoa beans according to geographical origin by electronic tongue and multivariate algorithms. *Food Analysis Methods*, 360-365.
- [11] G. Shmueli, (2010). To explain or to predict? *Statistical Science*, 289-310.
- [12] G. Shmueli y O. Koppius, (2006). Predictive analytics in information systems research. Paphos: Conference on Information Systems and Technology.
- [13] W. Graham y A. MacGillivray, (1969). Brix Determination. Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association, 215-2018.
- [14] E. Álzate, R. Escobar y J. Montes (2012). Acondicionamiento del sensor de pH y temperatura para realizar titulaciones potenciométricas. *Scientia Et Technica*, vol. XVII, núm. 51, agosto, 2012, pp. 188-196. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.
- [15] P. Jordano, (2000). Fruits and frugivory. En M. Fenner, Seeds: The ecology of regeneration in plant communities (pp. 125-166). Wallingford: CABI Publ.
- [16] H. Wickham, (2014). Tidy data. *Journal of Statistical Software*, 1-24.
- [17] P. Bruce, P. Gedeck, N. Patel y G. Shmueli, (2020). Data mining for business analytics. Hoboken: John Wiley & Sons.
- [18] P. Dattalo, (2013). Analysis of multiple dependent variables. New York: Oxford University Press.
- [19] P. McCullagh y J. Nelder, (1989). Generalized linear models. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC.

- [20] J. Prakash, (2018). Breaking the curse of small datasets in machine learning. Available in: Towards Data Science: <https://towardsdatascience.com/breaking-the-curse-of-small-datasets-in-machine-learning-part-1-36f28b0c044d>
- [21] B. Kenkel, (2016). Higher order terms. Available in: Reintroduction to linear regression: <http://bkenkel.com/psci8357/notes/04-higher-order.html>
- [22] D. Montgomery, E. Peck y G. Vining, (2015). Introduction to linear regression analysis. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [23] W. Chin, (1998). The partial least squares approach for structural equation modeling. En G. Marcoulides, Modern Methods for Business Research (pp. 295-236). London: Lawrence Erlbaum Associates.
- [24] J. Cohen, (1998). Statistical power analysis for the behavioral sciences. New York: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- [25] Douglas C. Montgomery, (2013). Design and analysis of experiments. New York: Wiley.

ACELEROGRAMAS Y ESPECTROS DE RESPUESTA EN MEDIOS: SUELO Y ROCA, BOYACÁ, COLOMBIA

Comparison of accelerograms and response spectra in media: soil and rock, Boyacá, Colombia

Luis Humberto Pinto Morales¹, María del Carmen Fuentes Fuentes²

¹I. GEOSOFTMINE LTDA, Colombia. ² Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Geológica, Grupo de Investigación INGEOFISICA, Colombia.

Email: ¹h.pintomorales@gmail.com ²maria.fuentes@uptc.edu.co

(Recibido febrero 20 de 2021 y aceptado junio 27 de 2021)

Resumen

El control de vibraciones implica la medición de estas perturbaciones en una voladura de producción. Si el nivel de vibraciones registrado fuera menor que el criterio de prevención, podrá incrementarse progresivamente la carga operante hasta que las intensidades de vibración fueran iguales al valor máximo admisible. En ese sentido, los análisis realizados en éste artículo sirven como estudios preliminares para establecer una tabla patrón de cargas máximas por tiempos de retardo en relación con la distancia a las estructuras a proteger, la velocidad y/o aceleración de la partícula.

Palabras clave: *geofísica, geoelectrica, sondeo eléctrico vertical.*

Abstract

Vibration control involves the measurement of these disturbances in a production blasting. If the registered level of vibrations is less than the criterion of prevention, the operating load may be progressively increased until the vibration intensities were equal to the maximum allowable value. In this sense, the analyses in this article serves as preliminary studies to establish a standard table of maximum load for delay times in relation to the distance to the structures to protect, speed and/or acceleration of the particle.

Key words: *geophysics, geoelectrical, vertical electrical sounding.*

1. INTRODUCCIÓN

En este artículo se realiza una cualificación de los efectos de las voladuras en canteras, con el fin de reducir los niveles de las perturbaciones, en donde se establece un patrón de voladuras para los sitios de estudio; que cumpla con las normas ambientales vigentes a un costo aceptable. La utilización de explosivos, para fragmentar material rocoso, produce vibraciones en el terreno [7] y en una explotación minera, la perforación y voladura

ocupa un lugar destacado, no solo por su peso dentro de los costos de operación, sino también por su influencia directa en los rendimientos de las fases del ciclo: carga, transporte y trituración.

Alteraciones producidas por las voladuras

Las voladuras efectuadas en las explotaciones mineras a cielo abierto; y subterráneas, generan vibraciones en el terreno, ya que una parte de la energía del explosivo se transforma en ondas elásticas que se transmiten a través

del medio rocoso circundante. Estas vibraciones pueden causar daños a estructuras próximas, edificaciones, obras subterráneas, etc.- e incluso molestias a personas que

residan cerca de las áreas de trabajo-. Otra alteración que se genera, además de las proyecciones de fragmentos de roca, lo constituye la sobrepresión aérea (Ver Figura 1).

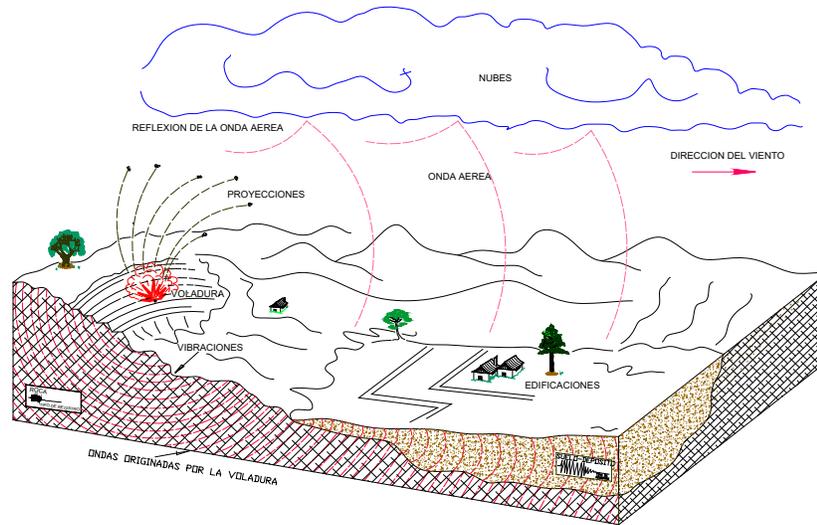


Figura 1. Perturbaciones originadas por las voladuras de rocas.

Vibraciones terrestres

En el campo de la ingeniería sísmica se distinguen dos grupos de ondas: las internas y las superficiales. Las ondas internas viajan en el macizo rocoso y se transmiten de forma esférica en los mismos. Dentro de este grupo se distinguen las ondas primarias P, que deforman la roca en la misma dirección de propagación estirándola y comprimiéndola como si fuera un muelle, y las ondas secundarias o S, que hacen vibrar la roca y viajan perpendicularmente a la dirección de propagación creando esfuerzos cortantes [6].

Las ondas superficiales se transmiten generalmente por el terreno, si bien pueden propagarse por cualquier otra superficie donde entren en contacto dos materiales distintos: aire - agua, rocas de diferentes características etc. [8].

La sismología, como ciencia observacional, considera a las ondas superficiales Rayleigh y Love como un tipo particular de ondas sísmicas que se propagan paralelas a la superficie de un medio. Estas ondas tienen su amplitud

máxima en la superficie libre y disminuye exponencialmente con la profundidad. Tienen una velocidad de trasmisión menor que las internas y sus frecuencias son más bajas, por lo que, en ocasiones pueden verse en las colas de los trenes de ondas que se generan en las voladuras, amortiguándose menos que las ondas internas y portando a una cierta distancia la mayor parte de la energía.

En los trenes de ondas reales, van superpuestas varias ondas independientes y no existe una sola frecuencia de vibración, sino un amplio margen de frecuencias con un valor más o menos dominante. No obstante, en ocasiones se asimila el paso de las ondas por un punto a un movimiento sinusoidal simple, cuyas ecuaciones de movimiento son:

$$X = V_{m\acute{a}x} * 2\pi * f \tag{1}$$

f = Frecuencia de vibración

$$V_{m\acute{a}x} = D_{m\acute{a}x} * 2\pi * f \tag{2}$$

Donde:

$V_{m\acute{a}x}$ = Velocidad de vibración máxima

$A_{m\acute{a}x}$ = Aceleración de vibración máxima

$$A_{m\acute{a}x} = D_{m\acute{a}x} * (2\pi * f)^2 \quad (3)$$

$D_{m\acute{a}x}$ = Desplazamiento máximo del punto al paso de la onda.

Las frecuencias de las vibraciones dependen de las propiedades del macizo y del espesor y tipo de recubrimiento. En general, con rocas aflorantes y competentes, se tienen frecuencias altas (20 – 80 Hz), amplitudes bajas y amortiguación rápida.

En materiales de recubrimiento se tienen frecuencias bajas (10 – 20 Hz) y amplitudes elevadas. La Figura 2, es un ejemplo de frecuencias comunes en rocas [4].

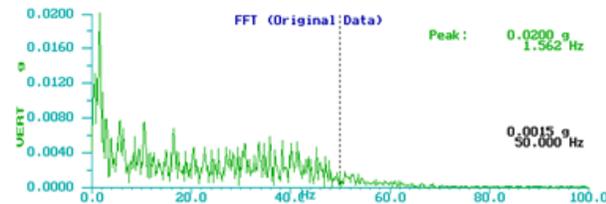


Figura 2. Espectro de frecuencia en función de la gravedad, (componente vertical).

Estudio de vibraciones

La fragmentación de las rocas por un explosivo incluye: la generación de una onda de tensión por la presión del terreno, el desarrollo de un sistema de grietas por la penetración de gases a alta presión y la liberación y aceleración de la masa rocosa fragmentada a una determinada velocidad [1].

La apertura de las grietas por la expansión de los gases es el mecanismo que más contribuye a la vibración del terreno, generando ondas superficiales que no tienen gran dispersión y que se disipan menos que las ondas internas. De esta manera, el objeto básico de un estudio de voladuras se concreta en dos puntos:

- Conocer la ley de propagación que relaciona cargas detonantes y distancias con la intensidad máxima de vibración generada.
- Conocer las frecuencias o periodos dominantes y el efecto de la superposición entre disparos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Con los datos de frecuencias o periodos dominantes y empleando criterios definidos por la normativa vigente, se puede adoptar un límite de vibración o umbral adecuado que una vez introducido en la ley de propagación, permita calcular la carga máxima a detonar en cada distancia a la estructura a proteger.

Los parámetros, generalmente, utilizados para caracterizar la magnitud de la vibración son la velocidad y la aceleración de la partícula, por ser los que mejor se correlacionan con el riesgo de daños a estructuras.

La importancia de esta investigación radica, esencialmente, en el contraste entre la instalación de acelerógrafos en dos puntos determinados. Es decir, se trabajará en función de la aceleración máxima de la partícula utilizando datos suministrados por dos acelerógrafos ubicados en las canteras de calizas en las minas “Nobsa y Suescún”. En donde, el acelerógrafo de Nobsa está ubicado sobre suelo y el de Suescún sobre roca.

Instrumentación

El acelerógrafo, es un instrumento diseñado para que se active en la zona de altas frecuencias del espectro de respuesta, en la cual domina la aceleración; mientras que, el sismógrafo es diferente en cuanto a su diseño, pues este responde, principalmente, en la zona de frecuencia intermedia, en la cual domina la velocidad.

En la Figura 3, se aprecia un acelerógrafo esquematizado como una caja resistente que está sujeta contra el medio por el cual se desplazan las ondas sísmicas; la caja se mueve exactamente igual que el suelo. Dentro de la caja se mueve un oscilador simple amortiguado [2].

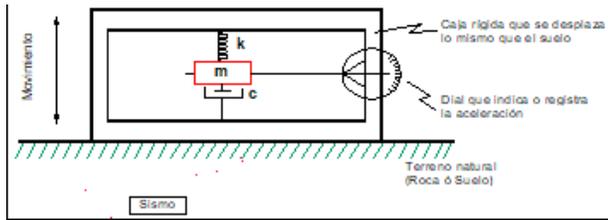


Figura 3. Oscilador simple.

Un oscilador simple es un sistema lineal de un grado de libertad, en el cual, la posición de la masa o cuyas características energéticas en función del tiempo, pueden presentarse en términos de una variable. En el caso de los sistemas mecánicos, esta variable fundamental es el desplazamiento, puesto que de éste se derivan la velocidad y la aceleración [3].

Este tipo de mecanismo proporciona un registro visual de la vibración producida por la voladura, de tal manera que, permite su análisis. Se basa en los cambios de voltaje producidos en el sensor, que son calibrados, amplificados y referenciados introduciendo una escala de tiempos [5]. El registro puede hacerse sobre un papel fotográfico o

bien en un soporte magnético que posibilita un estudio más detallado con su posterior reproducción.

El acelerograma, es el registro gráfico que se logra al pasar las ondas sísmicas por el sitio donde se ha colocado un instrumento que las detecta y registra, este puede reflejar las tres componentes del movimiento ondulatorio (Ver Figura 4).

Las componentes del sistema ondulatorio son:

- Longitudinal **L**: mide la componente en la dirección voladura- registro.
- Transversal **T**: mide la componente perpendicular a la dirección de trasmisión de la onda de trasmisión.
- Vertical **V**: mide la componente perpendicular al plano de la superficie.

La aceleración de la partícula total se obtiene por la combinación de las tres componentes en el vector resultante usando la fórmula:

$$a_R = \sqrt{a_L^2 + a_T^2 + a_V^2} \tag{4}$$

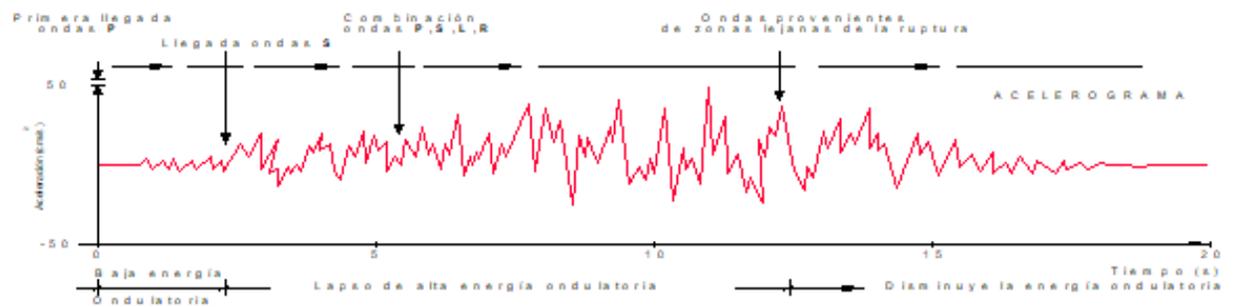


Figura 4. Acelerograma y fases de energía.

Características instrumentales

Acelerógrafo ubicado en la mina Nobsa (figura 5)
 Código: K2- 395
 Marca: KINEMATRICS
 Modelo: ETNA
 Tipo: DIGITAL

Sensibilidad: 0.1 % de la escala total (2 Gales de aceleración del terreno)
 Fecha de instalación: 24 febrero de 1996 Fecha de la última configuración: 20 de agosto de 2017
 Altura: 2495 m.s.n.m.



Figura 5. Acelerógrafo digital K-2_ KINEMETRICS.

Acelerógrafo en la mina Suescún (Figura 6)

Código: CSUES

Marca: KINEMETRICS

Modelo: K- 2

Tipo: DIGITAL

Sensibilidad: 0.02 % de la escala total (0.4 Gales de aceleración del terreno)

Fecha de instalación: 24 febrero de 1996

Fecha de la última configuración: 20 de agosto de 2017

Altura: 2508 m.s.n.m.



Figura 6. Acelerógrafo digital K-2_ KINEMETRICS.

Normativa colombiana relativa a vibraciones

La norma vigente actual se plasma en el capítulo A.2, Sub. A.12.2 y A.12.3, de la Norma Sismo Resistente de 1998 (NSR-98), donde se muestra cómo y con qué parámetros se deben realizar los espectros de umbral de daño para diferentes zonas del país.

La finalidad de estos estudios es realizar una cualificación de los efectos de las voladuras y si éstas superan o no los límites establecidos (umbral de daño), con el objetivo de reducir y controlar niveles de perturbación.

Por otro lado, la normativa española resulta más conservadora, con un rango de seguridad igual a 0.1 g, (Ver Figura 7), considerando a los eventos que sobrepasen de este valor, como precaución desde 0 - 80 Hz y velocidades de partículas que van desde 2.3 - 50 mm/seg.

El umbral de 1 g, es considerado como daño para velocidades que van entre los 15 y 20 mm/seg hasta superiores a 500 mm/seg y frecuencias superiores a 100 Hz.

Espectro de umbral de daño

Definido por la Norma Sismo resistente, (NSR-98), es un espectro que trabaja la aceleración máxima de la partícula en Gales, (g, ordenadas), en función del período dominante del sitio en segundos (T, abscisas).

Este espectro fue desarrollado con la finalidad de comprobar o verificar que las estructuras y elementos estructurales, se mantengan dentro del rango elástico de respuesta cuando se presenten movimientos sísmicos o en nuestro caso, vibraciones productos de la voladura.

En las Tablas 1- 3, se observan los parámetros de cálculo empleados para ambos sitios de monitoreo según [9].

Espectros de umbral de daño para Nobsa y Suescún

Estos espectros se encuentran representados en escala aritmética en las Figuras 8 y 9; definidos para un coeficiente de amortiguamiento del 2 % del crítico. Los gráficos muestran el espectro de la aceleración (Sad), en el eje de las ordenadas y en las abscisas, el período calculado en sus fases: T, To, Td y Tl.

Según los datos obtenidos, el tope máximo seguro para los espectros de aceleración de Nobsa y Suescún, con base en la normativa colombiana, es de Sad = 0.12 g.

Digitalización y análisis de acelerogramas

En la digitalización y análisis de los acelerogramas, se deben tener en cuenta los espectros de respuesta que están relacionados con el umbral de daño.

Se define como respuesta al conjunto de máximos valores de desplazamiento, velocidad o aceleración, que sobre un oscilador simple puede originar una capa aleatoria o determinista [10].

El método de los espectros de respuesta presentados se emplea con mayor confiabilidad en términos de discriminación relativa de la respuesta sísmica similar de las áreas estudiadas.

En la Figura 10, se observa la superposición de los dos espectros.

Tabla 1. Parámetros de cálculo.

PARAMETROS DE UMBRAL DE DAÑO	NOMENCLATURA
Aa	Coficiente que representa la aceleración pico efectiva, para diseño.
Ad	Coficiente que representa la aceleración pico efectiva para el umbral de daño.
I	Coficiente de importancia, según grupo de uso asignado para cada edificación.
S	Coficiente de sitio, según el tipo de perfil de suelo.
S̄	Coficiente de sitio, para ser empleado en el espectro elástico de umbral de daño ($S = 1.25 \cdot S$).
Sad	Valor de espectro de aceleraciones del umbral de daño, para un periodo de vibración dado. Máxima aceleración horizontal para un umbral de daño, expresada como una fracción de aceleración de la gravedad, para un sistema de un grado de libertad con un periodo de vibración T.
T	Periodo de vibración del sistema elástico, en segundos.
Td	Periodo de vibración, en segundos, correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de umbral de daño, para periodos cortos y la parte descendente del mismo.
To	Periodo de vibración, en segundos, correspondiente al inicio de la transición de la aceleración pico efectiva constante hasta el periodo de vibración Td.
TL	Periodo de vibración, en segundos, correspondiente a la transición entre la zona de aceleración constante del espectro de diseño, para periodos largos.
g	Aceleración debida a la gravedad (g).

Tabla 2. Datos obtenidos según NSR-98.

SECTOR	TIPO DE PERFIL DE SUELO	Aa	Ad	I	S	S̄	To	Td	TL
NOBSA	S ₂	0.30	0.04	1.0	1.2	1.5	0.25	0.75	2.88
SUESCUN	S ₁	0.30	0.04	1.0	1.0	1.25	0.25	0.625	2.4

Tabla 3. Fórmulas para el cálculo del umbral de daño en los sectores de estudio.

MINA DE NOBSA			MINA DE SUESCUN		
$S_{ad} = 3.0 \cdot A_d \cdot I$	$= 3.0 \cdot 0.04 \cdot 1.0$	$= 0.12 \text{ g}$	$S_{ad} = 3.0 \cdot A_d \cdot I$	$= 3.0 \cdot 0.04 \cdot 1.0$	$= 0.12 \text{ g}$
$S_{ad} = A_d \cdot I$	$= 0.04 \cdot 1.0$	$= 0.04 \text{ g}$	$S_{ad} = A_d \cdot I$	$= 0.04 \cdot 1.0$	$= 0.04 \text{ g}$
$S_{ad} = A_d \cdot I / 2$	$= 0.04 \cdot 1.0 / 2$	$= 0.02 \text{ g}$	$S_{ad} = A_d \cdot I / 2$	$= 0.04 \cdot 1.0 / 2$	$= 0.02 \text{ g}$
$S = 1.25 \cdot S$	$= 1.25 \cdot 1.2$	$= 1.5$	$S = 1.25 \cdot S$	$= 1.25 \cdot 1.0$	$= 1.25$
$T_o = 0.25 \text{ Seg}$			$T_o = 0.25 \text{ Seg}$		
$T_d = 0.50 \cdot S$	$= 0.50 \cdot 1.5$	$= 0.75 \text{ g}$	$T_d = 0.50 \cdot S$	$= 0.50 \cdot 1.25$	$= 0.625 \text{ g}$
$T_L = 2.4 \cdot S$	$= 2.4 \cdot 1.2$	$= 2.88 \text{ Seg}$	$T_L = 2.4 \cdot S$	$= 2.4 \cdot 1.0$	$= 2.4 \text{ Seg}$

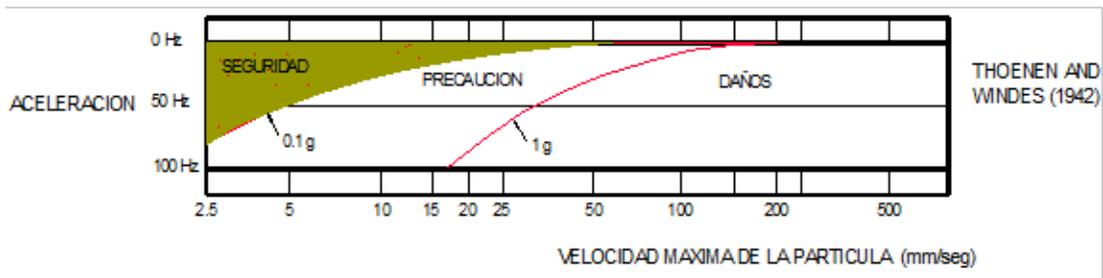


Figura 7. Legislación española vigente que se recoge en el reglamento general de normas básicas de seguridad minera, Instituto Tecnológico Geominero de España, ITGE.

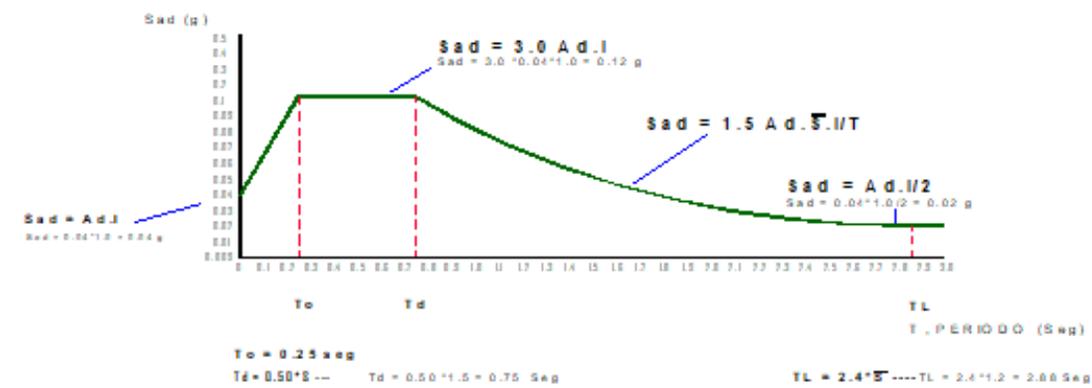


Figura 8. Aceleración espectral (g) vs periodo dominante (seg).

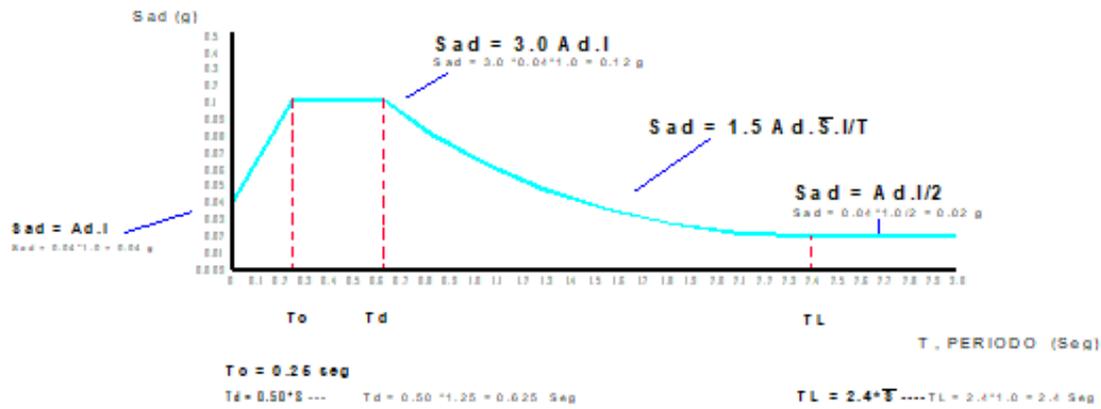


Figura 9. Aceleración espectral (g) vs periodo dominante (seg).

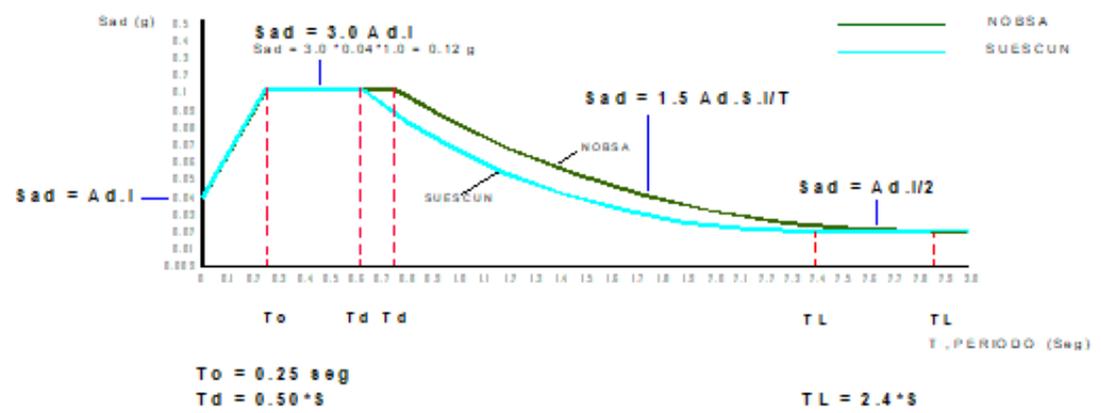


Figura 10. Aceleración espectral (g) vs periodo dominante (seg).

3. RESULTADOS

Este proyecto trabajó en función de la aceleración, sin embargo, en otros proyectos se adelantan estudios basados, fundamentalmente, en la velocidad de la partícula. En este caso, los umbrales para controlar las perturbaciones se establecen en función de la frecuencia de vibración dominante y del tipo de estructura a proteger, utilizando como parámetro de medida la velocidad con que llega la partícula a la edificación.

En los estudios preliminares se determina el comportamiento sísmico del terreno mediante la definición de la ley de propagación, realizando voladuras con diferentes cargas instantáneas y registros en

posiciones diferentes que cubran el área de interés. Al conocer la frecuencia dominante, el tipo de estructura y consecutivamente, el criterio de daños, con la ley de propagación, se elabora la tabla de cargas máximas operantes por tiempos mínimos de retardos en función de la distancia. En seguida, se analizan los acelerogramas y se calculan los espectros de umbral de daño en escala Log - Log.

Los programas de análisis están desarrollados en esta escala con el fin de eliminar ondas no deseadas, caracterizando así las vibraciones dentro de un rango del espectro de umbral de daño expuestos anteriormente para Nobsa y Suescún, en escala aritmética.

Sector Nobsa

El acelerógrafo está ubicado en suelo con una sensibilidad de 0.1 % de la escala total, con amortiguamiento del 2 y el 5 % del crítico. Los espectros de las tres componentes presentan una trayectoria similar, donde las mayores aceleraciones se presentan para periodos de 0.25 seg y frecuencias de 4 Hz aproximadamente, (Ver Figuras 11 - 16 y Tabla 4).

Sector Suescun

El acelerógrafo está ubicado en roca con una sensibilidad de 0.02 % de la escala total, con amortiguamiento del 2 y el 5 % del crítico.

Los espectros de las tres componentes (L, longitudinal; V, vertical y T, transversal); presentan una trayectoria similar, donde las mayores aceleraciones se observan para periodos de 0.05 seg y frecuencias de 20 Hz aproximadamente.

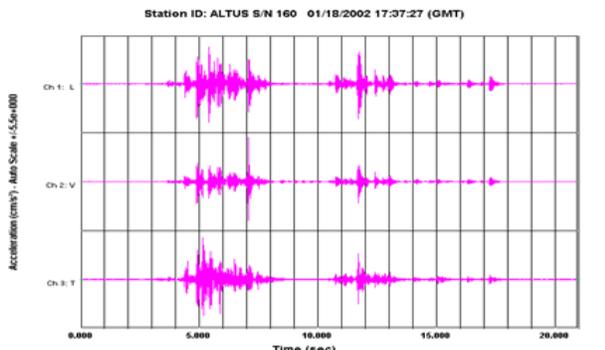


Figura 11. Acelerogramas de aceleración (g) vs tiempo (seg) en las tres componentes.

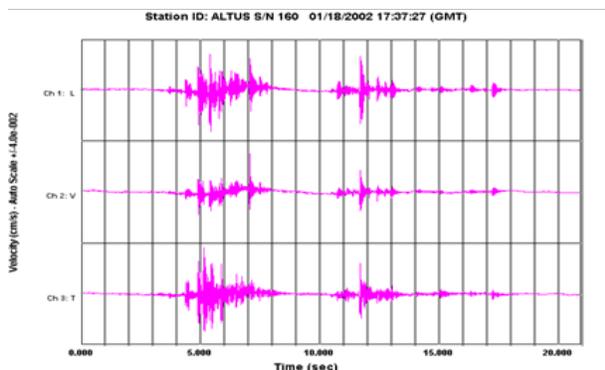


Figura 12. Velocidad vs tiempo en las tres componentes.

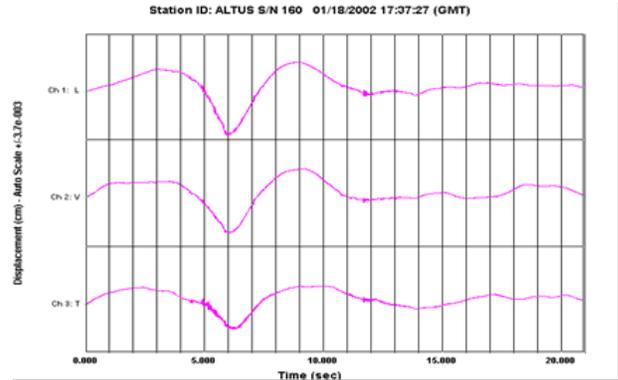


Figura 13. Desplazamiento vs tiempo en las tres componentes.

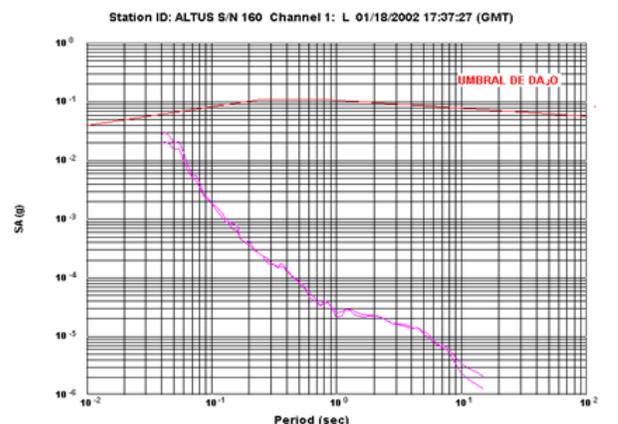


Figura 14. Espectro de aceleración vs periodo componente longitudinal.

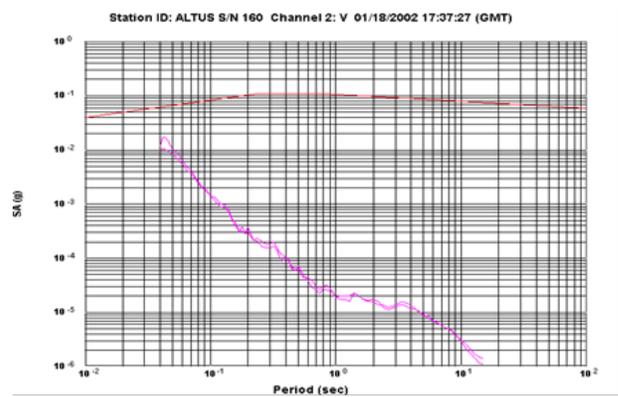


Figura 15. Espectro de aceleración vs periodo componente vertical.

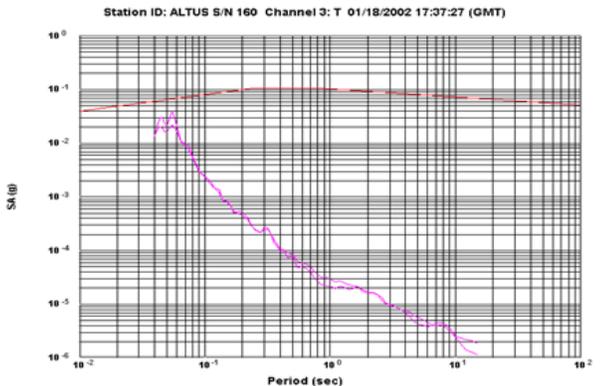


Figura 16. Espectro de aceleración vs periodo componente transversal.

Tabla 4. Aceleraciones máximas en las tres componentes: Longitudinal (E- W), Vertical (V) y Transversal (N- S).

ESTACIÓN	FECHA	HORA	LONG. g	VERTIC. g	TRANS. g	EVENTO
Nobsa	1/18 /2002	17:37:27	4.978	-10.367*	-7.534	Voladura

4. CONCLUSIONES

Los espectros de respuesta son herramientas de amplio uso en la ingeniería sísmica tanto en la microzonificación de un área, como en la caracterización de vibraciones naturales (sismos) o artificiales (voladuras, tráfico pesado, etc.), porque han permitido pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia o del periodo, los cuales realizan una comparación entre los espectros de respuesta y de umbral de daño.

Para evaluar los efectos de las voladuras sobre viviendas o estructuras cercanas a los frentes de explotación de las minas Nobsa y Suescún, se comparan los espectros de respuesta, para aceleraciones máximas en los tres componentes de la onda, con el espectro de umbral de daño, para comprobar si no exceden los límites establecidos por el código de construcción sismo resistente (NSR-98).

Los espectros de aceleración espectral vs periodo dominante del sitio para tres canales longitudinal L, vertical V, y transversal T, expuestos en las Figuras 14 - 16

y 20 - 22, permiten ilustrar que ninguno supera el umbral de daño del código colombiano de construcción sismo resistente, estando por debajo del valor expuesto por la norma española, (0.1 g).

La onda aérea para Nobsa y Suescún, está en el orden de 70 a 80 db (decibeles), muy por debajo de lo permitido dentro del margen de seguridad establecido por normas internacionales el cual es de 130 db, (Ver Figuras 17- 22 y Tabla 5).

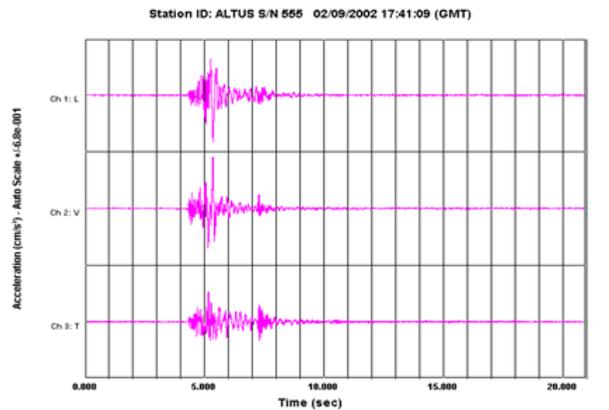


Figura 17. Acelerogramas de aceleración vs tiempo en las tres componentes.

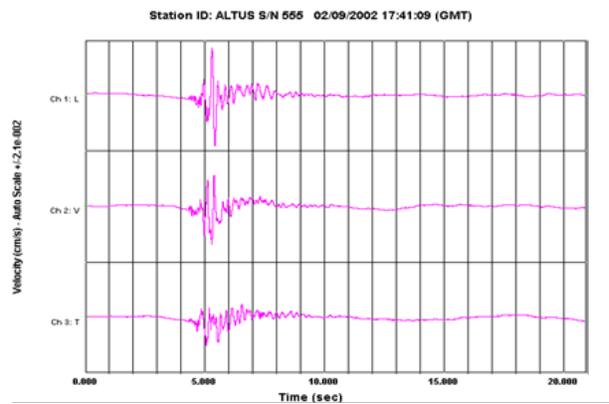


Figura 18. Velocidad vs tiempo en las tres componentes.

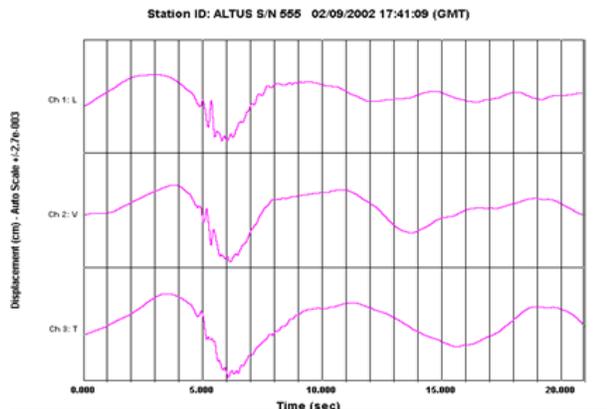


Figura 19. Desplazamiento vs tiempo en las tres componentes.

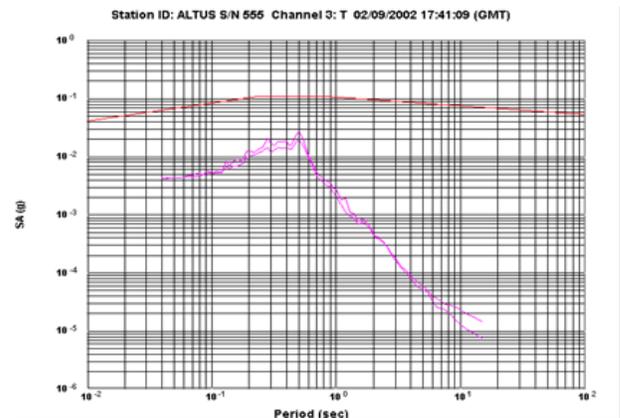


Figura 22. Espectro de aceleración vs periodo componente transversal.

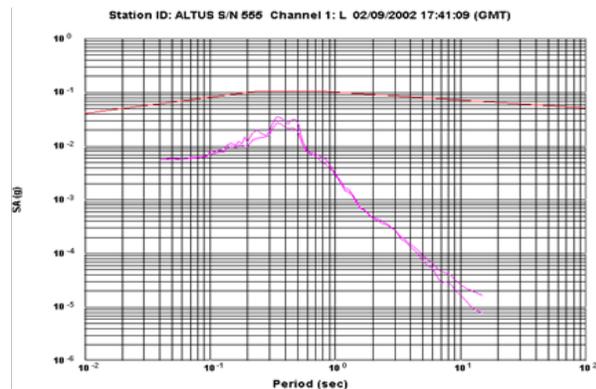


Figura 20. Espectro de aceleración vs periodo componente longitudinal.

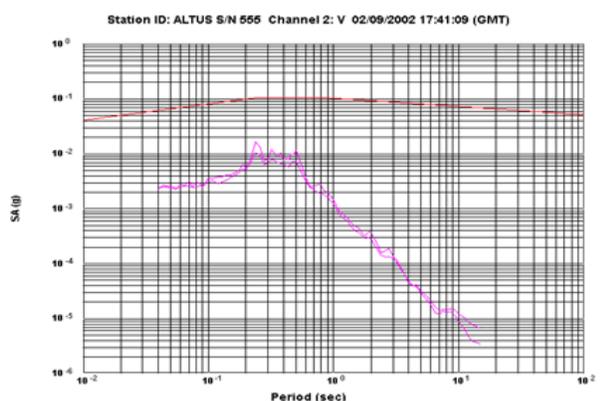


Figura 21. Espectro de aceleración vs periodo componente vertical.

Tabla 5. Aceleraciones máximas en las tres componentes: Longitudinal (E- W), Vertical (V) y Transversal (N- S).

ESTACION	FECHA	HORA	L LONG. g	VERTIC. g	TRANS. g	EVENTO
Suescún	02/09/2002	17:41:09	0.724	0.347	1.200 *	Voladura

REFERENCIAS

- [1] P. Allard "Etude des vibrations Engendrées par les Tirs de Mines", Scetaroute, Février, 1986.
- [2] R. C. Barkley, et al. *Ground and Air Vibrations Caused by Surface Blasting*, N.T.I.S., 1983.
- [3] G. A. Bollinger, *Blast Vibration Analysis*, 1971.
- [4] J. M. Esteves, "Control of Vibrations caused by Blasting", *Memoria 498*, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1978.
- [5] K. G. Hinzen, et al. *A New Approach to predict and Reduced Blast Vibration by Modelling of Acelerograms and Using a New Electronic Initiation System*. S. E. E., 1987.
- [6] I.T.G.E. *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería*. España, 1994.
- [7] J. Lleras Villaveces, *Metodología para el análisis e interpretación de vibraciones ambientales*. Tesis de Maestría. Ing. Civil. Universidad de los Andes, 1995.
- [8] C. López Jimeno, *Manual de voladura - Manual de minería en túnel y a cielo abierto*, ETSIM Madrid,

España. 1996.

- [9] *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente (NSR-98)*.
- [10] R. Tenreiro Pérez & C. Rafca, *Fundamentos de la prospección sísmica*. La Habana. Cuba, 1988.

ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF A MAGNETO-DIELECTRIC COMPOSED THROUGH AN ALGORITHM BASED ON THE NICOLSON-ROSS-WEIR METHOD

Propiedades electromagnéticas de un compuesto magneto dieléctrico a través de un algoritmo basado en el método Nicolson-Ross-Weir

Gabriel Peña Rodríguez¹, Rodrigo Vera Barrera², David Leonardo Mancipe³, Luis Ángel Lara González⁴,
¹Universidad Francisco de Paula Santander, Centro de Investigación en Materiales Cerámicos, Colombia.

²⁻³Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo de Investigación GINTEL, Colombia.

⁴Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Grupo de Investigación GEAM, Colombia.

Email: ¹gabrielpr@ufps.edu.co, ²vera.barrera.rodrigo@gmail.com, ³david.mancipe@uptc.edu.co,
⁴luisangel.lara@uptc.edu.co

(Recibido febrero 20 de 2021 y aceptado junio 29 de 2021)

Abstract

The present work implements the Nicolson-Ross-Weir (NRW) method to find the permittivity and permeability through an algorithm in Matlab® of a magneto- dielectric composed material made of polyester resin and magnetite powders randomly dispersed and oriented vertically and horizontally in the polymeric matrix. The measured data come from the simulation of the S parameters in ADS® between 150 kHz and 4GHz, on a microstrip type transmission line. The algorithm allowed to verify that the best response in high frequency of the magneto - dielectric composed where the vertically oriented particles, present the highest relative permittivity obtaining $E_r= 5.5$ for 30% wt concentration and $E_r= 4.5$ concentration of 20% wt, with an absorption coefficient which increases in function of frequency and the concentration of magnetite in the functional filler.

Key words: *composed materials, dielectric properties, electrical properties, ferromagnetic, magnetic properties, polymer, magnetite.*

Resumen

El presente trabajo implementa el método Nicolson-Ross-Weir (NRW) para encontrar la permitividad y permeabilidad mediante un algoritmo en Matlab® de un material magneto dieléctrico compuesto fabricado a base de resina de poliéster y polvos de magnetita dispersos al azar y orientados de forma vertical y horizontal en la matriz polimérica. Los datos medidos provienen de la simulación de los parámetros S en ADS® entre 150 KHz y 4GHz, sobre una línea de transmisión de tipo microcinta, el algoritmo permitió verificar que la mejor respuesta en alta frecuencia del compuesto magneto dieléctrico se presenta cuando las partículas están orientadas verticalmente, con permitividades relativas altas obteniendo $E_r= 5.5$ para la concentración del 30% y $E_r= 4.5$ para la concentración de 20% en porcentaje en peso, con un coeficiente de absorción, el cual aumenta en función de la frecuencia y la concentración de magnetita en el relleno funcional.

Palabras clave: *materiales compuestos, propiedades dieléctricas, propiedades eléctricas, ferromagnético, propiedades magnéticas, polímeros, magnetita.*

1. INTRODUCTION

Based on the characteristics of a metamaterial allows us to identify the area of application where it will have the greatest impact on science and industry [1]. Magneto-dielectric (MD) materials are a branch of metamaterials and the objective of their study is designing negative or positive permeability with a value determined [2]. The elaboration of a MD material consists of mixing one or more raw materials to get improved properties which are not obtained individually from original materials but from the orientation, proportion and geometry of the metamaterials used in the construction and their interaction with the electromagnetic waves [3], these materials are presented permeability (U) and permittivity (E) larger than one since in their manufacture are polarized in the presence of electromagnetic fields [4]. The extraction of the parameters E y U have gained much more interest within the scientific community because of the need to characterize them.

At the same time, electromagnetic pollution (EM) has grown considerably as the telecommunications industry and the marketing of several radiofrequency devices have advanced, which can create electromagnetic pollution with some effects on human activity [5]. For this reason, it is important to design electronic devices that offer better radiofrequency performance and guarantee high absorption power in order to reduce the electromagnetic radiation presents in telecommunications devices [6].

Magneto - dielectric materials composed by filled with iron oxides become attractive for the design of this type of radio frequency devices based on the absorption properties, low molecular weight, its abundance and low cost [7].

Several methods based on the measurement of the reflection and transmission coefficients as a sample of the material have been proposed in the literature [8] among these is the Nicolson-Ross-Weir (NRW) technique [9] extraction of dielectric parameters where a method is presented to determine the permittivity and permeability

in the frequency domain of a material sample by measuring the dispersion parameters S_{11} and S_{12} . This method reveals an issue to do the phase periodicity of the wave propagation factor P which results in infinite solutions for permittivity E and permeability U . However, this is solved by choosing solutions that comply with a reflection coefficient $|r| \leq 1$ [9]. In [10] It is proposed to solve this ambiguity in the phase, choosing a branch of solutions that correspond to one value of two or more measured frequencies. In spite of these methods require knowledge of the material and having to select a family of answers. So [11] it seems to be the most attractive solution because it is enough to measure the different phase among the previous points and use the information of the phase delay in the previously measured points.

In this paper, we design a method to predict the permittivity and permeability behavior of a magneto – dielectric composed material from the NRW technique, by analyzing the S parameters extracted with a Rohde & Schwarz ZVB8 Networks Vector Network Analyzer [12] Based on this technique, an algorithm was implemented in Matlab® software, through which the results extracted from the simulation of a transmission line in ADS® whose relative permittivity E_r is known in advance and which matches the value thrown by the Matlab® algorithm. Once the functionality of the algorithm has been validated, the permittivity and permeability of a microstrip type magneto – dielectric substrate made from P115A polyester resin and magnetic powders whose concentration varies between 10, 20 and 30% weight percentage, with particle size between 25 - 45 microns is extracted. Additionally, the magnetite particles were randomly distributed and vertically and horizontally aligned in the polymeric matrix by applying a constant 300 mT magnetic field, during the curing process [13].

2. NICOLSON-ROSS-WEIR EXTRACTION TECHNIQUE

The Nicholson-Ross-Weir extraction technique is based on measuring reflection and transmission on an isotropic material without losses under specific frequency conditions with permittivity or dielectric constant E_r and

permeability μ_r [12].

The phase propagation factor P of electromagnetic waves through the substrate can be determined from the measured scattering parameters and the impedance in the transmission line [11] as seen in eq. (1):

$$P = e^{\gamma d} = \frac{1 - S_{11} + S_{21}}{2S_{21}} + \frac{2S_{11}}{\left(z - \frac{1}{z}\right)S_{21}} \quad (1)$$

Where γ and d are the propagation constant and the length of the sample respectively. Eq. (2) presents the impedance of the transmission line z [14]:

$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{((1 - S_{11})^2 - S_{21}^2)}} \quad (2)$$

The difficulty with the extraction technique is that P presents a periodicity of the wave propagating through the material which causes eq. (1) to have infinite solutions because $e^{\gamma d} = e^{\alpha d} e^{j(\beta d + 2\pi m)}$ where α γ β are the constants of attenuation and propagation respectively and m is any integer. The solution presented by [11] consists in measuring the phase difference between the previously measured points, instead of calculating the phase at a particular point. The phase propagation factor, eq. (1), can be rewritten as presented in eq. (3):

$$\ln(e^{\gamma d}) = \ln(|e^{\gamma d}|) + j \arg(e^{\gamma d}) \quad (3)$$

For a point set in frequency w_0, w_1, \dots, w_n of the measured reflection and transmission coefficients, a propagation constant Y_0, Y_1, \dots, Y_n and a phase factor argument. The argument $\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_n$ at a specific point is expressed in eq. (4):

$$\phi_N = \phi_0 + \sum_{i=1}^N \arg\left(\frac{e^{\gamma_i d}}{e^{\gamma_{i-1} d}}\right) \quad (4)$$

Where ϕ_0 is the phase value at the first measured point. The propagation constant $\gamma = j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}\sqrt{n^2 - (\omega_c/\omega)^2}$ is replaced in eq. (3) where $n^2 = \epsilon_r\mu_r$ and knowing the fact that the angular cutoff frequency in a quasi-TEM line $\omega_c \rightarrow 0$ and using eq. (4), is obtained eq. (5) of the effective parameters [14].

$$\epsilon_r\mu_r = \left(\frac{1}{kd} \left[-j \ln(|e^{\gamma d}|) + \phi_0 + \sum_{i=1}^N \arg\left(\frac{e^{\gamma_i d}}{e^{\gamma_{i-1} d}}\right) \right]\right)^2 \quad (5)$$

Where k is a parameter known as the wave number. To find the relative dielectric constant E_r and permeability μ_r , the effective wave impedance expression is used as shown in eq. (6) and eq. (7) [14].

$$E_r = \left(\frac{\frac{1}{kd} \left[-j \ln(|e^{\gamma d}|) + \phi_0 + \sum_{i=1}^N \arg\left(\frac{e^{\gamma_i d}}{e^{\gamma_{i-1} d}}\right) \right]}{z}\right) \quad (6)$$

$$\mu_r = z \left(\frac{1}{kd} \left[-j \ln(|e^{\gamma d}|) + \phi_0 + \sum_{i=1}^N \arg\left(\frac{e^{\gamma_i d}}{e^{\gamma_{i-1} d}}\right) \right]\right) \quad (7)$$

Where z corresponds to eq. (2).

In a transmission line the phase velocity is $vp = c/\sqrt{\epsilon_{eff}}$ and it is in relation to wavelength λ [15], which converts the dielectric constant into a design parameter to be controlled.

3. EXPERIMENTAL METHODOLOGY

3.1. Manufacture of the magnetodielectric material

The manufacturing process of the microstrip began by weighing 50 grams of resin at room temperature (17°C). The concentration by weight of magnetite in the polymeric matrix was defined in weight percentages of 10%, 20% and 30%, as reported by Ngo [16] and Husain [17]. Taking into account these parameters, 5, 10 and 20 grams of magnetite were weighed with a 325 sieve size which varies between 25-45 microns. Then, the filler material was added to the resin by stirring the mixture for 5 minutes at a frequency of 100 rpm using a DLAB OS20-S stirrer.

Acrylic molds of 7 cm wide, 7 cm long, with a thickness of 1.72 mm, covered with a release agent, were used. A 0.94 mm thick copper sheet was placed on its base and once the mixture was homogenized, 1% catalyst (SuperCat S-960®) was added depending on the volume of resin, mixing for approximately 1 minute, after which the mixture was poured into the acrylic molds, filling them to the top, once this process was completed, a second

copper sheet was placed on the surface with the same dimensions as the base in a sandwich type configuration.

In order to guarantee the adhesion of the sheets with the polyester resin loaded with magnetite powder and the homogeneity in the dimensions of the compounds, an acrylic press was used during the curing process Fig. 1a. Once the mixture was pressed, the magnetite particles in the filler were aligned by using ferrite magnets with a constant magnetic field of 300mT. The samples were prepared in three configurations, randomly scattered particles, without field effect, horizontally aligned Fig. 1b, and vertically aligned with the magnetic field lines Fig. 1c, [10]. All composite samples were cured at room temperature for 24 hours.

Once the material was cured and the process of stripping the microstrips was completed, the transmission lines were prepared, for which a 4 mm thick portion of copper was isolated from the samples. A total of 9 samples were immersed in ferric chloride in a concentration of 40 vol%.

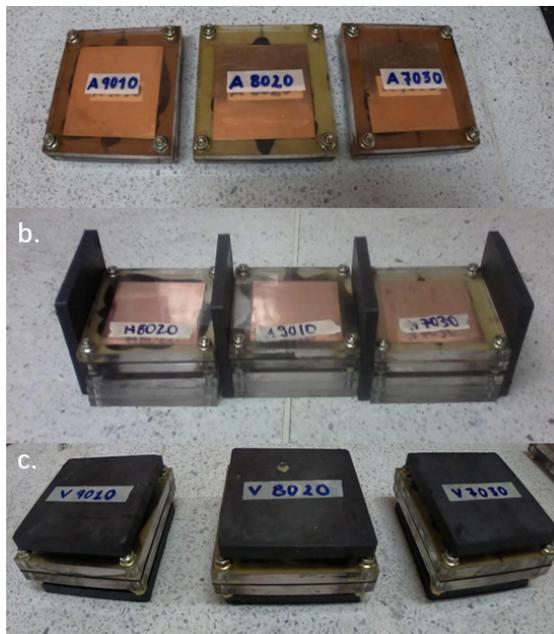


Figure 1. Curing samples composed of 10, 20, and 30% magnetite (a) without magnetic field, (b) in the presence of a horizontal fixed magnetic field and (c) a vertical fixed magnetic field produced by two permanent magnets.

After the chemical reaction, microstrip type circuits were obtained on which SMA type connectors were soldered on each of the circuit terminals in order to configure the transmission line as shown in Figure 2.

3.2. Extraction of S parameters

In order to analyze each one of the 9 elaborated microstrips, a complete factorial design of 32 were prepared, which was built with two factors and three levels per factor, matrix alignment (Mi) and percentage in weight of Wti filling.

The levels of each factor are shown in Table 1. The high frequency behavior and response of the magneto-dielectric composed was carried out by using a vector network analyzer from Rohde & Schwarz ZVB8 Networks. The VNA equipment was calibrated in a frequency range of 150 kHz to 4 GHz [18] in order to measure each of the samples, obtaining the S dispersion parameters.

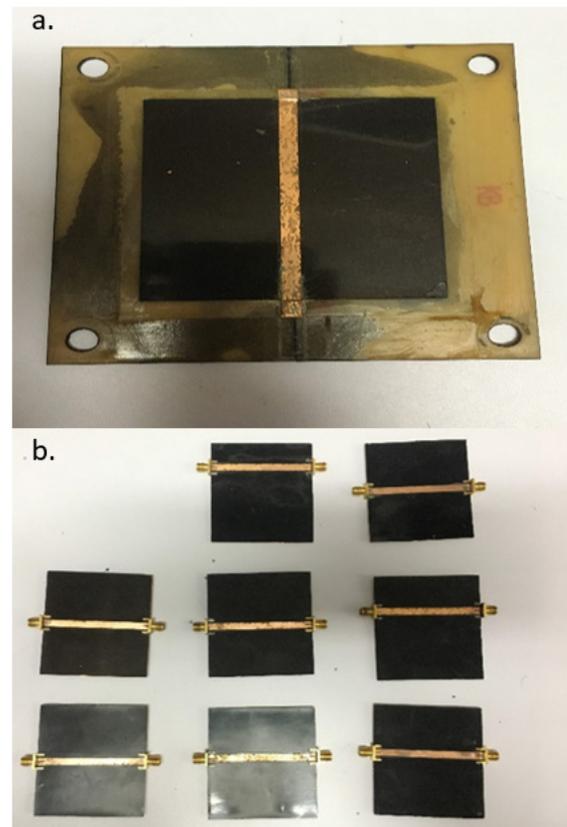


Figure 2. Microstrip type circuit setup.

Table 1. Factor levels included within the factorial design of 3^2 .

Levels	Under	Medium	High
Alignment (Mi)	Random (M1)	Vertical (M2)	Horizontal (M3)
% of filling (Wti)	10	20	30

3.3. Numerical extraction of E_r

In Figure 3, the ADS® simulation scheme is illustrated, used to extract the dispersion parameters, where a transmission line length $L=70$ mm with a relative dielectric constant equal to 3 is simulated. The 402 measured points of magnitude and phase against frequency of S_{11} y S_{21} are exported to Matlab® for the calculation of E_r .

Eq. (6) was implemented in Matlab®, where the information is entered into the algorithm by means of a vector containing the data extracted from the simulation of the transmission line dispersion parameters analyzed in ADS®, eq. 8 represents the extraction vector for the calculation of permittivity E_r in Matlab®. (8)

$$E_r(i) = c / (w(i) * L * -\log(\text{abs } p(i)) + \text{phi}0 + \text{sum_phi}) / z(i) \quad (8)$$

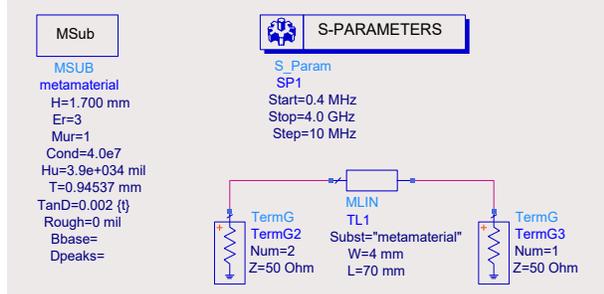


Figure 3. Simulation of a transmission line in ADS® with constant $E_r=3$.

Where, c corresponds to the speed of light, w represents the angular frequency of the measured point, in this case, L is the length of the sample, p is the phase propagation factor calculated from eq. (1), $\text{phi}0$ represents the first phase of P calculated, the variable sum_phi is the

accumulated value of the phase in a point N and the previous phase values and finally z is the transmission line impedance eq.(2). In order to solve the fact that the periodic response of P can result in infinite solutions for E_r , if the value of $\text{phi}0$ is negative the algorithm takes a value between 0 and 360 degrees.

The variable sum_phi is calculated by a basic accumulation algorithm in which the division between the $P(i)$ y $P(i-1)$, the value of the angle of that operation is extracted and the result is stored in the variable

Figure 4 illustrates the flowchart of the implemented algorithm. Figure 5 shows the permittivity calculated from the data extracted from the simulation (Figure 3). A line can be seen almost constant over 3 which coincides with the expected value of the simulation and indicates that the NRW method of parameter extraction implemented has good accuracy.

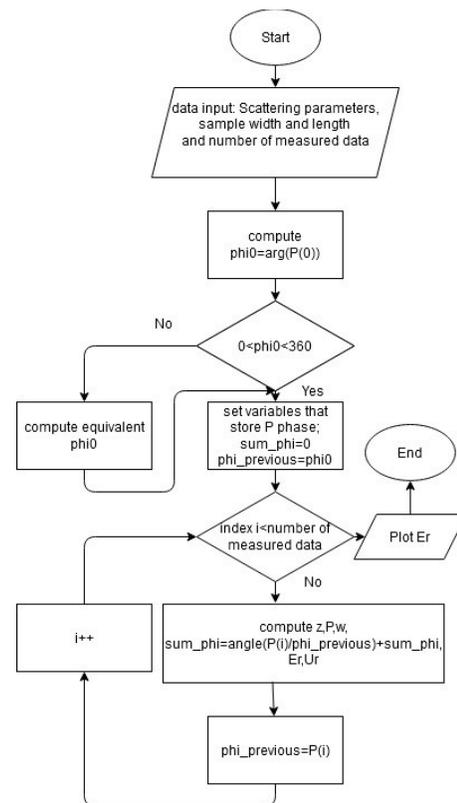


Figure 4. Flowchart of Matlab® algorithm for calculating permittivity.

As shown in the Figure 6, the phase propagation factor P has a periodic character; however, the algorithm was able to extract the dielectric constant.

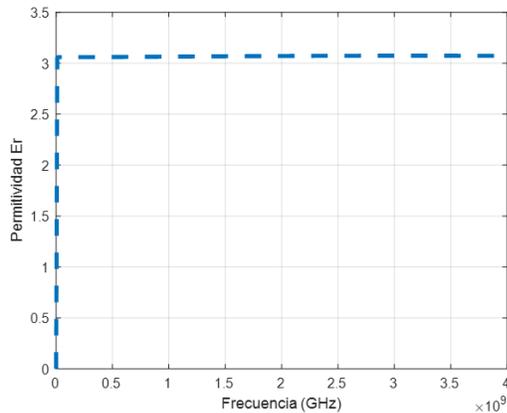


Figure 5. Permittivity $\epsilon_r=3$ Calculated with Matlab®.

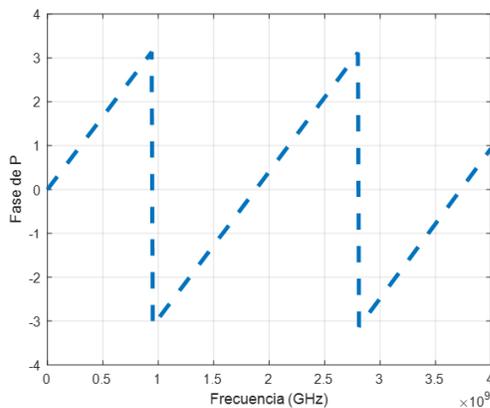


Figure 6. Phase graph of the phase propagation factor P .

4. EXPERIMENTAL RESULTS

4.1. Microstructural analysis

The first variable of interest defined in the experimental design of the present research is the alignment of the magnetite particles in the polymeric matrix, which was achieved by the application of a constant magnetic field of 300 mT, during the curing and cross-linking process of the polyester resin.

Three specific configurations were established for each material, randomly scattered particles, particles horizontally aligned to the magnetic field, and particles

vertically aligned to the magnetic field. The micrographic analysis using a Carl Zeiss EVO 10 scanning electron microscope is shown in Figure 7.

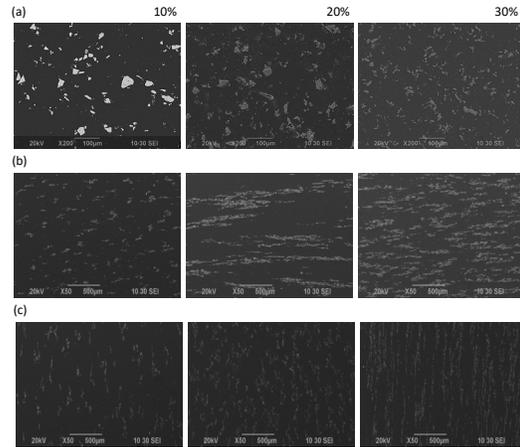


Figure 7. Distribution of magnetite particles in the polymeric matrix, a. randomly dispersed, b. horizontally aligned, and c. vertically aligned, in concentrations of 10, 20 and 30 % of magnetite.

In Figure 7, it is evident that by increasing the concentration of magnetite within the polymeric matrix, the filler particles adjust better to the field lines. At the same time, it is perceived that in low concentrations with 10% magnetite, the particles are presented in insufficient quantity which do not allow a complete adjustment of the magnetic field line, creating vacant spaces where the own resistivity of the polymer can increase, creating different conductive zones within the composed material.

4.2. Obtaining dielectric properties

The best morphological configuration of the filler against the field lines is given by mixing 70% polyester resin and 30% magnetite with a particle size below 45 μm , sieve 325, the images presented coincide with the observations made in previous works by Jolly [19] and Varga [20].

4.3. Obtaining dielectric properties

Figures 8 and 9 show the dielectric and relative permeability constants obtained by applying the algorithm designed in Matlab®, taking into account the orientation and concentration of the magnetite particles

in the polymer matrix, are characterized in a frequency range between 150 kHz and 4 GHz.

In the Figure 8 (a) for composite material with randomly dispersed particles, a dependence is observed between the frequency and E_r , which decreases at the end of the frequency band. The relative permittivity E_r of the samples containing less magnetite Fe_3O_4 in the functional filling of the substrate is around $E_r=2$. However, the value of this property increases significantly as the concentration of magnetite increases.

Figure 8 (b) represents the behavior of the composed material with particles aligned horizontally and in the direction of the transmission line. In this sense, the composed material behaves as an ordinary dielectric since no significant changes are seen when increasing the percentage of magnetite in the filler [21].

The vertically oriented particles, Figure 8 (c) illustrates the highest relative permittivity obtaining $E_r= 5.5$.for 30% concentration and $E_r= 4.5$ for the concentration of 20% of the magnetite content in the polymer matrix in the range of 2.5 to 4GHz. It increases to respect to the other configurations can be given by the dipole polarization of the magnetite at increasing frequency, which can be favored by the alignment of the particles vertically in the polymer matrix, allowing the transfer of electrons between the iron ions Fe_{2+} and Fe_{3+} present in the magnetite [12].

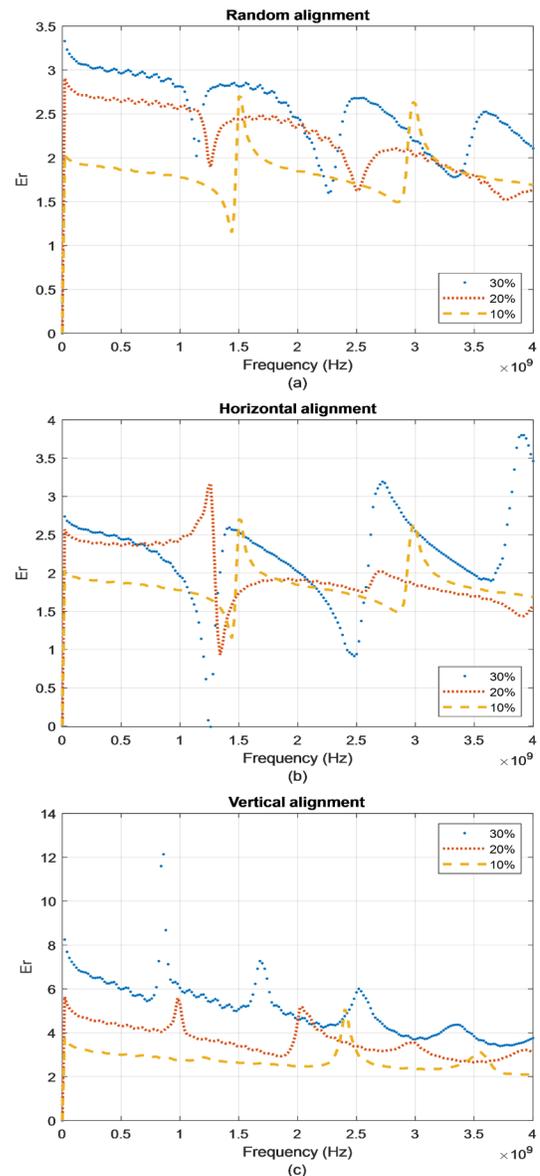


Figure 8. Relative permittivity of the nine samples organized by orientation; (a) random, (b) horizontal and (c) vertical.

Figure 9 shows the relative permeability. It can be seen that with lower concentrations of magnetite in the polymer matrix, the U_r is close to one by the dielectric property of the resin and grows as the concentration increases.

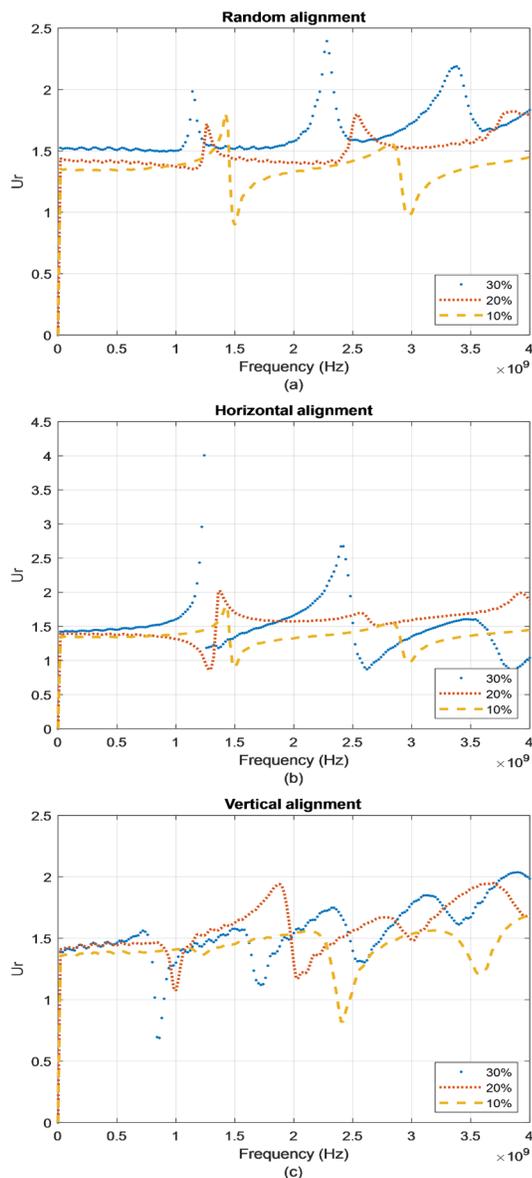


Figure 9. Relative permeability of the nine samples organized by orientation; (a) random, (b) horizontal and (c) vertical.

By the other side, Figure 10 illustrates the electrical conductivity calculated by the expression $\sigma(S/m)=2\pi f\epsilon_0 \epsilon''_r$. [21].

The vertically aligned magnetite particles with a concentration of 30% magnetite in Figure 8(c) shows an increase in conductivity as the frequency increases, which

coincides with the drop in relative permittivity shown in Figure 8(c), in turn the horizontal alignment contributes to the magnetic loss, making the dielectric effect of the polymer stronger.

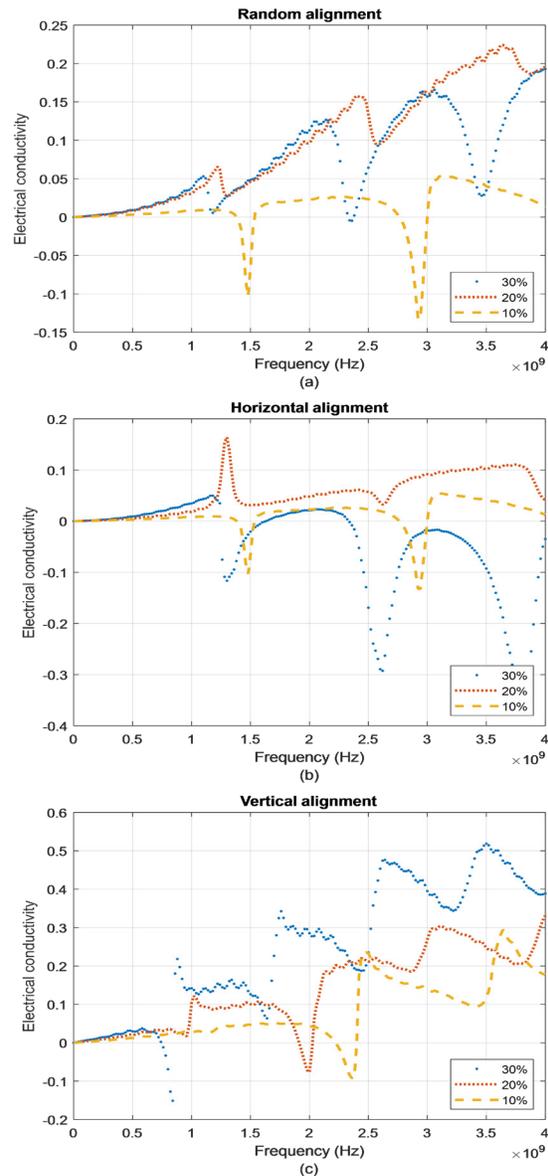


Figure 10. Conductivity σ of the nine samples organized by orientation; (a) random, (b) horizontal and (c) vertical.

This variation is particularly due to the natural resonance of magnetite, which can be attributed to exchange resonances, which coincides with Aharoni et al [22].

By the way, Figure 11 shows the absorption coefficient of the compound calculated by $A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$. The value of A increases as the concentration of magnetite in the composite increases.

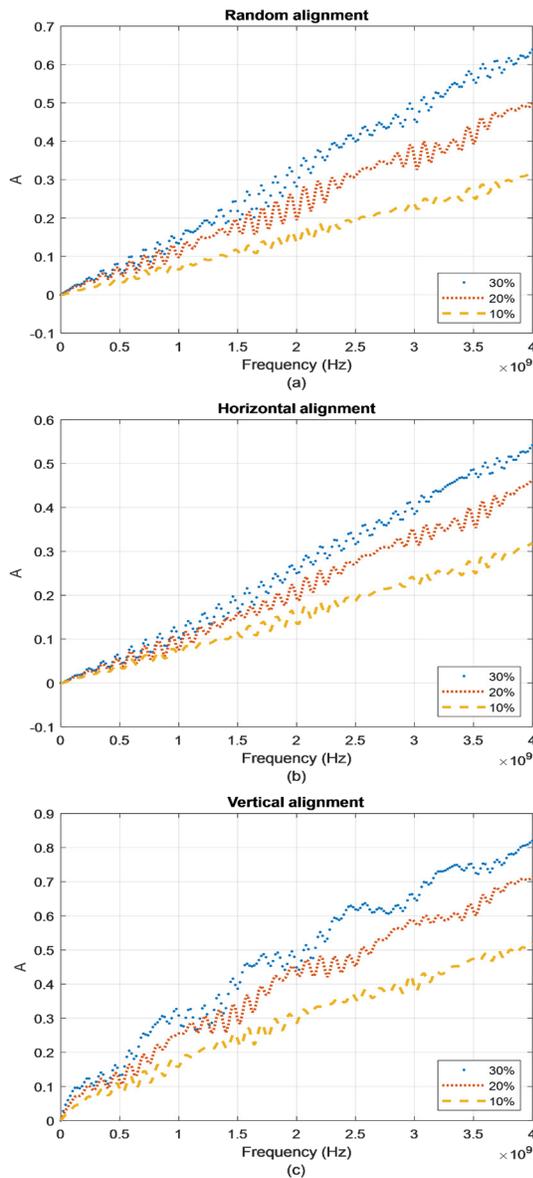


Figure 11. Absorption coefficient A of the nine samples organized by orientation: (a) random, (b) horizontal and (c) vertical.

Table 2 presents the relative permittivity and permeability values which confirm that the best performing samples

were those with Fe_2O_4 were oriented vertically.

Table 2. Permittivity and relative permeability of the composite material.

	Er (1.5Ghz)	Er (3Ghz)	Ur (1.5Ghz)	Ur (3Ghz)
M7030A	2.8	2.2	1.5	1.7
M8020A	2.4	2.1	1.4	1.5
M9010A	2.7	2.6	0.9	1
M7030V	5.7	3.7	1.6	1.8
M8020V	3.4	3.5	1.6	1.5
M9010V	2.6	2.3	1.5	1.5
M7030H	2.5	2.5	1.3	1.4
M8020H	2.7	1.8	1.7	1.6
M9010H	1.7	2.6	0.9	1

4. CONCLUSIONS

It was designed and validated an algorithm in Matlab® which allowed to extract the dielectric properties of a dielectric microstrip type composed material made from polyester resin and magnetite powders randomly dispersed and aligned horizontally and vertically by a constant magnetic field of 300 mT.

Nine mixtures of the dielectric magnet material were elaborated with magnetite concentrations of 10.20 and 30% weight percentage by means of dispersion in the polymeric matrix. The conductivity and absorption coefficient of the compounds increased as a function of the frequency and concentration of magnetite in the filler with high values for the 20 and 30% magnetite mixtures.

The alignment and concentration of the magnetite particles in the functional filler directly influence the dielectric behavior of the compound, where the best configuration is given for material with vertically aligned particles in the polymer matrix with a concentration of 30% weight percentage.

A designed magneto-dielectric material can be characterized at high frequency by measuring the scattering parameters and entering the data into the algorithm. The method of extracting NRW dielectric

parameters proved to be easy to implement and of high accuracy.

REFERENCES

- [1] A. Matías and J. Emilio, "Diseño y simulación de antenas de microcintas de parche triangular cargadas con estructuras metamateriales para comunicaciones inalámbricas," 2017.
- [2] L. Yousefi, "Theory , Design and Development of Artificial Magnetic Materials," p. 135, 2009.
- [3] A. Pinsakul and S. Promwong, "Artificial magneto-dielectric metamaterial with microstrip antenna for wireless applications," *Proceeding - 5th Int. Conf. Eng. Appl. Sci. Technol. ICEAST 2019*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/ICEAST.2019.8802536.
- [4] L. A. Lara, D. L. Mancipe, Y. Pineda, J. J. Moreno, and G. Peña-Rodríguez, "Design and characterization of a magneto-dielectric composite in high frequency with aligned magnetite powders," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1386, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1386/1/012103.
- [5] G. Sun, B. Dong, M. Cao, B. Wei, and C. Hu, "Hierarchical dendrite-like magnetic materials of Fe₃O₄, γ -Fe₂O₃, and Fe with high performance of microwave absorption," *Chem. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 1587–1593, 2011.
- [6] T. Wang, R. Han, G. Tan, J. Wei, L. Qiao, and F. Li, "Reflection loss mechanism of single layer absorber for flake-shaped carbonyl-iron particle composite," *J. Appl. Phys.*, vol. 112, no. 10, p. 104903, 2012.
- [7] Q. Li, Y. Chen, and V. G. Harris, "Particle-size distribution modified effective medium theory and validation by magneto-dielectric Co-Ti substituted BaM ferrite composites," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 453. Elsevier B.V., pp. 44–47, May 01, 2018, doi: 10.1016/j.jmmm.2018.01.013.
- [8] F. Costa, M. Borgese, M. Degiorgi, and A. Monorchio, "Electromagnetic characterisation of materials by using transmission/reflection (T/R) devices," *Electron.*, vol. 6, no. 4, 2017, doi: 10.3390/electronics6040095.
- [9] A. M. Nicolson and G. F. Ross, "Measurement of the Intrinsic Properties Of Materials by Time-Domain Techniques," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 19, no. 4, pp. 377–382, 1970, doi: 10.1109/TIM.1970.4313932.
- [10] W. B. Weir, "Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave Frequencies," *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 1, pp. 33–36, 1974, doi: 10.1109/PROC.1974.9382.
- [11] O. Luukkonen, S. I. Maslovski, and S. A. Tretyakov, "A stepwise Nicolson-Ross-Weir-based material parameter extraction method," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 10, no. December 2011, pp. 1295–1298, 2011, doi: 10.1109/LAWP.2011.2175897.
- [12] E. J. Rothwell, J. L. Frasch, S. M. Ellison, P. Chahal, and R. O. Ouedraogo, "Analysis of the Nicolson-Ross-Weir method for characterizing the electromagnetic properties of engineered materials," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 157, no. October, pp. 31–47, 2016, doi: 10.2528/PIER16071706.
- [13] L. Á. Lara-González, W. Guillermo-Rodríguez, Y. Pineda-Triana, G. Peña-Rodríguez, and H. F. Salazar, "Optimization of the Tensile Properties of Polymeric Matrix Composites Reinforced with Magnetite Particles by Experimental Design," *TecnoLógicas*, vol. 23, no. 48, pp. 83–98, 2020.
- [14] Abdulrahman. S. M. Alqadami, Beadaa Mohammed, Konstanty S. Bialkowski, and Amin Abbosh, "Fabrication and characterization of flexible polymer iron oxide composite substrate for the imaging antennas of wearable head imaging systems," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 17, no. 8, pp. 1364–1368, 2018, doi: 10.1109/LAWP.2018.2841879.
- [15] G. Gonzalez, *MICROWAVE TRANSISTOR AMPLIFIERS Analysis and Design*, 2nd ed. 1997.
- [16] I. L. Ngo, S. Jeon, and C. Byon, "Thermal conductivity of transparent and flexible polymers containing fillers: A literature review," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 98, pp. 219–226, 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.082.
- [17] A. R. J. Hussain, A. A. Alahyari, S. A. Eastman, C. Thibaud-Erkey, S. Johnston, and M. J. Sobkowicz,

- “Review of polymers for heat exchanger applications: factors concerning thermal conductivity,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 113, pp. 1118–1127, 2017.
- [18] H. Heuermann, “Calibration of a network analyzer without a thru connection for nonlinear and multiport measurements,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 56, no. 11, pp. 2505–2510, 2008.
- [19] M. R. Jolly, J. D. Carlson, and B. C. Muñoz, “A model of the behaviour of magnetorheological materials,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 5, pp. 607–614, 1999, doi: 10.1088/0964-1726/5/5/009.
- [20] Z. Varga, G. Filipcsei, and M. Zrínyi, “Magnetic field sensitive functional elastomers with tuneable elastic modulus,” *Polymer (Guildf.)*, vol. 47, no. 1, pp. 227–233, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.polymer.2005.10.139.
- [21] Y. L. Chan, F. Esa, K. Y. You, M. S. Sim, M. Z. H. Mayzan, and M. A. Jusoh, “Electromagnetic properties of magnetite/epoxy resin composites at x-band frequency,” *Prog. Electromagn. Res. Symp.*, vol. 2017-Novem, pp. 3004–3010, 2017, doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293649.
- [22] A. Aharoni, “Exchange resonance modes in a ferromagnetic sphere,” *J. Appl. Phys.*, vol. 69, no. 11, pp. 7762–7764, 1991.

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

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

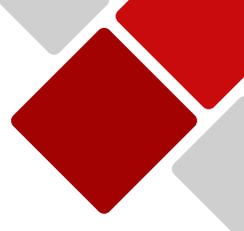
Ingeniería, Investigación y Desarrollo invita a toda la comunidad académica e investigativa de instituciones públicas y privadas, regionales, nacionales e internacionales, tales como investigadores, grupos y semilleros de investigación, docentes, estudiantes, directivos de ingeniería y demás interesados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

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

Todos los artículos deben matricularse en la plataforma OJS, accesible desde el sitio web www.uptc.edu.co/enlaces/ringinedesa, junto con la carta de presentación, firmada por los autores, para realizar el proceso de matrícula del manuscrito el autor debe compilar previamente un formulario de registro, escogiendo la opción de autor, donde le será asignado un usuario y contraseña para que pueda realizar el envío del documento. Por medio de este mismo enlace podrá ser consultada y descargada la plantilla de presentación de artículos y el modelo de la carta de cesión de derechos de autores estipulado por la revista.

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

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



Título: se sugiere no exceder de 15 palabras.

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

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

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

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

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

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

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

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

Para obtener la plantilla de presentación de artículos, por favor diríjase al correo: revistaid@uptc.edu.co o al enlace: www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa, a la sección Acerca de.

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

Nombre/Name: _____ C.C. _____

Apellidos/Last Name: _____

Profesión/Profession: _____

Departamento académico/Academic department: _____

Dirección de Envío/Address: _____

Teléfono/Telephone Number: _____ ext: _____ Fax: _____

Oficina/: _____

Ciudad/City: _____

País/Country: _____

Correo Electrónico/Email: _____

Suscripción a partir del número/ Subscription from number : _____

Firma: _____

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

Correspondencia, Canje y Suscripciones

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

Uptc Sogamoso-Boyacá, Colombia

E-mail: revistaiid@uptc.edu.co

www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa

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



Ingeniería, Investigación y Desarrollo

ISSN: 1900-771X Impreso

ISSN: 2422-4324 En línea